



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

N°5 (95)

----- · ·

2021 · · -----

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 5 (95) 2021

Виходить 6 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

2021

Засновник:
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пішінко 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); Біляєв М. М., ДНУЗТ (Україна); Богдьявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (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., ДНУЗТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., ДНУЗТ (Україна); Шинкаренко В. І., ДНУЗТ (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 28.12.2021 р., протокол № 3

Видавець Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпро) Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
та редакції тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.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»

Dnipro National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 5 (95) 2021

Bi-Monthly ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ 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

2021

Founder:

DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT
NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN

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., DNURT (Ukraine); Bodnar B. E., DNURT (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Bondarenko I. O., DNURT (Ukraine); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., DNURT (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., DNURT (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); Masiuk V. I., State University of Infrastructure and Technology (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Ślaskowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (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 28.12.2021, Protocol no. 3

Publisher Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (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: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.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»

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.869.2:629.46

О. Л. МАРЕНИЧ^{1*}, О. О. КАРЗОВА^{2*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ks.marenych@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта karzova@i.ua, ORCID 0000-0003-3607-1188

Збільшення коефіцієнта потужності електроприводів маневрових залізничних лебідок

Мета. Основною метою роботи є розробка рекомендацій зі збільшення коефіцієнта потужності електроприводів маневрових залізничних лебідок з урахуванням особливостей технологічного процесу на вантажно-розвантажувальних дільницях прирейкових складів підприємств із ремонту рухомого складу залізниць. Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання: обрати раціональний спосіб збільшення коефіцієнта потужності електропривода маневрової лебідки з урахуванням особливостей технологічного процесу, простоти та надійності електричної схеми; розробити методику (алгоритм розрахунку) для визначення елементів схеми, які призначені для збільшення коефіцієнта потужності; із використанням розробленої методики провести дослідження для визначення чисельних технічних характеристик вказаних елементів, оцінки збільшення коефіцієнта потужності для електропривода деяких моделей лебідок; сформулювати рекомендації щодо можливої модернізації електропривода маневрових лебідок. **Методика.** Розроблено алгоритм розрахунку реактивної потужності нерегульованого косинусного конденсатора, який потрібно на постійній основі приєднати до затисків трифазного асинхронного двигуна приводу маневрової лебідки з метою підвищення коефіцієнта потужності. **Результати.** Дослідження показали, що запропонований спосіб збільшення коефіцієнта потужності дає суттєве його зростання за різних значень коефіцієнта завантаження електродвигуна маневрової лебідки, забезпечуючи при цьому простоту схеми та її надійність. **Наукова новизна.** Уперше з урахуванням особливостей технології розвантаження-завантаження вагонів розроблено методику розрахунку потрібної реактивної потужності нерегульованого косинусного конденсатора, який приєднують до затисків електродвигуна приводу. Запропоновано формулу для визначення коефіцієнта завантаження електродвигуна залежно від співвідношення розвантажених та завантажених вагонів, які пересуваються за допомогою лебідки. **Практична значимість.** Результати роботи мають практичну цінність. Отримані чисельні значення збільшення коефіцієнтів потужності електроприводів маневрових лебідок та реактивні потужності потрібних для цього косинусних конденсаторів можуть бути використані як первинна інформація під час з'ясування питання доцільності модернізації електроприводів лебідок шляхом приєднання до затисків трифазного асинхронного двигуна нерегульованих косинусних конденсаторів.

Ключові слова: коефіцієнт потужності; маневрова лебідка; коефіцієнт завантаження; косинусний конденсатор; розвантаження-завантаження вагонів; енергозбереження

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Вступ

Коефіцієнт потужності – важливий параметр кожного електропривода. Збільшення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ електроприводів є одним із напрямів збереження електроенергії в усіх галузях господарства країни. За наявних технологій виробничих процесів на підприємствах залізничного транспорту велика кількість електроприводів працює в умовах завантажень, що суттєво менші від номінальних.

Зі зменшенням навантаження на валу електродвигуна приводу зменшується його $\cos\phi$. Тому збільшення коефіцієнтів потужності недовантажених ТАД (трифазних асинхронних двигунів, які здебільшого застосовують в електроприводах) є актуальною задачею.

Оцінити $\cos\phi$ можна згідно з табл. 1 [8].

Таблиця 1

Оцінка коефіцієнта потужності

Table 1

Power factor estimation

Оцінка значення коефіцієнта потужності	Високе	Добре	Задовільне	Низьке	Незадовільне
$\cos\phi$	0,95...1	0,8...0,95	0,65...0,8	0,5...0,65	0...0,5

Питанням збільшення коефіцієнтів потужності електроприводів на підприємствах із ремонту рухомого складу залізниць присвячені роботи [1, 5, 12], в інших галузях – [18–19, 21].

Характерним прикладом технологій, за яких електропривод суттєвий час працює у недовантаженому режимі, є процес розвантаження та навантаження вагонів із використанням маневрових залізничних лебідок. Манєврові лебідки – це спеціальна тягова лебідка для пересування вагонів. Її використовують як альтернативу манєврового тепловоза для підтягування, обміну завантажених вагонів на порожні та для інших робіт на вантажно-розвантажувальних дільницях прирейкових залізничних складів, а також для проведення різного ремонту у вагонних депо.

Існує значна кількість моделей манєврових електричних лебідок (ТЛ–8Б, ЛМ6ДП, ЛМ–10ДП, ЛМ–8ДП–М, ЛМ–12ДП, ЛВ та ін.) з потужністю ТАД орієнтовно від 4 до 11 кВт та синхронною частотою обертання електродвигунів 1 500, 1 000, 750 об/хв [7, 11]. Завантаження та розвантаження вагонів – один з основних технологічних процесів на залізницях країни, який виконують у великих об'ємах. Літературних джерел із питання збільшення $\cos\phi$ електроприводів манєврових лебідок не знайдено.

Тому дослідження способів збільшення коефіцієнтів потужності електродвигунів манєврових лебідок буде сприяти суттєвому збереженню електроенергії під час вказаних робіт.

Мета

Основною метою нашої роботи є розробка рекомендацій зі збільшення коефіцієнта потужності електроприводів манєврових залізничних лебідок з урахуванням особливостей технологічного процесу на вантажно-розвантажувальних дільницях прирейкових залізничних складів.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- обрати раціональний спосіб збільшення коефіцієнта потужності електропривода манєврової лебідки з урахуванням особливостей технологічного процесу, простоти та надійності електричної схеми;
- розробити методику (алгоритм розрахунку) для визначення елементів схеми, які призначені для збільшення коефіцієнта потужності;
- із використанням розробленої методики провести дослідження для визначення чисельних технічних характеристик указаних елементів, оцінки збільшення коефіцієнта потужності для електропривода деяких моделей лебідок;
- сформулювати рекомендації щодо можливої модернізації електропривода манєврових лебідок.

Методика

Чисельні значення $\cos\phi_i$ за i -го коефіцієнта завантаження k_{zi} електродвигуна приводу визначають за залежністю $\cos\phi_i = f(k_{zi})$:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$$k_{zi} = \frac{P_{2i}}{P_{2ном}}, \quad (1)$$

де P_{2i} – потужність на валу за i -го завантаження; $P_{2ном}$ – номінальна потужність електродвигуна.

Для нашого випадку з урахуванням особливостей технологічного процесу пропонуємо таку формулу:

$$k_{zi} = \frac{P_{2i}}{P_{2ном}} = \frac{N_{сер} m - N_{сер.з} k_{сер.в} n_i}{N_{сер} m}, \quad (2)$$

де $N_{сер}$ – середня вага одного завантаженого вагона, т; m – максимальна кількість завантажених вагонів, які можуть пересуватися з допомогою лебідки згідно з її технічною характеристикою; $N_{сер.з}$ – середнє завантаження одного вагона, т; $k_{сер.в}$ – середній коефіцієнт використання вантажопідйомності одного вагона по мережі; n_i – кількість розвантажених вагонів.

Коефіцієнт використання вантажопідйомності коливається залежно від щільності вантажу. У цілому за всіма вантажами середній коефіцієнт використання вантажопідйомності по мережі складає $k_{сер.в} = 0,86$ [10].

У разі пересування вантажу ($N_{сер} m$), тобто за $n_i = 0$, ТАД приводу маневрової лебідки працює в номінальному режимі. При цьому $P_{2i} = P_{2ном}$, коефіцієнт $k_{30} = 1$ та $\cos \varphi_0 = \cos \varphi_{ном}$.

Після розвантаження одного вагона ($n_i = 1$):

$$k_{31} = \frac{N_{сер} m - N_{сер.з} k_{сер.в}}{N_{сер} m}. \quad (3)$$

Після розвантаження двох вагонів ($n_i = 2$):

$$k_{32} = \frac{N_{сер} m - N_{сер.з} k_{сер.в} \cdot 2}{N_{сер} m}. \quad (4)$$

І так далі до $n_i = n_{i\max} = m$.

Перевантаження електродвигуна не допускають. Тому не розглядаємо $\cos \varphi_i$ за $k_{zi} > 1$.

До сукупності вагонів, що пересуваються маневровою лебідкою, найчастіше належать такі: критий (вага 26 т, завантаження 68 т), піввагон (вага 23 т, завантаження 71 т), платформа (вага 23,5 т, завантаження 71 т) [14]. Середня вага одного вагона вказаних типів:

$$\frac{26 + 23 + 23,5}{3} = 24,2 \text{ т.}$$

Середнє завантаження одного вагона вказаних типів:

$$N_{сер.з} = \frac{68 + 71 + 71}{3} = 70 \text{ т.}$$

Середня вага одного завантаженого вагона:

$$N_{сер} = 24,2 + k_{сер.в} \cdot 70 = 24,2 + 0,86 \cdot 70 = 84,4 \text{ т.}$$

Отримані значення $N_{сер.з}$ та $N_{сер}$ дозволяють визначити k_{zi} за формулою (2) для різних значень n_i та m .

У нашому випадку раціональним із точки зору простоти електричної схеми способом збільшення коефіцієнта потужності ТАД приводу маневрової лебідки вважаємо застосування статичного нерегульованого косинусного конденсатора, який установлюють біля електродвигуна та приєднують безпосередньо до його затисків. Це зумовлено також такими їх якостями: мала вага косинусних конденсаторів, відсутність частин, які обертаються, незначні втрати енергії в них, легкість обслуговування, безпека та надійність у роботі.

У літературі наведено ряд методик із розрахунку робочих характеристик трифазних асинхронних двигунів, наприклад, [2, 4, 13, 15, 17]. У цих методиках для проведення розрахунків характеристик, у тому числі потрібних нам залежностей $\cos \varphi_i = f(k_{zi})$ та $\eta = f(k_{zi})$ (де η – коефіцієнт корисної дії електродвигуна), застосовують схеми заміщення. Вихідними даними є параметри схеми заміщення: активний та індуктивний опори кола намагнічування, активний та індуктивний опори фазної обмотки статора, опори кола ротора. Ці параметри для сучасних ТАД (типу АІР та ін.) у каталогах та довідниках не наводять. Для їх визначення пот-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

рібні розрахунки значних обсягів та суттєві експериментальні дослідження.

Із метою усунення значних обсягів розрахунків потрібних характеристик ($\cos \varphi_i = f(k_{zi})$ та $\eta = f(k_{zi})$) пропонуємо як базовий ТАД узяти електродвигун серії 4А з потужністю та частотою обертання згідно з технічними характеристиками конкретної моделі маневрової лебідки.

Указані характеристики для ТАД серії 4А наведені в [3]. За необхідності двигун серії 4А на практиці можна замінити аналогом із серії АІР [16]. Ідея запропонованого способу розрахунку збільшення $\cos \varphi_i$ електродвигуна привodu лебідки така. Розраховують потрібну реактивну потужність косинусного конденсатора для збільшення $\cos \varphi_i$ при $k_{zi} = 1$ від $\cos \varphi_{\text{ном}}$ до максимального рекомендованого значення в межах 0,92...0,96 [6] за такою формулою:

$$Q_k = P_a (tg \varphi_1 - tg \varphi_2), \quad (5)$$

де Q_k – реактивна потужність, яка потрібна для збільшення коефіцієнта потужності від $\cos \varphi_{\text{ном}}$ до рекомендованого значення 0,91...0,96; P_a – активна потужність, яку споживає електродвигун із мережі, кВт; φ_1 та φ_2 – відповідно кути зсуву фаз між напругою та струмом до приєднання та після приєднання конденсатора, град.

Далі підбирають за довідковими даними косинусний конденсатор із реактивною потужністю, найближчою до розрахункової Q'_{30} в бік збільшення, який на постійній основі приєднують до затискачів ТАД. Для проведення досліджень із метою чисельної оцінки збільшення коефіцієнта потужності за запропонованим способом розроблено такий алгоритм:

1. Визначити модель маневрової лебідки.
2. За формулою (2) розрахувати $k_{zi} = 0, 2, 3, \dots, m$, де m – кількість вагонів згідно з технічною характеристикою обраної моделі лебідки.
3. Вибрати електродвигун серії 4А з номінальною потужністю та частотою обертання відповідно до технічної характеристики лебідки.
4. Для вибраного електродвигуна побудувати графіки залежностей $\cos \varphi_i = f(k_{zi})$ та $\eta = f(k_{zi})$ (рис. 1).

5. Прийняти, що за $k_{30} = 1$ коефіцієнт потужності після приєднання косинусного конденсатора повинен збільшитись від $\cos \varphi_{\text{ном}}$ до 0,94.

За формулою (5) розрахувати $Q'_{30} = Q_k$, у якій Q'_{30} – розрахункова реактивна потужність для збільшення коефіцієнта потужності від $\cos \varphi_{\text{ном}}$ 0,94 за $k_{30} = 1$; φ_1 – кут, косинус якого дорівнює $\cos \varphi_{\text{ном}}$; φ_2 – кут, косинус якого дорівнює 0,94;

$$P_{a0} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

де P_{a0} – активна потужність, яку споживає електродвигун із мережі в номінальному режимі, кВт (за $k_{30} = 1$).

6. За довідковими джерелами підібрати косинусний конденсатор із реактивною потужністю Q_{30} , найближчою до Q'_{30} у більший бік. У подальшому користуємося Q_{30} .

7. За аналогією до формули (5):

$$Q_{30} = P_{ai} (tg \varphi_i - tg \varphi_{iQ}). \quad (7)$$

Звідки:

$$tg \varphi_{iQ} = \frac{P_{ai} \cdot tg \varphi_i - Q_{30}}{P_{ai}}; \quad (8)$$

$$P_{ai} = \frac{P_i}{\eta_i} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot k_{zi}}{\eta_i}, \quad (9)$$

де P_{ai} – активна потужність, яку споживає ТАД із мережі за певного k_{zi} ; φ_i – кут за певного k_{zi} до вмикання Q_{30} ; φ_{iQ} – кут за певного k_{zi} після вмикання Q_{30} .

Відповідно до $\cos \varphi_i = f(k_{zi})$ знаходимо $\cos \varphi_i$ за певного k_{zi} . За $\cos \varphi_i$ визначаємо кут φ_i і, відповідно, $tg \varphi_i$.

Коефіцієнт η_i знаходимо за $\eta_i = f(k_{zi})$ (рис. 1).

За формулою (8) розраховуємо $tg \varphi_{iQ}$ і, відповідно, кут φ_{iQ} .

8. Знаючи кут φ_{iQ} , визначаємо $\cos \varphi_{iQ}$, що й було нашою метою.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Результати

Наведемо чисельний приклад:

1. Вибираємо маневрову лебідку моделі ТЛ–8Б [7].

Її технічна характеристика:

– максимальна кількість вагонів, що пере-
суваються, – 5;

– режим роботи ПВ – 100 %;

– електродвигун – 4 кВт/1440 об/хв;

– напруга – 380 В;

2. Згідно з технічною характеристикою лебідки $m = 5$.

Вважаємо, що всі п'ять вагонів повністю завантажені, тобто $n_i = 0$. Позначимо коефіцієнт завантаження за $n_i = 0$ через k_{30} .

ТАД працює при цьому в номінальному режимі.

Згідно з формулою (2):

$$k_{30} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 0}{84,4 \cdot 5} = 1;$$

$$k_{31} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 1}{84,4 \cdot 5} = 0,86;$$

$$k_{32} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 2}{84,4 \cdot 5} = 0,72;$$

$$k_{33} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 3}{84,4 \cdot 5} = 0,57;$$

$$k_{34} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 4}{84,4 \cdot 5} = 0,43;$$

$$k_{35} = \frac{84,4 \cdot 5 - 70 \cdot 0,86 \cdot 5}{84,4 \cdot 5} = 0,29.$$

3. Вибираємо електродвигун 4A100L4Y3 [3] ($P_{\text{ном}} = 4$ кВт, $n_c = 1500$ об/хв, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,84$, $\eta_{\text{ном}} = 0,84$).

У табл. 2 наведено параметри електродвигуна 4A100L4Y3 для побудови $\cos \varphi_i = f(k_{3i})$ та $\eta = f(k_{3i})$.

Таблиця 2

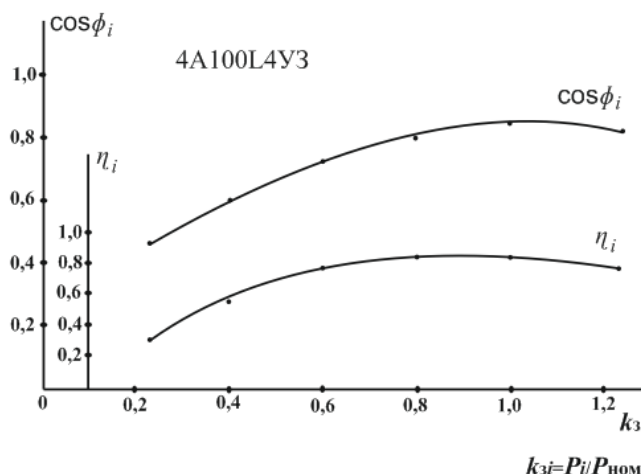
Значення $\cos \varphi_i$ та η_i для електродвигуна 4A100L4Y3

Table 2

Values $\cos \varphi_i$ and η_i for 4A100L4UZ electric engine

$k_{3i} = \frac{P_i}{P_{\text{ном}}}$	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$\cos \varphi_i$	0,46	0,86	0,79	0,84	0,86
η_i	0,3	0,645	0,5	0,84	0,15

4. Згідно з табл. 2 будуємо графіки $\cos \varphi_i = f(k_{3i})$, $\eta = f(k_{3i})$ (рис. 1).

Рис. 1. Залежності $\cos \varphi_i = f(k_{3i})$ та $\eta = f(k_{3i})$ для 4A100L4Y3Fig. 1. Dependencies $\cos \varphi_i = f(k_{3i})$ and $\eta = f(k_{3i})$ for 4A100L4UZ

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

5. Приймаємо, що за $k_{30}=1$ коефіцієнт потужності після приєднання косинусного конденсатора повинен збільшитись від $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,84$ до рекомендованого значення 0,94.

За формулою (5) розраховуємо $Q'_{30} = Q_k$. Спочатку за формулою (6) визначаємо P_{a0} :

$$P_{a0} = \frac{4}{0,84} = 4,76 \text{ кВт.}$$

Кут, косинус якого дорівнює $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,84$, $\varphi_1 = 33^\circ$.

Кут, косинус якого дорівнює рекомендованому 0,94, $\varphi_2 = 20^\circ$.

Тоді:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} 33^\circ = 0,6494,$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} 20^\circ = 0,364.$$

Кути, їх косинуси та тангенси визначають за допомогою таблиць Брадіса або іншим способом.

6. Відповідно до формули (5):

$$Q'_{30} = 4,76(0,6494 - 0,364) = 1,36 \text{ кВАр.}$$

Як один із можливих варіантів вибираємо конденсатор косинусний ZEZ SILKO CSADG 1–0,4/1,5 (1,5 кВАр) [9].

Технічні характеристики обраного конденсатора:

- номінальна напруга 400 В;
- номінальна частота 50/60 Гц;
- номінальний струм 2,2 А;
- потужність 1,5 кВАр;
- ступінь захисту IP20;
- робоча температура: від -50 до $+65$ °С;
- статистична довговічність: 150 000...200 000 год;
- габарити 85x175 мм;
- кількість фаз 3.

Вартість одного конденсатора – 721 грн із ПДВ.

Таким чином, у нашому випадку $Q'_{30} = 1,5$ кВАр.

7. Значення $\operatorname{tg} \varphi_{iQ}$ розраховуємо за формулою (8) для всіх значень k_{3i}

$$\left(\begin{matrix} k_{30}=1; k_{31}=0,86; k_{32}=0,72; k_{33}=0,57; \\ k_{34}=0,43; k_{35}=0,29 \end{matrix} \right).$$

$$\text{У разі } k_{30}=1 \quad \cos \varphi_0 = \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,84;$$

$$\eta_0 = \eta_{\text{ном}} = 0,84; \quad P_{a0} = \frac{4 \cdot 1}{0,84} = 4,76 \text{ кВт;}$$

$$\varphi_0 = 33^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg} 33^\circ = 0,6494;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{0Q} = \frac{4,76 \cdot 0,6494 - 1,5}{4,76} = 0,3343;$$

$$\varphi_{0Q} = 18^\circ 30';$$

$$\cos 18^\circ 30' = 0,9483 \approx 0,95.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_{\text{ном}} = \cos \varphi_0 = 0,84$ (добре) до $\cos \varphi_{0Q} = \cos 18^\circ 30' = 0,9483 \approx 0,95$ (високе).

$$\text{У разі } k_{31}=0,86 \quad \cos \varphi_1 = 0,82 \text{ (рис. 1);}$$

$$\eta_1 = 0,86 \text{ (рис. 1); } P_{a1} = \frac{4 \cdot 0,86}{0,86} = 4 \text{ кВт;}$$

$$\varphi_1 = 35^\circ; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} 35^\circ = 0,7002;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{1Q} = \frac{4 \cdot 0,7002 - 1,5}{4} = 0,3252;$$

$$\varphi_{1Q} = 18^\circ;$$

$$\cos \varphi_{1Q} = \cos 18^\circ = 0,9511 \approx 0,95.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_1 = 0,82$ (добре) до $\cos \varphi_{1Q} = 0,9511 \approx 0,95$ (високе).

$$\text{За } k_{32}=0,72 \quad \cos \varphi_2 = 0,77 \text{ (рис. 1);}$$

$$\eta_2 = 0,82 \text{ (рис. 1); } P_{a2} = \frac{4 \cdot 0,72}{0,86} = 3,51 \text{ кВт;}$$

$$\varphi_2 = 39^\circ 24'; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} 39^\circ 24' = 0,8314;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{2Q} = \frac{3,51 \cdot 0,8314 - 1,5}{3,51} = 0,394;$$

$$\varphi_{2Q} = 21^\circ 30';$$

$$\cos \varphi_{2Q} = \cos 21^\circ 30' = 0,9304.$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_2 = 0,77$ (задовільне) до $\cos \varphi_{2Q} = 0,9304$ (добре, ближче до високе).

За $k_{33} = 0,57$ $\cos \varphi_3 = 0,72$ (рис. 1); $\eta_3 = 0,7$ (рис. 1); $P_{a3} = \frac{4 \cdot 0,57}{0,7} = 3,26$ кВт; $\varphi_3 = 44^\circ$;
 $tg \varphi_3 = tg 44^\circ = 0,9657$;

$$tg \varphi_{3Q} = \frac{3,26 \cdot 0,9657 - 1,5}{3,26} = 0,5056;$$

$$\varphi_{3Q} = 26^\circ 48';$$

$$\cos \varphi_{3Q} = 0,8973.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_3 = 0,72$ (задовільне) до $\cos \varphi_{3Q} = 0,8973$ (добре).

У разі $k_{34} = 0,43$ $\cos \varphi_4 = 0,62$ (рис. 1); $\eta_4 = 0,56$ (рис. 1); $P_{a4} = \frac{4 \cdot 0,43}{0,56} = 3,07$ кВт;
 $\varphi_4 = 52^\circ$; $tg \varphi_4 = tg 52^\circ = 1,2799$;

$$tg \varphi_{4Q} = \frac{3,07 \cdot 1,2799 - 1,5}{3,07} = 0,7913;$$

$$\varphi_{4Q} = 38^\circ 24';$$

$$\cos \varphi_{4Q} = 0,788.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_4 = 0,62$ (низьке) до $\cos \varphi_{4Q} = 0,788$ (задовільне, близьке до добре).

За $k_{35} = 0,29$ $\cos \varphi_5 = 0,51$ (рис. 1); $\eta_5 = 0,38$ (рис. 1); $P_{a5} = \frac{4 \cdot 0,29}{0,38} = 3,05$ кВт; $\varphi_5 = 59^\circ$;
 $tg \varphi_5 = tg 59^\circ = 1,6643$;

$$tg \varphi_{5Q} = \frac{3,05 \cdot 1,6643 - 1,5}{3,05} = 1,1725;$$

$$\varphi_{5Q} = 49^\circ 30';$$

$$\cos \varphi_{5Q} = 0,6561.$$

Після приєднання конденсатора значення коефіцієнта потужності збільшилось від $\cos \varphi_5 = 0,51$ (низьке, майже незадовільне) до $\cos \varphi_{5Q} = 0,6561$ (задовільне).

Результати досліджень для наочності заведено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати досліджень коефіцієнта потужності

Table 3

Results of power factor studies

$k_{3i} = \frac{N_{\text{сеп}} m - N_{\text{сеп},3} k_{\text{сеп},n} n_i}{N_{\text{сеп}} m}$	$k_{30} = 1$	$k_{31} = 0,86$	$k_{32} = 0,72$	$k_{33} = 0,57$	$k_{34} = 0,43$	$k_{35} = 0,29$
$\cos \varphi_i$ (рис. 1)	0,84	0,82	0,77	0,72	0,62	0,51
φ_i	33°	35°	$39^\circ 24'$	44°	52°	59°
η_i (рис. 1)	0,84	0,86	0,82	0,7	0,56	0,38
φ_{iQ}	$18^\circ 30'$	18°	$21^\circ 30'$	$26^\circ 48'$	$38^\circ 24'$	$49^\circ 30'$
$\cos \varphi_{iQ}$	0,95	0,95	0,9304	0,8973	0,788	0,6561,
$\frac{\cos \varphi_{iQ} - \cos \varphi_i}{\cos \varphi_i} \cdot 100 \cdot \%$	13,1	15,85	20,83	24,62	27,1	28,65

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Таким чином, простий і відносно недорогий запропонований нами спосіб (приєднання на постійній основі до ТАД приводу лише одного нерегульованого косинусного конденсатора з реактивною потужністю 1,5 кВАр) збільшує коефіцієнт потужності електроприводу маневрової лебідки моделі ТЛ–8Б від 13,1 % (за $k_{30} = 1$) до 28,65 % (за $k_{35} = 0,29$).

Звернемо увагу, що для деяких моделей маневрових лебідок $\cos \varphi_{\text{ном}} < 0,8$ (як для ТЛ–8Б). Наприклад, для електродвигуна лебідки моделі ЛВ (5,5 кВт, 730 об/хв) [7] як аналог можна взяти електродвигун 4A132M8Y3 [3], для якого $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,74$.

У цьому випадку за $k_{30} = 1$:

$$P_{a0} = \frac{5,5}{0,74} = 7,43 \text{ кВт};$$

кут, косинус якого дорівнює $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,74$, $\varphi_1 = 42^\circ$;

кут, косинус якого дорівнює рекомендованому 0,94, $\varphi_2 = 20^\circ$;

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \operatorname{tg} 42^\circ = 0,6691; \operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg} 20^\circ = 0,364;$$

$$Q'_{30} = 7,43(0,6691 - 0,364) = 2,27 \text{ кВАр}.$$

Як один із варіантів конденсатора можливе підключення до ТАД приводу лебідки косинусного ZEZ SILKO CSADG 1–0,4/3,15 (3,15 кВАр) [9].

Тобто $Q'_{30} = 3,15 \text{ кВАр}$.

При цьому коефіцієнт потужності за $k_{30} = 1$ збільшиться на $\frac{0,94 - 0,74}{0,74} \cdot 100 \% = 27 \%$ проти 13,1 % для лебідки ТЛ–8Б.

Зазначена задача збільшення коефіцієнта потужності електродвигунів маневрових залізничних лебідок зумовлена тим, що під час технологічного процесу із завантаження розвантаження вагонів ТАД приводу значний час працює в недовантаженому режимі. При цьому коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) електродвигуна зменшується порівняно з номінальним режимом. Запропонований спосіб збільшення $\cos \varphi$ електропривода маневрової лебідки по-

лягає в тому, що для досягнення простоти схеми, її надійності та зменшення витрат потужності потрібно безпосередньо до затискачів ТАД приєднати нерегульовану ємність (косинусний конденсатор). Для розрахунку значення реактивної потужності цієї ємності потрібно мати залежності коефіцієнтів потужності та корисної дії від завантаження електродвигуна. Робочі характеристики, у тому числі й вказані залежності, для сучасних трифазних асинхронних двигунів (наприклад, серії АІР) у каталогах, довідниках відсутні. У літературі наведено ряд методик для їх розрахунку, у яких, як правило, використовуються схеми заміщення. Для визначення параметрів схеми заміщення потрібні розрахунки значних обсягів та суттєві експериментальні дослідження.

Запропонована методика базується на використанні як аналога двигунів серії 4А з потужністю та частотою обертання, які вказані в технічних характеристиках маневрових лебідок. Методика не вимагає великих обсягів розрахунків. За вихідні дані виступає інформація, яка наведена в довідниках для електродвигунів серії 4А та в технічних характеристиках маневрових лебідок.

Проведені розрахунки за запропонованим алгоритмом для маневрової лебідки моделі ТЛ–8Б показали, що в разі приєднання до ТАД електропривода лебідки косинусного нерегульованого конденсатора з реактивною потужністю 1,5 кВАр коефіцієнт потужності збільшується на 13,1 % за номінального завантаження і на 28,65 % за мінімального навантаження на валу.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше з урахуванням особливостей технологічного процесу із завантаження розвантаження вагонів запропоновано методику (алгоритм) розрахунку потрібної реактивної потужності нерегульованого косинусного конденсатора, який рекомендовано на постійній основі приєднати до затискачів ТАД електропривода маневрової лебідки для збільшення його коефіцієнта потужності.

Для визначення чисельних значень коефіцієнтів завантаження електродвигуна під час тех-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

нологічного процесу із завантаження-розвантаження вагонів запропонована відповідна формула.

Розроблена методика (алгоритм) та результати проведених досліджень можуть бути використані під час розробки електроприводів нових маневрових лебідок та модернізації наявних із метою збільшення їх коефіцієнтів потужності.

Висновки

Ця робота має чітко виражений прикладний характер. Під час виконання технологічних процесів на залізничному транспорті крім маневрових лебідок, застосовують тисячі одиниць спеціалізованого обладнання. У більшості ви-

падків в електроприводі цього обладнання застосовують трифазні асинхронні двигуни. Наприклад, під час обслуговування та ремонту локомотивів, вагонів та іншого рухомого складу залізниць електроприводи мийних машин, конвеєрів та іншого обладнання, як і електроприводи маневрових лебідок, працюють у недовантаженому режимі тривалий час. Це зменшує їх коефіцієнти потужності, що, як відомо, негативно впливає на показники мережі постачання. Запропонований спосіб збільшення коефіцієнта потужності електроприводів, методика розрахунку реактивної потужності нерегульованої компенсуючої ємності та отримані результати досліджень можуть бути використані і в цих випадках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балійчук О. Ю., Маренич О. Л., Дубинець Л. В. Підвищення коефіцієнту потужності електроприводів нестандартного обладнання підприємств з ремонту рухомого складу залізниць. *Електрифікація транспорту*. 2017. Вип. № 14. С. 31–36.
2. Васьковський Ю. М., Гераскін О. А. Метод. вказ. і контрольні задачі до практичних занять з дисципліни «Електричні машини». Розділ «Асинхронні машини» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка». Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 38 с.
3. Волошко А. В. Метод. вказ. до виконання практичних робіт з дисципліни: «Комплексне керування енерговикористанням» для студентів напряму 6.050701 «Електротехніка та технології» спеціальності «Електротехнічні системи електропостачання», «Енергетичний менеджмент» 7.05007103, 8.05.007103. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 36 с.
4. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М., Козак М. О. Експериментальні дослідження електричних машин. Ч. 3. *Асинхронні машини* : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2007. 197 с.
5. Дубинець Л. В., Карзова О. А., Краснов Р. В., Маренич О. Л., Мельник А. А. Улучшение энергетических показателей предприятий по ремонту подвижного состава. *Гірничі електромеханіка та автоматика*. 2013. Вип. 90. С. 144–150.
6. Загальні відомості про компенсації реактивної потужності. URL : <https://electrocontrol.com.ua/ua/statistixemy-i-spravochnaaya-informaciya/obshhie-svedeniya-o-kompensacii-reaktivnoj-moshhnosti.html>
7. Каталог продукції. Лебедки маневровые. URL : <https://vintalplus.com.ua/catalog>
8. Коефіцієнт потужності. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Коефіцієнт_потужності
9. Конденсатор косинусный ZEZ SILKO CSADG 1-0,4/20N (20 kVAr). URL: <https://electrocontrol.com.ua/kondensatory/kondensator-kosinusnyi-csadg-1-04-20-20-kvar-zez-silko-00010013>
10. Лаврухін О. В., Бауліна Г. С., Костенніков О. М., Богомазовата Г. Є. *Вантажні перевезення на залізничному транспорті* : підручник. Харків : Укр. ДУЗТ, 2015. Ч. 1. 260 с.
11. Маневровые лебедки. URL: <https://airp.com.ua/pto/lebedki/manevrovye>
12. Маренич О. Л., Гацуляк А. В. Деякі шляхи підвищення енергетичних показників електроприводів підприємств з ремонту рухомого складу залізниць. *Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : Тези 79 Міжнародної науково-практичної конференції* (Дніпро, 17-18 вересня, 2020). Дніпро, 2020. С. 57–58.
13. Постнікова М. В., Квітка С. О. *Розрахунок енергетичних показників асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором* : методичні вказівки до практичної роботи. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. 22 с.
14. Типи і розміри залізничних вагонів. URL: <https://cutt.ly/YOXrWIE>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

15. Чорний О. П., Зачепа В. К., Титюк О. А., Чорна О. А. *Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів* : навч. посіб. Кременчук : ЧП Щербатих А. В., 2019. 122 с.
16. *Электродвигатели 4А и 4АМ. Каталог и технические характеристики.*
URL: <https://aipr.com.ua/elektrodvigateli-4a-i-4am/>
17. De Keyser A., Vansompel H., Crevecoeur G. Real-Time energy-efficient actuation of induction motor drives using approximate dynamic programming. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2021. Vol. 68. Iss. 12. P. 11837–11846. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3044791>
18. Khodapanah M., Zobaa A. F., Abbod M. Estimating power factor of induction motors at any loading conditions using support vector regression (SVR). *Electrical Engineering*. 2018. Vol. 100. Iss. 4. P. 2579–2588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0723-7>
19. Kostin M., Mishchenko T., Hoholyuk O. Fryze Reactive Power in Electric Transport Systems with Stochastic Voltages and Currents. *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. (16-19 Sept. 2020). Poland, 2020. P. 1–4.
DOI: <https://doi.org/10.1109/cpee50798.2020.9238672>
20. Lane M., Shaeboub A., Gu F., Ball A. D. Investigation of reductions in motor efficiency and power factor caused by stator faults when operated from an inverter drive under open loop and sensorless vector modes. *Systems Science & Control Engineering*. 2017. Vol. 5. Iss. 1. P. 361–379.
DOI: <https://doi.org/10.1080/21642583.2017.1367734>
21. Wibowo P. M., Haddin M., Marwanto A. Energy saving analysis of air fan motor in power plant boiler controlled by variable frequency drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2021. Vol. 12. Iss. 4. P. 2059–2069. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2059-2069>
22. Xiao H., Chuang H.-C., Yang Z.-H., Lee C.-T. The efficiency improvement of induction motor with constant speed for belt drive mechanism. *Energy Efficiency*. 2021. Vol. 14, No 8.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10009-6>

O. L. MARENYCH^{1*}, O. O. KARZOVA^{2*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ks.marenych@gmail.com, ORCID 0000-0003-3602-5851

^{2*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail karzova@i.ua, ORCID 0000-0003-3607-1188

Power Factor Increase of Electric Drives of Railway Shunting Winches

Purpose. The main purpose of the work is to develop recommendations for increasing the power factor of electric drives of railway shunting winches, taking into account the peculiarities of the technological process at loading and unloading sites. To achieve this purpose, the following tasks were set: to choose a rational way to increase the power factor of the electric drive of shunting winch, taking into account the peculiarities of the technological process, simplicity and reliability of the electrical circuit; develop a methodology (calculation algorithm) to determine the elements of the circuit, which are designed to increase the power factor; conduct research to determine the numerical technical characteristics of these elements, using the developed methodology; assess the power factor increase for the electric drive of some models of winches; formulate recommendations on possible modernization of the electric drive of shunting winches. **Methodology.** An algorithm for calculating the reactive power of an unregulated cosine capacitor, which has to be permanently connected to the terminals of a three-phase induction motor of a shunting winch drive in order to increase the power factor, is developed. **Findings.** Studies have shown that the proposed method of increasing the power factor gives a significant increase in different values of the load factor of the shunting winch motor, while ensuring the simplicity of the scheme and its reliability. **Originality.** For the first time, taking into account the peculiarities of the technology of unloading and loading cars, a method of calculating the required reactive power of an unregulated cosine capacitor, which is connected to the terminals of the drive motor, is proposed. The formula for determining the load factor of the electric motor depending on the ratio of unloaded and loaded cars that move with a winch is proposed. The formula for determining the load factor of the electric motor depending on the ratio of unloaded and loaded cars, which move using a winch is proposed. **Practical value.** The

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

results are of practical value because the obtained numerical values of increasing the power coefficients of the drives of shunting winches and reactive power required for this cosine capacitors can be used as primary information in deciding whether it is advisable to modernize winch drives by connecting to the terminals of three-phase induction motor.

Keywords: power factor; shunting winch; loading factor; cosine capacitor; unloading-loading of cars; energy saving

REFERENCES

1. Baliichuk, O. Yu., Dubynets, L. V., Marenych, O. L., & Lysenko, O. O. (2017). Increasing of the power factor of non-standard equipment of enterprises for repairing the railway rolling-stock. *Electrification of Transport*, 14, 31-36. (in Ukrainian)
2. Vaskovsky, Y. M., & Geraskin, O. A. (2013). *Metodychni vказivky i kontrolni zadachi do praktychnykh zanyat z dyscypliny «Elektrychni mashyny». Rozdil «Asynkronni mashyny» dlya studentiv osvitho-kvalifikacijnogo rivnya «bakalavr» napryamu pidgotovky 6.050702 «Elektromexanika»*. Kyiv: NTUU«KPI». (in Ukrainian)
3. Voloshko, A. V. (2016). *Metodychni vказivky do vykonannya praktychnykh robit z dyscypliny: «Kompleksne keruvannya energovykorystanniam» dlya studentiv napryamu 6.050701 «Elektrotehnika ta tehnologiyi» specialnosti «Elektrotehnichni systemy elektrospozhyvannya», «Energetychnyj menedzhment» 7.05007103, 8.05.007103*. Kyiv: NTUU«KPI». (in Ukrainian)
4. Grabko, V. V., Rozvodyuk, M. P., Levitsky, S. M., & Kozak, M. O. (2007). Eksperymentalni doslidzhennya elektrychnykh mashyn. In *Asynkronni mashyny: navchalnyy posibnyk*. (Vol. 3.). Vinnytsia: VNTU. (in Ukrainian)
5. Dubinets, L. V., Karzova, O. A., Krasnov, R. V., Marenich, O. L., & Melnik, A. A. (2013). Uluchshenie energeticheskikh pokazateley predpriyatiy po remontu podvizhnogo sostava. *Mining Electromechanics and Automation*, 90, 144-150. (in Russian)
6. *Zagalni vidomosti pro kompensaciyi reaktivnoyi potuzhnosti*. Retrieved from <https://electrocontrol.com.ua/ua/stati-sxemy-i-spravochnaya-informaciya/obshhie-svedeniya-o-kompensacii-reaktivnoj-moshhnosti.html> (in Ukrainian)
7. *Catalog. Winch*. Retrieved from <https://vintalplus.com.ua/catalog> (in Russian)
8. *Koefitsiyent potuzhnosti*. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Коефіцієнт_потужності (in Ukrainian)
9. *Kondensator kosinusnyy EZ SILKO CSADG 1-0,4/20N (20 kVAR)*. Retrieved from <https://electrocontrol.com.ua/kondensatory/kondensator-kosinusnyi-csag-1-04-20-20-kvar-zez-silko-00010013> (in Russian)
10. Lavruxin, O. V., Baulina, G. S., Kostyennikov, O. M., & Bogomazovata, G. Ye. *Vantazhni perevezennya na zaliznychnomu transporti: pidruchnyk*. (Vol. 1). Kharkiv: Ukr. DUZT. (in Ukrainian)
11. *Manevrovye lebedki*. Retrieved from <https://aup.com.ua/pto/lebedki/manevrovye> (in Russian)
12. Marenich, O. L., & Gatsulyak, A. V. (2020, September). Dejaki shljakhy pidvyshhennja energhetychnykh pokaznykiv elektropryvodiv pidpryjemstv z remontu rukhomogho skladu zaliznycj. *Abstracts of the 80th International Scientific and Practical Conference «Problems and Prospects of Railway Transport Development»* (pp. 57-58). Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian)
13. Postnikova, M. V., & Kvitka, S. O. (2020). *Rozrakhunok energhetychnykh pokaznykiv asynkronnoho elektrodvyhuna z korotkozamknemym rotorom: metodychni vказivky do praktychnoyi roboty*. Melitopol: TDATU. (in Ukrainian)
14. *Typy i rozmyry zaliznychnykh vagoniv*. Retrieved from <https://cutt.ly/YOXrWIE> (in Ukrainian)
15. Chorny, O. P., Zachepa, V. K., Tityuk, O. A., & Chorna, O. A. (2019). *Monitorynh i diahnostyka elektromekhanichnykh ob'ektiv: navchalnyy posibnyk*. Kremenchug: ChP Shcherbatykh A. V. (in Ukrainian)
16. *Elektrodvigateli 4A i 4AM. Katalog i tekhnicheskie kharakteristiki*. Retrieved from <https://aup.com.ua/elektrodvigateli-4a-i-4am/> (in Ukrainian)
17. De Keyser, A., Vansompel, H., & Crevecoeur, G. (2021). Real-Time Energy-Efficient Actuation of Induction Motor Drives Using Approximate Dynamic Programming. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(12), 11837-11846. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2020.3044791> (in English)
18. Lane, M., Shaeboub, A., Gu, F., & Ball, A. D. (2017). Investigation of reductions in motor efficiency and power factor caused by stator faults when operated from an inverter drive under open loop and sensorless vector modes. *Systems Science & Control Engineering*, 5(1), 361-379. DOI: <https://doi.org/10.1080/21642583.2017.1367734> (in English)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

19. Khodapanah, M., Zobaa, A. F., & Abbod, M. (2018). Estimating power factor of induction motors at any loading conditions using support vector regression (SVR). *Electrical Engineering*, 100(4), 2579-2588.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0723-7> (in English)
20. Kostin, M., Mishchenko, T., & Hoholyuk, O. (2020, September). Fryze Reactive Power in Electric Transport Systems with Stochastic Voltages and Currents. In *2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)* (pp. 1-4). Poland.
DOI: <https://doi.org/10.1109/cpee50798.2020.9238672> (in English)
21. Xiao, H., Chuang, H.-C., Yang, Z.-H., & Lee, C.-T. (2021). The efficiency improvement of induction motor with constant speed for belt drive mechanism. *Energy Efficiency*, 14(8).
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-10009-6> (in English)
22. Wibowo, P. M., Haddin, M., & Marwanto, A. (2021). Energy saving analysis of air fan motor in power plant boiler controlled by variable frequency drive. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 12(4), 2059-2069. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2059-2069> (in English)

Надійшла до редколегії : 02.06.2021

Прийнята до друку: 04.10.2021

УДК 629.423.33:621.336-048.24

Д. В. УСТИМЕНКО^{1*}, АЛЬ САІД АХМАД МОХАММАД АХМАД ДІАБ^{2*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ahmadesraa20@gmail.com, ORCID 0000-0003-4056-1040

Удосконалення методу стендових випробувань ковзних контактів електротранспорту

Мета. Основною метою цієї роботи є комплексне дослідження порядку проведення стендових випробувань сильнотоківового ковзного контакту електротранспорту, що в комплексі створює підґрунтя для розробки рекомендацій щодо вдосконалення стандартного методу проведення таких випробувань. **Методика.** Дослідження ґрунтується на таких класичних наукових методах: перший – це спостереження та обробка результатів реального експерименту в лабораторних умовах; другий – розробка математичної моделі для визначення впливу температури в зоні ковзного контакту на знос контактної провідності, із подальшим визначенням ресурсу цього ковзного контакту. **Результати.** У ході дослідження розроблено перелік рекомендацій щодо порядку проведення та змісту програми-методики стендових випробувань вставок струмоприймачів електротранспорту. На підставі науково обґрунтованих результатів можна стверджувати, що їх упровадження дозволить скоротити часові, енергетичні та інші витрати під час проведення обов'язкових стендових випробувань нових зразків вставок струмоприймачів. **Наукова новизна.** За допомогою неруйнівного контролю температури в місці струмознімання сильнотоківового ковзного контакту, з урахуванням граничного значення температури під час процесу струмознімання, уперше отримано значення сталої часу нагрівання системи «фрагмент вставки – кільце з контактної провідності» для різних типів матеріалів вставок, що дозволяє прогнозувати остаточний результат стендових випробувань як успішний або неуспішний уже на початковій стадії випробувань (перші 10 тис. проходжень диска). На основі статистичної обробки експериментальних даних отримано залежності величини зносу контактної провідності від кількості проходжень випробного стенда, що створює умови для прогнозування щодо еталонного зразка значення зносу контактної провідності під час стендових випробувань. **Практична значимість.** Експериментально доведено, що залежність величини зносу контактної провідності від кількості проходжень диска випробного стенда має лінійний характер, що дозволяє здійснювати прискорені ресурсні випробування елементів сильнотоківового ковзного контакту зі збереженням адекватності отриманих результатів. У цілому комплексне застосування розроблених рекомендацій створює умови для заощадження часових, енергетичних та інших витрат під час проведення стендових випробувань ковзних контактів електротранспорту.

Ключові слова: електротранспорт; сильнотоківовий ковзний контакт; вставка струмоприймача; знос контактної провідності; стендові випробування

Вступ

Як відомо, для системи «пантограф – контактна мережа» основною функцією є передача електричної енергії електрорухомому складу залізниць. У цій системі найбільш відповідальний вузол – це силовий ковзний контакт, утворений контактною вставкою струмоприймача та контактним проводом.

Для підвищення ефективності експлуатації електрифікованих залізниць потрібно вдосконалити наявні та створювати нові пристрої й технології, які б забезпечили надійну й еко-

номну передачу електричної енергії електрорухомому складу [1, 2], а це передбачає зниження зносу контактної провідності та випадків його руйнування, підвищення ресурсу полозів струмоприймачів і зменшення втрат під час процесу струмознімання. У разі впровадження нових типів вставок, проведення періодичних та інших перевірок наявних типів вставок здійснюють комплекс випробувань, зокрема стендових, метою яких є визначення значення зносу контактної провідності після певної кількості проходжень диска випробного стенда.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Основними факторами, що визначають зношення сильноточного ковзного контакту, є [10, 12, 13]:

- окислення металевих елементів пари тертя;
- окислення композиційного елемента пари тертя й ослаблення його міцності;
- посилення адгезії внаслідок дисоціації плівок води чи органічних речовин під дією електричного струму;
- утворення ударних термічних напружень у динамічному контакті через нерівномірність розподілу густини струму в ньому;
- електричне іскріння; дугоутворення і т. ін.

Усі названі фактори можуть діяти одночасно, їх головною причиною є тепловиділення на перехідному контактному опорі. Тому температура зони ковзного контакту може виступати деяким інтегральним показником, що досить точно відображає якість процесу струмознімання, відповідно, її можна використовувати під час порівняння різних типів контактних вставок, а також прогнозування їх ресурсу та ресурсу контактної провідності [12].

Велику увагу приділено тепловому стану ковзного контакту під час стендових випробувань у роботах [4, 15], оскільки питомий електричний опір матеріалу, твердість, коефіцієнт тертя безпосередньо залежать від температури та впливають на величину зносу матеріалу. Автори роботи [15] пов'язують температуру зони контакту з величиною зносу вуглецевих контактних вставок, а також указують на зміну мікроструктури поверхонь, що контактують. Результати [15] корелюються з отриманими результатами в роботі [4] під час експериментального дослідження роботи електричного ковзного контакту.

Таким чином, до наявних методик стендових ресурсних випробувань доцільно ввести контроль за температурою зони контакту.

Для перевірки відповідності контактних вставок пантографа вимогам стандарту ДСТУ ГОСТ 32680:2016 «Струмознімальні елементи контактні струмоприймачів електрорухомого складу. Загальні технічні умови» [3] проводять приймально-здавальні й типові випробування. До програми таких випробувань входять перевірки напруцювань контактних вставок та зносу контактної провідності. Напруцювання контактних вставок до граничного зносу визначають за

результатами експлуатаційних випробувань. Вставки вважають такими, що витримали випробування, якщо вони мають розрахунковий прогноз заміни за граничним зносом не менше ніж: для струмоприймачів легкого типу – $60 \cdot 10^3$ км і більше; для струмоприймачів важкого типу – $25 \cdot 10^3$ км і більше (пункт 5.1.5 ДСТУ ГОСТ 32680:2016) [3]. Перевірку величини зносу контактної провідності проводять на стенді. Методика лабораторних випробувань висуває такі вимоги до стенда: відрізок контактної провідності МФ – 100 закріплюють у вигляді замкнутої кривої на обертовому пристрої, що забезпечує необхідну лінійну швидкість будь-якої точки провідності, а місця стику контактної провідності повинні забезпечувати плавне ковзання по ньому вставки. На стенді встановлюють один напроти одного два однакових фрагменти контактної вставки, які притискаються під час роботи стенда до контактної провідності зусиллям (40 ± 8) Н. Величину зносу контактної провідності вважають допустимою, якщо після 500 тис. обертів обертового пристрою вона не перевищує 2 мм, або 40 мкм на 10 тис. обертів (пункт 8.3.13 ДСТУ ГОСТ 32680:2016) [3].



Рис. 1. Стенд для проведення випробувань із визначення зносу контактної провідності

Fig. 1. Test bench for determining the contact wire wear

Галузева науково-дослідна лабораторія (ГНДЛ) «Надійність та уніфікація електрообладнання рухомого складу залізниць» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна обладнана стендом (рис. 1) із визначення величини зносу контактної провідності [8], що забезпечує дотримання всіх вимог вказаного стандарту. Подібні стенди використовують багато лаборато-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

рій світу під час вивчення властивостей не тільки ковзних, й рознімних контактів, контактів електричних апаратів [5, 9, 13], і здебільшого ці лабораторії обладнані вимірювальною апаратурою для контролю за температурою зони контакту. Під час проведення стендових випробувань автори цієї роботи для контролю температури контакту використовували тепловізор Testo 875 із комплексом програмного забезпечення IrSoft. Вибір тепловізора як вимірювального засобу пояснюється можливістю дистанційно та безконтактно проводити заміри, високою термочутливістю, поєднанням фактичного та інфрачервоного зображень контрольованої поверхні.

Дослідження [6, 11] демонструють результати математичного моделювання зносу контактних пар з урахуванням температури навколишнього середовища. Аналіз показує, що знос значною мірою визначається температурою тіл тертя, що впливає на твердість елементів контактної пари та фактичної площі контакту. Провідна роль електричної складової зносу в підвищенні температури пари тертя показана в [13].

Мета

Основною метою нашого дослідження є розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо вдосконалення стандартного методу стендових випробувань вставок струмоприймачів.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю зменшення часових, енергетичних та інших витрат під час проведення стендових випробувань силових ковзних контактів шляхом упровадження поетапності.

На першому (попередньому) етапі здійснюють контроль температурного стану ковзного контакту та порівнюють отримані значення з показниками еталонного зразка та нормативним значенням температури контактного проводу. Другий (основний, тривалий) етап проводять лише для зразків, які успішно пройшли перший етап. У стандартній методиці випробування проводять без поділу на етапи, що призводить до значних часових, енергетичних та інших витрат, неможливості прогнозування остаточного результату на початковому етапі випробувань.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконати такі завдання:

1. Провести експериментальні стендові дослідження температурного режиму ковзного сильнотоківового контакту.

2. Дослідити вплив кількості проходжень на значення зносу контактного проводу та температуру в зоні контакту.

3. Розробити модель процесу зносу контактного проводу під час стендових випробувань.

4. Надати рекомендації щодо вдосконалення методу стендових випробувань.

Методика

У лабораторних умовах було досліджено понад 10 типів вставок пантографів, ідентифікованих як зразок 1, зразок 2 і т. д. Під час порівняльних випробувань здійснювали контроль за нагріванням контактного проводу та недопущення перевищення максимальної температури згідно з ГОСТ 2584 (95 °C) [2]. Виробники контактного проводу гарантують його якісні показники у разі неперевищення вказаного значення в 95 °C. У випадку перевищення цього значення погіршуються фізико-механічні властивості, зокрема щільність робочої поверхні ковзного контакту, що може призвести до збільшення зносу контактного проводу, тому за такого перевищення випробування зразка вважались неуспішними.

Перший етап випробувань зразків складає 10 тис. обертів диска випробного стенда, при цьому температуру в зоні контакту фіксували щохвилини, це дало змогу отримати динаміку зміни температури від початкового значення до усталеного. Тривалість першого етапу випробувань становить 50 хв.

Скриншот тепловізійної фотографії випробування зразка 1 представлено на рис. 2.

Під час випробувань зразка 1 усталене значення температури системи «вставка – контактний провід» не перевищує значення 45 °C. Процес досягнення усталеного значення є відносно тривалим, залежить від властивостей цього контакту, а тому може бути його своєрідним «паспортом».

На рис. 3 представлено графік зміни в часі температури нагрівання ковзного контакту під час випробувань зразка 1, окремо для лівого та правого тримача фрагмента вставки на стенді. Різниця температури нагрівання лівого та правого фрагментів вставки обумовлена конструк-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

тивними особливостями механізму тримача, що також було зафіксовано під час випробувань інших зразків.

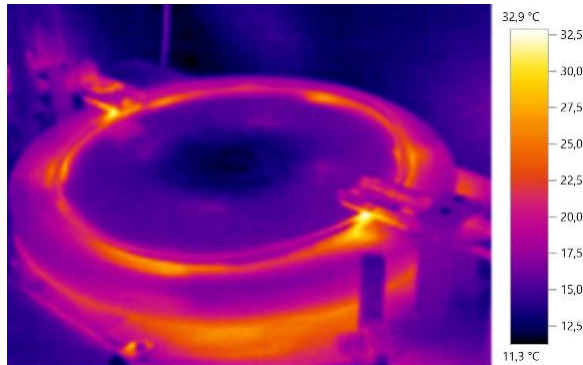


Рис. 2. Скриншот тепловізійної фотографії випробування зразка 1

Fig. 2. Screenshot of thermal imaging photograph of test sample 1

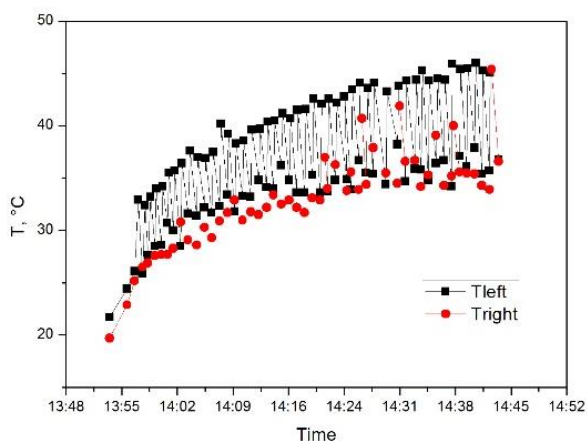


Рис. 3. Графік зміни в часі температури нагрівання ковзного контакту під час випробувань зразка 1 за частоти обертання 205 об./хв та струму 300 А

Fig. 3. Time base graph of the heating temperature change of the sliding contact during the sample 1 tests at a speed of 205 rpm and a current of 300 A.

Аналогічно були експериментально досліджені інші типи вставок.

Як бачимо, процес нагрівання є аперіодичним, тому визначимо сталу часу нагрівання досліджуваної системи «вставка – контактний провід» графічним методом, на прикладі зразка, 1 правий фрагмент вставки (рис. 4).

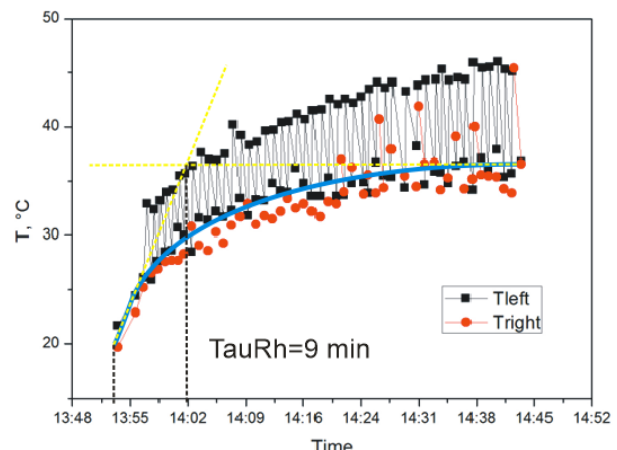


Рис. 4. Визначення сталої часу нагрівання правої (верхні позначки) та лівої (нижні позначки) вставки системи «вставка – контактний провід» під час стендових випробувань зразка 1

Fig. 4. Determination of the heating time constant of the right (upper marks) and left (lower marks) inserts of the system «insert – contact wire» during bench tests of sample 1

Таблиця 1

Значення сталих часу процесу нагрівання системи «вставка – контактний провід» під час стендових випробувань

Table 1

Time constant values of the heating process of the system «insert – contact wire» during bench tests

Номер зразка	1	2	3	4	5	6
Лівий тримач	9 хв	9 хв	10 хв	3 – 4 хв	9 – 10 хв	Не визначено
Правий тримач	9 хв	9 хв	10 хв	3 – 4 хв	9 – 10 хв	Не визначено



Рис. 5. Фотографія зразка 6

Fig. 5. Photograph of the sample 6

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Результати визначення сталої часу для перших шести зразків представлено в табл. 1.

Для вставок зразка 6 (рис. 5) визначення сталої часу неможливе, оскільки випробування були припинені вже через 3 хв, що збігається зі значенням сталої. Спостерігається ефект від роботи типу «мідь по міді», ковзний контакт заклинює.

Результати

Представлений хід досліджень із вдосконалення методу стендових випробувань має всі ознаки закінченого наукового дослідження. Автори й науковці галузевої науково-дослідної лабораторії «Надійність та уніфікація електрообладнання рухомого складу залізниць» провели комплекс випробувань, який містить:

1. Експериментальну частину – випробування ковзного контакту на спеціалізованому стенді. Метою цих випробувань є визначення величини зносу контактного проводу.

2. Установлення факту залежності зносу контактного проводу від температури в зоні сильнострумового ковзного контакту.

3. Безконтактний контроль температури в зоні ковзного контакту та визначення величини зносу контактного проводу з подальшою обробкою результатів за допомогою загально-відомих методів математичної статистики. Отримано аналітичні залежності між температурним режимом у зоні контакту та величиною зносу контактного проводу.

4. Розробку на основі отриманих залежностей зносу контактного проводу та кількості проходжень диска випробного стенда спрощеної ресурсної моделі ковзного контакту електротранспорту, за умови застосування конкретного типу вставок струмоприймачів.

Запропоновані зміни до стандартного методу проведення стендових випробувань не потребують додаткових витрат, збільшення часу та ускладнення процедури, а навпаки, сприятимуть зменшенню витрат як часу, так і енергетичних, та дозволять виробникам підвищити якість накладок за рахунок прискореного вихідного контролю, який доцільно доповнити процедурою стендових випробувань із визначення зносу контактного проводу в обсязі 10 тис. проходжень диска випробного стенда.

Після кожних 10 тис. проходжень випробного диска фіксувались значення зносу контактного проводу, як приклад такі результати для зразка 1 після 20 тис. проходжень представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати замірів зносу контактного проводу під час випробувань фрагмента накладки зразка 1 після 20 тис. проходжень

Table 2

The measurement results of contact wire wear during the tests of the plate fragment of sample 1 after 20 thousand passes

Контрольна точка	Значення зносу, мм
1	0,021
	0,022
	0,022
2	0,015
	0,016
	0,015
3	0,03
	0,028
	0,029
4	0,006
	0,005
	0,006
5	0,012
	0,015
	0,016
6	0,002
	0,001
	0,001

Аналіз замірів зносу контактного проводу для зразка 1 після 20 тис. проходжень (табл. 2) та інших зразків під час проведення стендових випробувань вказує на те, що вони мають нерівномірний, стохастичний, імовірнісний характер, а тому потрібно досліджувати залежності зносу контактного проводу від кількості обертів (проходжень) диска випробного стенда або інших показників.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Представимо результати замірів зносу контактної провуду під час випробувань зразка 1 у вигляді гістограми (рис. 6).

Визначати закон розподілу досліджуваної величини зносу контактної провуду немає сенсу, оскільки в остаточному підсумку потрібні тільки числові значення, які описують найбільш суттєві характеристики цього розподілу. Такою характеристикою, у нашому випадку, може бути математичне очікування.

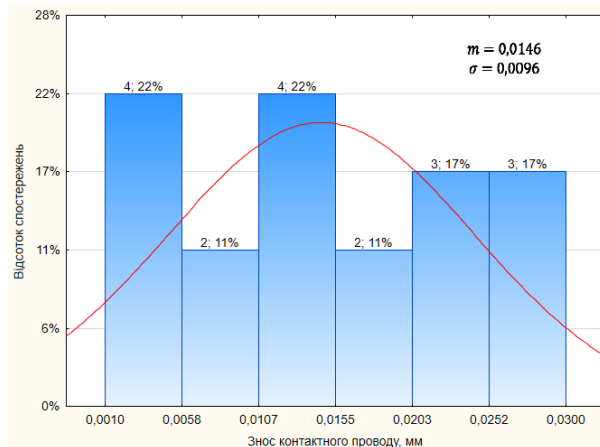


Рис. 6. Гістограма розподілу зносу контактної провуду під час випробувань накладок зразка 1 (після 20 тис. обертів)

Fig. 6. Histogram of the contact wire wear distribution during the tests of the plates of sample 1 (after 20 thousand revolutions)

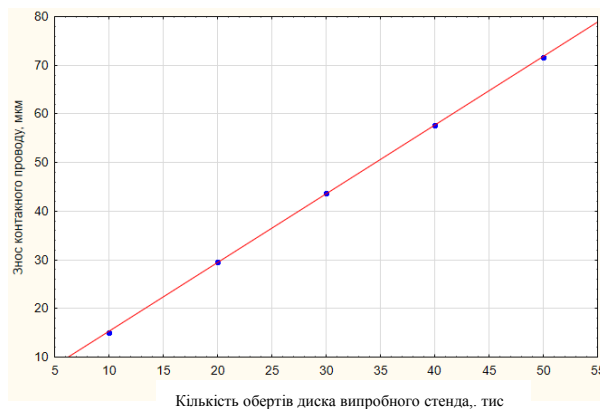


Рис. 7. Залежність значень математичного очікування величини зносу контактної провуду під час випробувань накладок першого типу від кількості проходжень диска стенда

Fig. 7. Dependence of mathematical expectation values of contact wire wear during the test of the first type plates on the number of test bench disk passes

Як відомо, за достатньої кількості вимірів середнє значення випадкової величини наближається за вірогідністю до свого математичного очікування (m) і тому під час практичних розрахунків може бути взято як розрахункове.

За отриманими значеннями математичного очікування величини зносу контактної провуду побудуємо залежність між величиною зносу $\Delta_{\text{КП}}$ та кількістю проходжень диска випробного стенда $n_{\text{диск}}$ (рис. 7).

Експериментальні точки позначені на рис. 7 синім кольором, а червоним – запропонована апроксимаційна залежність виду $y(x)=c+k(x)$.

Рівняння апроксимації буде мати вигляд:

$$\Delta_{\text{КП}}(n_{\text{диск}}) = 1,13 + 1,413 \cdot n_{\text{диск}},$$

де $n_{\text{диск}}$ – кількість обертів диска випробного стенда, тис.

Отримане співвідношення і є моделлю зносу контактної провуду під час проведення стендових випробувань.

Адекватність отриманого співвідношення методом апроксимації аналітичного виразу та вихідних даних доведена методом найменших квадратів – коефіцієнтом найменших квадратів на рівні 0,999 (повна відповідність).

За допомогою аналітичного виразу моделі зносу контактної провуду під час випробувань можна оцінювати нормативні показники, наприклад, за 500 тис. проходжень диска.

Так, після 500 тис. обертів використання накладок першого типу дає знос контактної провуду на рівні:

$$\Delta_{\text{КП}}(n_{\text{диск}}) = 1,13 + 1,413 \cdot 500 = 707 \text{ мкм.}$$

Для перевірки адекватності отриманої моделі зносу контактної провуду було проведено повний цикл випробувань в обсязі 500 тис. обертів для зразків вставок першого типу. Отримане експериментальне значення склало 723 мкм.

Різниця між очікуваним за моделлю зносом контактної провуду та його експериментальним значенням складатиме:

$$\frac{723 - 707}{707} \cdot 100\% = 2,3\%$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Отримане значення вказує на повну адекватність математичної моделі зносу контактного проводу процесу його зносу під час випробувань зразків вставок першого типу.

Аналогічно були опрацьовані експериментальні дані для вставок другого та третього типів. Представимо апроксимовані залежності для всіх трьох типів вставок в одній координатній площині (рис. 7).

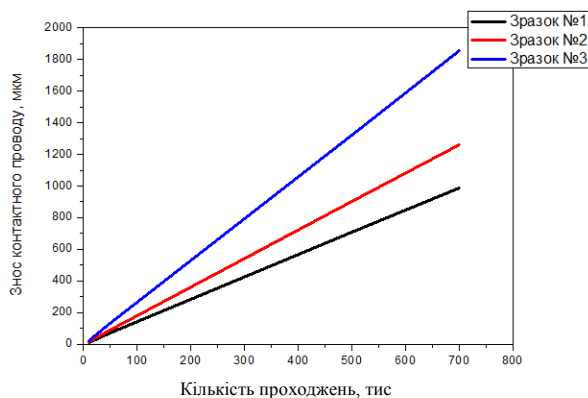


Рис. 8. Результати моделювання процесу зносу контактної провідності на випробному стенді

Fig. 8. The results of modeling the process of the contact wire wear on the test bench

Наукова новизна та практична значимість

До основних наукових результатів, отриманих авторами дослідження, слід віднести такі:

1. На основі статистичної обробки експериментальних даних уперше отримано залежності величини зносу контактної провідності від кількості проходжень випробного стенда, що створює умови для прогнозування щодо еталонного зразка значення зносу контактної провідності під час стендових випробувань.

2. За допомогою неруйнівного контролю температури в місці струмознімання сильнотривового ковзного контакту, з урахуванням граничного значення температури під час процесу струмознімання, уперше отримано значення сталої часу нагрівання системи «фрагмент вставки – кільце з контактної провідності» для різних типів матеріалів вставок, що дозволяє прогнозувати остаточний результат стендових випробувань як успішний або неуспішний уже

на початковій стадії (перші 10 тис. проходжень диска).

3. Експериментально доведено, що залежність величини зносу контактної провідності від кількості проходжень диска випробного стенда має лінійний характер, що дозволяє здійснювати прискорені ресурсні випробування елементів сильнотривового ковзного контакту зі збереженням адекватності отриманих результатів.

Удосконалення стандартизованого методу стендових випробувань полягає в додатковому контролі теплового стану ковзного сильнотривового контакту за допомогою безконтактних технологій.

Висновки

Результатом проведення комплексного дослідження процесу зносу контактної провідності під час стендових випробувань вставок струмоприймачів електротранспорту є такі науково обґрунтовані рекомендації:

По-перше, здійснювати моніторинг значення температури в місці контакту за допомогою неруйнівних методів, зокрема з використанням тепловізорів або пірометрів.

По-друге, встановити максимально допустиме значення температури на рівні 95 °C, що обумовлено властивостями контактної провідності. У разі перевищення нормативного значення температури створюються умови для зміни фізико-механічних властивостей контактної провідності, а тому результати випробувань будуть сумнівними з точки зору значення його зносу.

По-третє, випробування доцільно проводити в два етапи: перший – попередні, другий – основні випробування. Під час попередніх випробувань здійснювати постійний моніторинг температури в зоні контакту через рівні проміжки часу, рекомендовано встановити проміжок в одну хвилину. За даними моніторингу температури визначити сталу часу нагрівання та порівняти її з аналогічним показником еталонного зразка накладки. Як еталонний зразок пропонується використовувати зразок 1. Крім того, у випадку перевищення температури 95 °C в зоні контакту подальші випробування зразків проводити недоцільно, тобто зразок не допускають до другого етапу випробувань. Зразки, під час випробування яких перевищення температури не фіксувалось, допускають до другого

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

етапу випробувань, що дозволить скоротити витрати часу, енергетичних та інших ресурсів.

По-четверте, встановити тривалість першого етапу випробувань 10 тис. обертів, а другого – від 10 тис. до нормативних 500 тис. обертів диска стенда.

По-п'яте, встановити кількість замірів зносу контактного проводу не менше трьох, у кожній з експериментальних точок, із подальшим визначенням середнього значення, яке і слід порівнювати з нормативним. Доцільність такого підходу обґрунтована відповідністю процесу зносу контактного проводу нормальному закону, що було доведено під час дисертаційного дослідження одного з авторів.

Виконання зазначених рекомендацій дозволить підвищити ефективність стендових випробувань у першу чергу за рахунок можливого зменшення часу на їх проведення.

Наприклад, якщо на першому етапі випробувань (10 тис. проходжень диска) встановлено, що подальші випробування зразків вставок у повному обсязі (500 тис. проходжень диска) є недоцільними через перевищення температури або підвищений знос контактної проводу,

тоді економія фонду часу на випробування складатиме: $\frac{500-10}{500} \cdot 100\% = 98\%$.

Відповідні матеріальні витрати на оплату праці персоналу, витрати на електроенергію, утримання обладнання також складають 98 %. Таким чином, виконання запропонованих рекомендацій підвищує ефективність за рахунок вилучення зайвих витрат під час проведення потенційно невдалих випробувань, доцільність проведення яких у повному обсязі є сумнівною.

Другим фактором, який дозволяє підвищити ефективність стендових випробувань, є безконтактний контроль температури в зоні сильнотривового контакту. Ця особливість особливо цінна для виробників вставок, оскільки допомагає, контролюючи температурні режими, вже на першому етапі випробувань визначати ті зразки, які можуть отримати максимально якісні показники струмознімання, тобто з'являється можливість створення новітніх матеріалів, композицій матеріалів на підставі порівняльного аналізу показників для відносно малих зразків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Большаков Ю. Л., Антонов А. В. Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка». *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 6 (60). С. 35–44.
2. ГОСТ 2584-86. Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия. [Действует от 1988-01-01]. Москва : ИПК изд. стандартов, 1998. 9 с.
3. ДСТУ ГОСТ 32680:2016. Струмознімальні елементи контактні струмоприймачів електрорухомого складу. Загальні технічні умови (ГОСТ 32680-2014, IDT). [Чинний від 2016-10-01]. 2016. 16 с.
4. Паранин А. В., Акиньшин Н. А., Батрашов А. Б. Экспериментальное исследование работы электрического контакта «контактный провод – токосъемная пластина» в статическом положении. *Транспорт Урала*. 2013. Вып. 4 (39). С. 93–96.
5. Сидоров О. А., Ступаков С. А. Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токосъема с жестким токопроводом : монография. Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. 174 с.
6. Сидоров О. А., Филиппов В. М., Ступаков С. А. Исследования электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта. *Трение и износ*. 2015. Т. 36, № 5. С. 511–517.
7. Устименко Д. В. Сучасний стан проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях. *Електрифікація транспорту*. 2016. № 12. С. 71–75.
8. Устименко Д. В. Установка для экспериментального дослідження зносу ковзного контакту «контактний провід – накладка». *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2017. № 14. С. 29–32.
9. Grandin M., Wiklund U. Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. *Tribology International*. 2018. Vol. 121. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

10. Janahmadov A. K., Javadov M. Y. *Synergetics and fractals in tribology*. Springer, 2016. 381 p.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28189-6>
11. Shimanovsky A. O., Kapliuk I. I. Finite Element Modeling of the Locomotive Pantograph – Contact Wire Interaction. *«MECHANIKA 2018»*. 2018. P. 145–149.
12. Ustyomenko D. V. Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip». *Science and Transport Progress*. 2018. № 3 (75). P. 78–86.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/133323>
13. Wu G., Wei W., Gao G., Wu J., Zhou Y. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*. 2016. № 24. P. 132–138.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0099-1>
14. Wu G., Wu J., Wei W., Zhou Y., Yang Z., Gao G. Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph/Contact Wire Systems in Electric Railways. *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 1. P. 1–17.
DOI: <http://doi.org/10.3390/en11010017>
15. Xuan G., Wenzheng L., Zhongping Y., Yifei W. The study on electrical temperature characteristics of high speed pantograph. *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. 2014. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941014>

D.V. USTYMENKO^{1*}, AL SAID AHMAD MOHAMMAD AHMAD DIAB^{2*}

^{1*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustymenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{2*}Dep. «Electric Engineering and Electromechanics», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ahmadesraa20@gmail.com, ORCID 0000-0003-4056-1040

Improving the Bench Testing Method of Sliding Contacts of Electric Transport

Purpose. The work is aimed to present the results of a comprehensive study of the bench testing procedure of high-current sliding contact of electric transport, which together provide a basis for proposals, recommendations for improving the standard method of these tests. **Methodology.** The research is based on two classical methods of scientific research. The first one is the observation and processing of the results of a real experiment in the laboratory; the second is the development of mathematical model for determining the temperature effect in the area of sliding contact on the wear of the contact wire, with subsequent determination of the resource of this sliding contact. **Findings.** The result of these studies is a list of recommendations on the procedure and content of the program-methodology of bench tests of inserts of current collectors of electric transports. The obtained scientifically substantiated results will allow to assert that their introduction will reduce time, energy and other expenses for performing obligatory bench tests of new samples of current collector inserts. **Originality.** By means of non-destructive temperature control at the point of current collection of high-current sliding contact, taking into account the temperature limit value during current collection process, for the first time the values of the heating time constant of the «insert fragment – contact wire ring» were obtained for different insert materials. This makes it possible to predict the final result of bench tests as successful or unsuccessful already at the initial testing stage (the first 10 thousand disk passes). Based on statistical processing of experimental data, the dependences of the contact wire wear on the number of test bench passes were obtained, which creates conditions for forecasting the value of contact wire wear during bench tests relative to the reference sample. **Practical value.** It is experimentally proved that the dependence of the contact wire wear on the number of passes of the test bench disk is linear, which allows accelerated resource testing of high-current sliding contact elements while maintaining the adequacy of the results. In general, the comprehensive application of the received recommendations creates conditions for saving time, energy and other costs when conducting bench tests of sliding contacts of electric transport.

Keywords: electric transport; high-current sliding contact; current collector insert; contact wire wear; bench tests

REFERENCES

1. Bolshakov, Y. L., & Antonov, A. V. (2015). Investigation of properties of current collector elements and their effect on the performance of tribosystem «contact wire–current collector element». *Science and Transport Progress*, 6(60), 35-44. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57006> (in Ukrainian)
2. *Provoda kontaktnye iz medi i ee splavov. Tekhnicheskie usloviya*, 9 GOST 2584-86. (1986). (in Russian).
3. *Strumoznimaljni elementy kontaktni strumopryjmachiv elektrorukhomogho skladu. Zaghaljni tekhnichni umovy (GhOST 32680-2014, IDT), 16 DSTU GhOST 32680:2016*. (2016). (in Ukrainian)
4. Paragin, A. V., Akinshin, N. A., & Batrashov, A. B. (2013). Eksperimentalnoe issledovanie raboty elektricheskogo kontakta «kontaktnyy provod – tokos'emnaya plastina» v staticheskom polozhenii. *Transport Urala*, 4(39), 93-96. (in Russian)
5. Sidorov, O. A., & Stupakov, S. A. (2012). *Issledovanie i prognozirovaniye iznosa kontaktnykh par sistem tokosema s zhestkim tokoprovodom: monografiya*. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». (in Russian)
6. Sidorov, O. A., Filippov, V. M., & Stupakov, S. A. (2015). Issledovaniya elektromekhanicheskogo iznashivaniya kontaktnykh par ustroystv tokosema elektricheskogo transporta. *Trenie i iznos*, 36(5), 511-517. (in Russian)
7. Ustymenko, D. V. (2016). Current state of the problem on current collection of electrified railways. *Electrification of transport*, 12, 71-75. (in Ukrainian)
8. Ustymenko, D. V. (2018). Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip». *Nauka ta prohres transportu. Science and Transport Progress*, 3(75), 78-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/133323> (in English)
9. Grandin, M., & Wiklund, U. (2018). Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. *Tribology International*, 121, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004> (in English)
10. Janahmadov, A. K., & Javadov, M. Y. (2016). *Synergetics and fractals in tribology*. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28189-6> (in English)
11. Shimanovsky, A. O., & Kapliuk, I. I. (2018). Finite Element Modeling of the Locomotive Pantograph- Contact Wire Interaction. *MECHANIKA 2018*, 145-149. (in English)
12. Ustymenko, D. V. (2017). Ustanovka dlia eksperymentalnoho doslidzhennia znosu kovznoho kontaktu «kontaktnyi provod – nakladka». *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, 14, 29-32. (in Ukrainian)
13. Wu G., Wei W., Gao G., Wu J., & Zhou Y. (2016). Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*, 24(2), 132-138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0099-1> (in English)
14. Wu, G., Wu, J., Wei, W., Zhou, Y., Yang, Z., & Gao, G. (2018). Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph/Contact Wire Systems in Electric Railways. *Energies*, 11(1), 17. DOI: <http://doi.org/10.3390/en11010017> (in English)
15. Xuan, G., Wenzheng, L., Zhongping, Y., & Yifei, W. (2014). The study on electrical temperature characteristics of high-speed pantograph. In *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)* (pp. 1-4). DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941014>. (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 01.10.2021

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.4

Д. С. АСТАХОВ^{1*}, Н. О. ЛИСЕНКО^{2*}, В. Б. МАЗУРЕНКО^{3*}, А. І. ФЕДОРОВИЧ^{4*}

^{1*}Каф. «Радіoeлектронна автоматика», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта astakhov.ds@gmail.com, ORCID 0000-0002-8636-1776

^{2*}Каф. «Радіoeлектронна автоматика», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта LysenkoNA@ukr.net, ORCID 0000-0001-6865-6207

^{3*}Каф. «Радіoeлектронна автоматика», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта mazurenko_v@yahoo.com, ORCID 0000-0001-8340-012X

^{4*}Каф. «Радіoeлектронна автоматика», Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта sonya.sokolovskaya@gmail.com, ORCID 0000-0003-0752-7190

Аналіз сучасного антивірусного програмного забезпечення в задачах кібербезпеки

Мета. Наше дослідження спрямовано на отримання узагальнених знань щодо сучасного антивірусного програмного забезпечення (ПЗ), яке як є один із аспектів кібербезпеки є об'єктом постійних дискусій щодо доцільності його використання. **Методика.** Для отримання даних автори провели огляд світової літератури з теми роботи з використанням повнотекстових і реферативних баз даних. Розглянуто сигнатурні та евристичні методи роботи антивірусного програмного забезпечення, а також умовний поділ цих продуктів на: програми-детектори, програми-лікарі, програми-ревізори, програми-фільтри, програми-імунізatori. **Результати.** Контент-аналіз публікацій із проблем антивірусного програмного забезпечення доводить численність досліджуваних аспектів, зокрема щодо спроможності такого програмного забезпечення не тільки розпізнавати загрозу, але й бути здатним знищити її. Для виконання цього завдання антивірус повинен мати такі функції: регулярне (або в режимі реального часу) сканування системних файлів і програм; сканування вмісту месенджерів та електронної пошти; повне сканування комп'ютера за командою користувача; моніторинг вхідного та вихідного мережевого трафіка; усунення наслідків роботи шкідливого ПЗ. Крім того, порівняльний аналіз найбільш популярного антивірусного ПЗ дає можливість виявити недоліки та переваги кожного з них. **Наукова новизна.** Набув подальшого розвитку системний та узагальнювальний аналіз наявного та найбільш поширеного антивірусного програмного забезпечення, що надає можливість звичайним користувачам усвідомлено роботи вибір щодо встановлення таких програмних пакетів. **Практична значимість.** Отримані результати щодо можливостей наявного ПЗ дають змогу коригувати безпеку роботи в інтернет-мережі. Крім того, викладене розвіює міфи, поширювачі яких, пропонують користувачам узагалі не захищати свої комп'ютери від шкідливого програмного забезпечення. Наше дослідження також може бути корисним під час вивчення дисципліни «Основи тестування програмного забезпечення», організації науково-практичних семінарів, курсів підвищення кваліфікації тощо.

Ключові слова: програмне забезпечення (ПЗ); інформаційна загроза; антивірус; сингулярний метод; евристичний метод

Вступ

У процесі розвитку людства постійно відбувалися різні політичні та економічні процеси, безліч воєн і конфліктів. І в сучасному світі цей

процес не припиняється ні на мить. Сьогодні набагато рідше можна побачити відкрите протистояння якихось країн чи корпорацій, але їх боротьба проходить на інформаційному фронті щодня. І ця боротьба – це не лише боротьба за

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

людську лояльність, а й протистояння, приховане від очей звичайних людей, із метою отримати перевагу над супротивником. Про це свідчать нові й нові повідомлення про злами великих компаній або відомств цілих країн [9].

Комп'ютер може зберігати та обробляти достатньо велику кількість інформації, яка в наш час є одним із найдорожчих ресурсів. У міру розвитку та модернізації комп'ютерних систем і програмного забезпечення зростає обсяг і підвищується вразливість даних, що зберігаються в них. Сьогодні можна з упевненістю констатувати, що комп'ютерні віруси залишаються однією з найпоширеніших причин спотворення та знищення життєво важливої інформації, що може призвести до фінансових та часових втрат. За даними [6], зростає частка заражень шкідливим програмним забезпеченням. Три чверті атак на юридичних осіб та 62 % атак на приватних осіб супроводжувалися зараженнями шкідливим програмним забезпеченням.

Таким чином, актуальність поставленої проблеми визначається як її теоретичним, так і прикладним значенням.

Мета

Щодня з'являються нові й нові загрози. Однією з таких загроз є шкідливе програмне забезпечення (далі ПЗ). На противагу йому прогрес у сфері захисту інформації сприяє постійному розвитку та вдосконаленню антивірусного ПЗ. Наше дослідження спрямовано на отримання узагальнених знань щодо сучасного антивірусного програмного забезпечення, як один з аспектів кібербезпеки є об'єктом постійних дискусій щодо доцільності його використання.

Методика

Для отримання необхідних даних автори провели огляд світової літератури з теми дослідження із використанням повнотекстових і реферативних баз даних. Таким чином, теоретичною базою дослідження стали наукові статті, що висвітлюють: 1) питання доцільності використання антивірусного ПЗ; 2) досвід у впровадженні антивірусних програм та їх перевага й недоліки.

Не існує єдиної системи класифікації та найменування вірусів (хоча спроба створити стандарт була зроблена на зустрічі CARO 1991 року).

Прийнято поділяти віруси за:

1) об'єктами, що уражаються (файлові віруси, завантажувальні віруси, протиантивірусні віруси, скриптові віруси, макровіруси, мережеві черв'яки);

2) способом зараження (перезаписувальні віруси, віруси-компаньйони, файлові черв'яки, віруси-ланки, паразитичні віруси, віруси, що вражають вихідний код програм);

3) операційними системами та платформами, що уражаються (DOS, Microsoft Windows, Unix, Linux та інші);

4) активністю (резидентні віруси, нерезидентні віруси);

5) технологіями, які застосовують віруси (нешифровані/шифровані віруси, поліморфні віруси, стелс-віруси (руткіт та буткіт));

6) деструктивними можливостями (нешкідливі віруси, безпечні віруси, небезпечні віруси, дуже небезпечні віруси);

7) мовою, якою написаний вірус (асемблер, мова програмування високого рівня, скриптова мова, інші).

Існує безліч методів виявлення вірусів, до основних слід віднести сигнатурні та евристичні.

Сигнатурні методи – це точні методи виявлення вірусів, основою яких є порівняння файла зі зразком вірусу. Суть сигнатурного аналізу полягає у виявленні елементів, характерних для шкідливого ПЗ, у файлах, які сканують. Такий метод не придатний для захисту від нових вірусів, оскільки їх сигнатури ще виділено [8].

Евристичні методи – це приблизні методи виявлення шкідливого ПЗ, що дозволяють, із певною часткою ймовірності, зробити припущення, що файл заражений. Евристичний аналіз заснований на припущенні про схожість нових вірусів на якийсь із раніше виявлених. Виявлення сигнатур за такого методу є приблизним, що робить його більш універсальним, але менш точним [8].

Усе антивірусне програмне забезпечення можна умовно поділити на такі види:

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

– програми-детектори здійснюють пошук сигнатури вірусу (послідовності байтів характерної для конкретного вірусу) в оперативній пам'яті та файлах системи, результатом роботи такої програми буде відповідне повідомлення;

– програми-лікарі знаходять заражені вірусами файли та проводять «лікування», що полягає у видаленні з файла тіла програми вірусу, повертаючи файли у вихідний стан. Окремим видом є поліфаги – програми-лікарі, призначені для великої кількості вірусів;

– програми-ревізори запам'ятовують вихідний стан програм, каталогів та системних областей диска, а потім, із певною періодичністю або за командою користувача, порівнюють поточний стан із вихідним [3];

– програми-фільтри, також відомі як «сторожа», є невеликими резидентними програмами, призначеними для виявлення потенційно небезпечної активності, яка може бути шкідливим ПЗ. У разі виявлення такої активності «сторож» тимчасово блокує джерело загрози, пропонуючи користувачеві вибрати відповідну дію;

– програми-імунізатори запобігають зараженню файлів шляхом модифікації програми або розділу диска таким чином, щоб це не позначалося на їхній роботі, це робить такі файли невразливими для шкідливого ПЗ, що працює за принципом ідемпотентності. Цей факт обмежує можливості застосування такого виду антивірусного ПЗ [7].

Сьогодні на ринку ПЗ представлено багато різних продуктів, що також включають антивіруси. Таке ПЗ відрізняється як вендорами, а і функціоналом. Більшість програмних продуктів представлені у двох варіантах – платному та безкоштовному. Під час вибору антивірусу слід керуватися в першу чергу необхідним функціоналом, який у платних версіях набагато ширше представлений, а безкоштовної версії антивірусу буде достатньо для мінімального рівня захисту.

Як правило, платні антивіруси відрізняються від безкоштовних такими перевагами:

– пісочниця, що є ізольованим середовищем для запуску підозрілих програм, дозволяє частково відокремити головну операційну систему від виконуваної програми;

– батьківський контроль, що дозволяє обмежити функціонал ПК як загалом, так і окремих програм, таким чином, наприклад, убезпечивши використання ПК дитиною, що впливає із самої назви функції;

– функція перевірки та очищення системи, що дозволяє підтримувати стан ПК на оптимальному рівні;

– контроль мережі Wi-Fi – функція для фільтрації вхідного потоку даних з інтернету;

– захист від спаму, що дозволяє обмежити користувача від небажаних повідомлень та/або повідомлень.

Результати

Наведемо порівняльний аналіз найбільш популярних антивірусних програм, який містить інформацію про переваги та недоліки кожного із зазначених пакетів:

1. Kaspersky. Серед його переваг: 1) можливість використовувати з некомерційною метою повністю безкоштовний антивірус; 2) відмінні показники захисту системи в тестах незалежних лабораторій; 3) повноцінне використання антивірусної бази у безкоштовній версії; 4) зручні підписки на платні версії з підтримкою кількох пристроїв. До недоліків належать: 1) немає повноцінної технічної підтримки для користувачів Kaspersky Free; 2) обмежена функціональність у безкоштовній версії [6].

2. McAfee – це потужні інструменти та високий рівень безпеки. Серед його переваг: 1) доступність на всіх пристроях: комп'ютерах з Windows та MacOS, смартфонах з Android та iOS; 2) 30-денна пробна версія на передплату з 10 пристроями; 3) багата колекція додаткових функцій безпеки: фаєрвол, сканер вразливостей, файловий шредер, видалення тимчасових та непотрібних даних; 4) підписка McAfee LiveSafe з необмеженою кількістю пристроїв. Серед недоліків: 1) суперечливі результати в тестах незалежних лабораторій; 2) немає тривалих підписок.

3. Захистник Windows – вбудований антивірус від Microsoft. Серед його переваг: 1) за замовчуванням вбудований у всі версії Windows 10, не потребує додаткового налаштування; 2) пропонує прості, але

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ефективні інструменти захисту від вірусів-шифрувальників; 3) глибока інтеграція із системою дозволяє отримати доступ до інших функцій безпеки Windows; 4) завжди захищає систему, якщо вимкнути його навмисно або встановити сторонній антивірус. До недоліків належать: 1) ускладнена процедура примусового вимкнення лише через редагування параметрів у системному реєстрі; 2) слабкий захист від малонебезпечних програм, які можуть зашкодити системі; 3) проблеми з визначенням фішингових сайтів; 4) погані результати у виявленні шкідливих посилань.

4. ESET NOD32 – антивірус для особистого та корпоративного використання. Серед його переваг: 1) відмінні результати в тестах незалежних організацій; 2) безкоштовні пробні версії антивірусу для всіх пристроїв; 3) відмінне поєднання вартості та функціональності; 4) висока швидкість сканування системи. До недоліків належать: 1) слабкі показники в тестах захисту від фішингових атак; 2) складний інтерфейс контролю під час купівлі передплати на кілька пристроїв.

5. Bitdefender – якісний та безкоштовний антивірус. Серед його переваг: 1) використання у безкоштовній та платній версіях однакових технологій захисту; 2) відмінні показники захисту в тестах незалежних експертів; 3) можливість користуватися лише безкоштовною версією; 4) оптимізація в разі повторного сканування – час перевірки зменшується у кілька разів. До недоліків належать: 1) немає додаткових інструментів безпеки, доступних в інших комерційних антивірусах; 2) у безкоштовній версії не розпізнаються окремі небезпеки; 3) у безкоштовній версії немає файлового шредера та захисту від програм-вимагачів [10].

6. Sucuri – платформа для перевірки вебсайтів на віруси. Серед його переваг: 1) високий рівень захисту сайтів від зламу, потрапляння в чорний список Google та впровадження шкідливого коду; 2) боротьба з фішингом та SEO-спамом; 3) захист від DDoS, використання CDN, підтримка SSL-сертифікатів; 4) відновлення сайту після зламування в разі купівлі тарифу Pro або

Business. Серед недоліків: 1) підходить тільки для веб-сайтів, не захищає операційні системи; 2) досить обмежена безкоштовна версія; 3) висока вартість тарифів, проте гарантія повернення коштів діє 30 днів [4].

7. Dr.Web – флагманський продукт компанії «Доктор Веб». Серед його переваг: 1) тестовий період на 3 місяці під час реєстрації на сайті антивірусу; 2) додатковий інструмент захисту від «атак нульового дня», який не конфліктує з іншими антивірусами; 3) використання хмарної системи моніторингу для швидкого реагування на небезпеку; 4) розширені функції забезпечення приватності: захист від несанкціонованого під'єднання до вебкамери та мікрофона, блокування шпигунських програм. До недоліків належать: 1) зниження швидкості завантаження файлів через їх постійні перевірки антивірусом; 2) поділ сигнатурної та несигнатурної частини на два окремі продукти з порівнянною вартістю підписки; 3) підтримка лише одного пристрою у всіх ліцензіях; 4) розробники проти участі їх продукту в тестах у сторонніх лабораторіях, тому складно знайти незалежні відомості про роботу антивірусу.

8. Avast – популярний безкоштовний антивірус. Серед його переваг: 1) підтримка пасивного режиму захисту, що дозволяє використовувати Avast у зв'язці з іншими антивірусами та запускати його лише для сканування системи; 2) високі бали в лабораторних тестах на різні типи загроз та продуктивність; 3) захист покупок від підроблених сайтів відомих компаній; 4) розширені інструменти захисту від шкідливих програм: перевірка на мережному рівні після завершення завантаження та перед запуском файла; 5) відмінний захист від атак фішингу. До недоліків належать: 1) безкоштовно доступні лише основні можливості. За додаткові інструменти та підтримку потрібно платити, але користувач дізнається про це лише після встановлення антивірусу; 2) автоматичне встановлення «Панелі інструментів Google» у всі браузері, від якої потрібно вручну відмовлятися в разі інсталяції антивірусу [4].

9. Norton Security – один із найстаріших та перевірених антивірусів. Серед його переваг:

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

1) мультиплатформність – доступний на PC, Mac, мобільних пристроях з Android та iOS; 2) гарантія видалення вірусів із поверненням грошей за ліцензію, якщо система була заражена; 3) вбудований брандмауер, який контролює вхідний та вихідний трафік; 4) автоматичне резервне копіювання важливих файлів; 5) надання місця в захищеному хмарному сховищі. До недоліків належать: 1) додаткові можливості на кшталт батьківського контролю та менеджера паролів доступні лише в найдорожчому тарифі. В інших антивірусів ця функціональність введена в безкоштовну версію або як мінімум молодші редакції; 2) високі вимоги до ресурсів ПК (щоб не помічати уповільнення роботи системи, необхідно оптимізувати антивірус); 3) антивірус хороший, але дорогий, хоча часто бувають знижки.

10. Avira – антивірусне програмне забезпечення від німецьких розробників. Серед його переваг: 1) автоматичне видалення шкідливих програм, навіть якщо користувач не запускає сканування; 2) підтримка різних режимів сканування; 3) непогані оцінки в лабораторних тестах; 4) фокусування на антивірусних функціях без додавання великої кількості непотрібних інструментів; 5) періодично трапляються суттєві знижки на 3 місяці, інколи ж на перший рік використання; 6) є повністю безкоштовна версія, хоч і досить обмежена навіть в елементарних можливостях. Серед недоліків: 1) тривала процедура сканування системи (інші антивіруси перевіряють файли набагато швидше та не менш ефективно); 2) не справляється з блокуванням фінансових загроз; 3) у безкоштовній версії немає можливості додавати файли/папки у винятки, можна лише відновити, але це не завжди допомагає; 4) антивірус блокує цілком нешкідливі програми, тому, з урахуванням попередніх пунктів, його робота створює більше проблем, ніж приносить користі, висновок – безкоштовна версія Avira є неліквідом, краще вже Defender

використовувати чи оплачувати підписку, де все працює; 5) висока вартість підписки Prime, у якій доступне під'єднання до 5 пристроїв на одному обліковому записі і є програми для Android та iOS [2].

У табл. 1 наведена узагальнена інформація щодо використання переліченого антивірусного програмного забезпечення.

Але існує невелика кількість антивірусного ПЗ, яке категорично не рекомендовано використовувати [7].

До таких програм належать:

- Malwarebytes, оскільки він непогано бореться з фішингом, шпигунами, але, власне, як антивірус досить посередній;

- eScan – слабкий антивірус, єдина перевага якого – зручний, простий інтерфейс;

- PC Matic – ним не варто користуватися: він незручний, порівняно з іншими складний у налаштуванні, неефективний;

- Bull Antivirus. Робота програми більше нагадує роботу спамного бота, що без кінця сипле вікнами з помилками та попередженнями;

- Sophos – найгірший антивірус 2019 року за однією із версій, з того часу нічого не змінилося;

- Element Anti-Virus – рекордсмен із помилових спрацьовувань, блокує навіть порожні файли, не кажучи про все інше.

Звичайно, кожен користувач сам несе відповідальність за збереження своїх даних, і, зрозуміло, можна взагалі обійтися без антивірусного ПЗ, але для цього рівень компетентності користувача повинен бути вкрай високий [10]. Для ілюстрації цього на рис. 1 наведена статистика за 2019 рік, згідно з даними Microsoft Security Intelligence Report Volume 22. Діаграма відображає кількість комп'ютерів, на яких не встановлено антивірусне ПЗ (синій колір на діаграмі), встановлено та вимкнено (жовтий колір), встановлено, але не оновлювалося (зелений колір) та відкладено (коричневий колір).

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

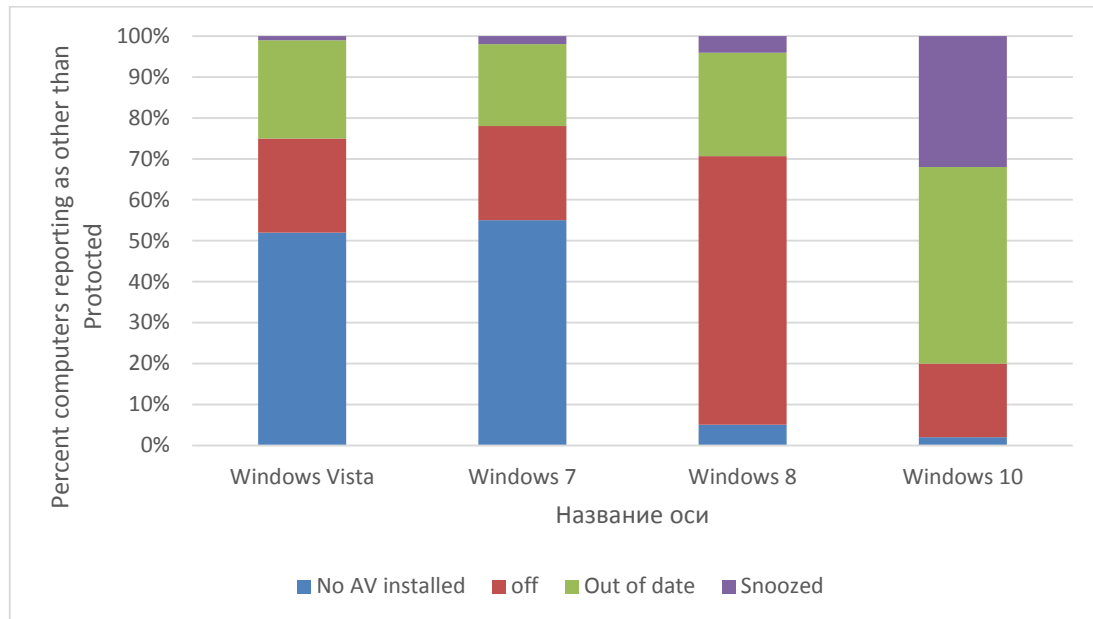


Рис. 1. Результат дослідження Microsoft Security
щодо використання та активації антивірусного ПЗ

Fig. 1. The result of Microsoft Security study
on the use and activation of anti-virus software

Таблиця 1

Найбільш поширені антивірусні програми

Table 1

Most advanced anti-virus programs

Антивірус	Безкоштовна версія	Ціна	Демо-доступ	Кількість пристроїв	Вбудований фаєрвол	Мультиплатформенність
Kaspersky	існує	665 ₴	30 днів	до 5	існує	існує
McAfee	немає	655 ₴	30 днів	до 10	існує	існує
Захисник Windows	існує	—	—	1	існує	немає
ESET NOD32	існує	365 ₴	30 днів	1	існує	окремі підписки на інші ОС
Bitdefender	існує	530 ₴	немає	до 5	існує	існує
Sucuri	існує	199 \$	немає	1	немає	лише веб
Dr. Web	існує	400 ₴	1–3 місяці	1	існує	окремі підписки на інші ОС
Avast	існує	440 ₴	—	1	існує	немає
Norton Security	немає	930 ₴	30 днів	до 10	існує	існує
Avira	існує	860 ₴	немає	до 5	існує	існує

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Контент-аналіз публікацій щодо антивірусного програмного забезпечення доводить численність досліджуваних аспектів, зокрема щодо спроможності такого програмного забезпечення не тільки розпізнавати загрозу, але й бути здатним знищити її. Для виконання цього завдання антивірус повинен мати такі функції: регулярне (або в режимі реального часу) сканування системних файлів і програм; сканування вмісту месенджерів та електронної пошти; повне сканування комп'ютера за командою користувача; моніторинг вхідного та вихідного мережевого трафіка; усунення наслідків роботи шкідливого ПЗ. Крім того, порівняльний аналіз найбільш популярного антивірусного ПЗ дає можливість виявити недоліки та переваги кожного з них.

Наукова новизна та практична значимість

Набув подальшого розвитку системний та узагальнювальний аналіз наявного та найбільш поширеного антивірусного програмного забезпечення, що надає можливість звичайним користувачам усвідомлено роботи вибір щодо встановлення таких програмних пакетів.

На основі отриманих результатів можна коригувати власні дії щодо безпечної роботи в інтернет-мережі. Також наведена інформація допоможе зробити вибір щодо використання антивірусного ПЗ, виходячи з конкретних задач, які ставить користувач.

Висновки

Незважаючи на значне поширення антивірусних програм віруси продовжують «плодитися». Щоб впоратися з ними, необхідно створювати більш універсальні та якісно нові антивірусні програми, які міститимуть усі позитивні якості своїх попередників. На жаль, у наш час немає такої антивірусної програми, яка б гарантувала захист від усіх різновидів вірусів на 100 %. Проблема протистояння «меча і щита» це постійний процес, який із кожним роком тільки набирає обертів. Як і в будь-якій сутичці, у кожній зі сторін бувають успіхи та невдачі, проте чим більшим і небезпечним стає меч, тим більшим і міцнішим стає щит. Розвиток шкідливого ПЗ тільки стимулює розвиток антивірусного ПЗ, і навпаки.

Чутки про марність антивірусного ПЗ у світі явно перебільшені. Ефективність антивірусного ПЗ залежить від безлічі факторів, багато з яких є непередбачуваними, тому навіть найкращі антивіруси іноді не можуть заблокувати нову загрозу.

Найслабшою ланкою в ланцюжку захисту комп'ютера від шкідливого ПЗ, як і в будь-якому процесі, так чи інакше пов'язаному з автоматизацією, є людина. Навіть найбільш кваліфікований фахівець рано чи пізно робить помилки, тому наявність антивірусного програмного забезпечення на комп'ютері не є панацеєю, проте дозволяє суттєво знизити ризики.

У подальшому плануємо більш детальний огляд та порівняльний аналіз алгоритмів, на базі яких створено антивірусне програмне забезпечення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белоус А. И., Солодуха В. А. *Кибероружие и кибербезопасность. О сложных вещах простыми словами*. Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 692 с.
2. Кардава Н. В. Киберпространство как новая политическая реальность : вызовы и ответы. *История и современность*. 2018. № 2. С. 152–166. DOI: <https://doi.org/10.30884/iis/2018.02.03>
3. Кузнецов Е., Сауров А. Аппаратные трояны. Часть 1 : новые угрозы кибербезопасности. *Наноиндустрия*. 2021. С. 16–25. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2016.69.7.16.25>
4. *Проблемы информационной безопасности в международных военно-политических отношениях* / под ред. А. В. Загорского, Н. П. Ромашкиной. Москва : ИММО РАНР, 2016. 183 с. DOI: <https://doi.org/10.20542/978-5-9535-0477-5>
5. Сухомлин В. А., Белякова О. С., Климина А. С., Полянская М. С., Русанов А. А. *Модель цифровых навыков кибербезопасности*. Фонд Лига интернет-медиа, 2021. 294 с.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

6. *Antivirus software (antivirus program)*. URL: <https://www.techtarget.com/searchsecurity/definition/antivirus-software>
7. *Best Antivirus Software for PC in 2021*. URL: <https://www.wizcase.com/best-antivirus-for-pc/gr/>
8. *Data Breach Investigations Report*. 2020. Verizon. URL: <https://enterprise.verizon.com/resources/reports/2020-data-breach-investigations-report.pdf>
9. Kostogryzov A. *Probabilistic Modeling in System Engineering*. London : IntechOpen, 2018. 290 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.71396>
10. Trifonov R., Yoshinov R., Pavlova G., Tsochev G. Artificial neural network intelligent method for prediction. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1872. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4996678>

D. S. ASTAKHOV^{1*}, N. O. LYSENKO^{2*}, V. B. MAZURENKO^{3*}, A. I. FEDOROVYCH^{4*}

^{1*}Dep. «Radio-Electronic Automation», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail astakhov.ds@gmail.com, ORCID 0000-0002-8636-1776

^{2*}Dep. «Radio-Electronic Automation», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail LysenkoNA@ukr.net, ORCID 0000-0001-6865-6207

^{3*}Dep. «Radio-Electronic Automation», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail mazurenko_v@yahoo.com, ORCID 0000-0001-8340-012X

^{4*}Dep. «Radio-Electronic Automation», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail sonya.soolovskaya@gmail.com, ORCID 0000-0003-0752-7190

Analysis of Modern Anti-Virus Software in Cyber Security Tasks

Purpose. The research is aimed at gaining general knowledge about modern anti-virus software. Because it is one aspect of cybersecurity, and is subject to ongoing discussions about its appropriateness. **Methodology.** To obtain data, the authors conducted a review of world literature on the topic of work using full-text and abstract databases. Signature and heuristic methods of antivirus software operation are considered. As well as the conditional division of these products into programs-detectors, programs-doctors, programs-auditors, programs-filters, programs-immunizers was made. **Findings.** Content analysis of publications in the direction of anti-virus software proves the number of aspects studied. The question of the ability of such software not only to recognize the threat, but also to be able to destroy it is being studied. To perform this task, the antivirus must have the following functions: regular (or real-time) scanning of system files and programs; scanning the content of messengers and e-mail; full computer scan at the user's command; monitoring of incoming and outgoing network traffic; elimination of the malware operation consequences. In addition, a comparative analysis of the most popular anti-virus software makes it possible to identify the disadvantages and advantages of each of them. **Originality.** Systematic and generalized analysis of the existing and most common anti-virus software has been further developed, which allows ordinary users to make informed choices about installing such software packages. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible to adjust your own actions regarding safe work on the Internet. In addition, the article aims to dispel myths suggesting that users do not protect their computers from malware at all. These studies can also be useful in studying the discipline "Fundamentals of Software Testing", the organization of scientific and practical seminars, refresher courses and etc.

Keywords: software; information threat; antivirus; singular method; heuristic method

REFERENCES

1. Belous, A. I., & Solodukha, V. A. (2020). *Kiberoruzhie i kiberbezopasnost. O slozhnykh veshchakh prostymi slovami*. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya. (in Russian)
2. Kardava, N. V. (2018). Kiberprostranstvo kak novaya politicheskaya realnost: vyzovy i otvety. *History and Present*, 2, 152-166. DOI: <https://doi.org/10.30884/iis/2018.02.03> (in Russian)
3. Kuznetsov, E., & Saurov, A. (2016). Hardware Trojans. Part 1: new threats to cyber security. *Nanoindustry Russia*, 7, 16-25. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2016.69.7.16.25> (in Russian)
4. Zagorskii, A. V., & Romashkina, N. P. (Eds.). (2016). *Informational Security Problems in Modern International Crises and Conflicts of XXI century*. Moscow: IMEMO RAN. DOI: <https://doi.org/10.20542/978-5-9535-0477-5> (in Russian)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

5. Sukhomlin, V. A., Belyakova, O. S., Klimina, A. S., Polyanskaya, M. S., & Rusanov, A. A. *Model tsifrovoykh navykov kiberbezopasnosti*. Fond Liga internet-media. (in Russian)
6. *Antivirus software (antivirus program)*. Retrieved from <https://www.techtarget.com/searchsecurity/definition/antivirus-software> (in English)
7. *Best Antivirus Software for PC in 2021*. Retrieved from <https://www.wizcase.com/best-antivirus-for-pc/gr/> (in English)
8. *Data Breach Investigations Report*. (2020). Verizon. Retrieved from <https://enterprise.verizon.com/resources/reports/2020-data-breach-investigations-report.pdf> (in English)
9. Kostogryzov, A. (Ed.). (2018). *Probabilistic Modeling in System Engineering*. IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.71396> (in English)
10. Trifonov, R., Yoshinov, R., Pavlova, G., & Tsochev, G. (2017). Artificial neural network intelligent method for prediction. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1872, pp. 1-7). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4996678> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.05.2021

Прийнята до друку: 01.10.2021

УДК 656.13:004.358

О. В. ГОРБОВА^{1*}, О. Д. МЕРЗЛИЙ^{2*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта zver343434@gmail.com, ORCID 0000-0002-5219-5028

Дослідження автомобільних потоків засобами імітаційного моделювання

Мета. Автомобільні перевезення вантажів і пасажирів стали важливою частиною загального процесу перевезення та взаємодії з усіма видами транспорту. Через збільшення автотранспортних потоків у транспортній мережі актуальною є проблема їх раціональної організації. Однак з урахуванням впливу різних чинників, таких як завантаженість і стан дороги, це завдання не може бути вирішене за допомогою аналітичних моделей, заснованих на графових моделях. Тому метою цієї статті є розробка безпечної моделі дорожнього руху на основі імітаційного моделювання координованих транспортних потоків у міській дорожній мережі із застосуванням системи комп'ютерного моделювання. **Методика.** Для пошуку ефективних стратегій управління транспортними потоками в мегаполісі, оптимальних рішень із проектування вулично-дорожньої мережі та організації дорожнього руху необхідно враховувати широкий спектр характеристик транспортного потоку, закономірності впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на динамічні характеристики змішаного транспортного потоку. Застосування моделювання і створення адекватної моделі транспортного потоку є актуальним завданням у процесі організації та управління дорожнім рухом. Методика досліджень дозволить створити комплексний підхід до розв'язання задач наведеного типу та міститиме симбіоз теоретичних та експериментальних положень. **Результати.** Під час проведення експериментів було виявлено, що в разі звичайної роботи транспортної мережі швидкість проїзду всього виду транспорту задовільна. У випадку появи чинників, які створюють велике навантаження, збільшується час проїзду всього виду транспорту. Було виділено фактори, які можуть вплинути на оптимальну роботу мережі навіть за великого навантаження. **Наукова новизна.** Уперше створено загальну методологію імітаційного моделювання та вдосконалено формалізацію методу агентного моделювання. **Практична значимість.** Результати роботи покладені в основу системи імітаційного моделювання транспортних потоків, що дозволяє аналізувати властивості наявних і проєктованих транспортних вузлів. Система реалізована у вигляді програмного комплексу, який може бути використаний в установах державного управління, проєктних організаціях і консалтингових компаніях, що займаються проєктуванням і реорганізацією схем дорожнього руху. Запропонована модель агента може бути використана для більш складних імітаційних моделей організаційно-технічних систем.

Ключові слова: автотранспортний потік; імітаційне моделювання; графова модель; стратегія управління транспортними потоками; дорожня мережа

Вступ

Україна має досить розвинуту мережу автодоріг загального користування протяжністю 172,4 тис. км, у тому числі 164,1 тис. км із твердим покриттям. За оцінками Міністерства інфраструктури, із числа міжнародних автотрас (близько 8 200 км) у хорошому стані перебуває 24 %, у задовільному – ще 65 %. Для доріг національного значення (4 800 км) ці цифри складають 21 і 68 % відповідно, а ось для регіональних (9 800 км) – лише 10 і 50 %. Очевидно,

що вітчизняні автомагістралі потребують серйозної модернізації [10].

Статистичні дані свідчать про швидке зростання автотранспорту: 1900 року в усьому світі нараховувалось близько 12 тисяч автомобілів; 1920 – 10 922, 1950 року – 70 388, 1957 року – 102 827. У наш час в світі більше ніж 1,5 млрд автомобілів.

2014 року на кожних 1 000 чоловік у світі припадало 118 легкових автомобілів. У деяких країнах показник склав лише 2–10 автомобілів на 1 000 жителів, але є країни, у яких цей показник перевищує 500 автомобілів на 1 000 меш-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

канців. Це нормальний показник для багатьох європейських країн. Рівня автомобілізації (250–300 автомобілів на 1 000 чоловік) ці країни досягли ще в 60–70-х роках минулого століття. Україна порівняно з іншими країнами має показник у чотири рази менший. Потрібно відзначити, що на 1 000 мешканців в Україні припадає 191 автомобіль, а всього нараховується 8 млн 700 тис. автомобілів, що ставить Україну на 69-те місце за рівнем автомобілізації серед 145 країн.

Процес автомобілізації найбільших міст Західної Європи, що почався в 50-ті роки минулого сторіччя, проходив практично за однією закономірністю для всіх країн: лінійне зростання кількості автомобілів до рівня 300–350 авт./1 000 жителів, потім уповільнення зростання та стабілізація при 550 ± 50 авт./1 000 жителів [2].

У цілому в розвинутих країнах проходить зниження темпів зростання автомобільного парку, що в останні роки складає 1–2 %. У Північній Америці вже достатньо довго спостерігається зростання чисельності сімей, які мають два автомобілі й більше. У США їх частка вже досягла 58 %. У Західній Європі зростання чисельності середнього класу та його добробуту супроводжується аналогічними процесами. Так, наприклад, в Іль-де-Франс (агломерація Парижа) 1991 року 75 % домогосподарств мали один автомобіль, а 20 % – два й більше. Такі тенденції спостерігалися і у Великобританії, наприклад, за період 1992–2000 років відбулася зміна: кількість домогосподарств без автомобілів знизилась з 32 до 26 %; частка господарств з одним автомобілем залишилася сталою – 45 %, а частка домогосподарств із двома автомобілями й більше зросла з 24 до 27 %; середня кількість автомобілів, яка припадає на одне домогосподарство, збільшилась з 0,86 до 1,04. Особливо цікавою для нас є динаміка зростання автомобільного парку в містах країн Східної Європи та прогнозовані показники фахівців цих країн. Темпи зростання автомобільного парку в містах Східної Європи, звичайно, вищі, ніж у містах Західної Європи. Так, зростання автопарку Парижа становило 1 %, Варшави – 7 %, а зростання парку автомобільного транспорту для України в середньому складає 4,8 %, хоча

2008 р. цей показник складав 6,9 % (рис. 1). Слід зазначити, що у країнах Східної Європи збільшення частки поїздок, здійснюваних із використанням легкових автомобілів, виявилось меншим, ніж зростання автомобільного парку. Україна проходить той самий етап розвитку і формування автомобільного парку, який 30–50 років тому пройшли розвинуті країни світу [11].



Рис. 1. Зростання автомобільного парку України в період 2000–2014 рр., %

Fig. 1. Growth of the car fleet of Ukraine in the period 2000–2014, %

В Україні інтенсивне зростання парку транспортних засобів розпочалося в 1990-х роках і стабільно продовжується. Цей процес прямий і безпосередньо пов'язаний із набуттям економічної свободи громадянами України, свободи щодо вибору місця проживання й місця прикладення праці. Це своєю чергою призвело до швидкого зростання автомобілізації, що підтверджує прагнення українців до підвищення мобільності та якості життя. Автомобіль став не лише засобом переміщення, а й підтвердженням соціального статусу, символом благополуччя й успішності в житті [7].

Але зростання парку автомобільного транспорту у світі пов'язане не тільки зі збільшенням кількості індивідуальних транспортних засобів. У зв'язку зі збільшенням кількості населення та його потреб, модернізації транспорту та підвищення рівня життя постала необхідність у комерційних перевезеннях.

Основні фактори, що впливають на ціну перевезення й на ціну самого товару – обсяг і вага вантажу (питома вартість перевезення великих

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

партій завжди нижче, як і в будь-яких товарів оптом). Деякі товари потребують особливих умов перевезення і зберігання. Чим довше товар буде в дорозі, тим гірше для перевізника, і разом ці всі фактори будуть впливати на кінцеву ціну товару.

Має значення і вид використовуваного автомобіля, а також регіон: у великих логістичних та промислових вузлах перевезення для вантажовідправників традиційно дорожче. Це в першу чергу Київ, Дніпро, Одеса, Львів і Рівне.

Лише 2020 року обсяг перевезення вантажів автомобільним транспортом склав близько 242,7 млн тонн, оскільки Україна територіально розташована майже в самому центрі автомобільних перевезень і основні дороги між державами проходять через Україну, доцільно організувати максимально швидкі маршрути для подолання відстані між точками А і Б. А через збільшення транспорту гостро постала проблема заторів.

Чим більшим є місто і його населення, з тим більшою кількістю проблем йому доводиться стикатися щодня. А бажання кожного жителя мати особистий транспорт створює одну величезну проблему – трафік, із яким не кожна дорога може впоратися.

Відсутність достатньої кількості паркувальних місць, збільшення часу, проведеного в дорозі, висока ймовірність ДТП, зниження безпеки для пішоходів і, звичайно ж, затори, які збільшують витрату палива й рівень забруднення навколишнього середовища – ось реалії здійснення автомобільних перевезень.

Основні проблеми функціонування транспортних систем у містах:

- зростання рівня автомобілізації населення;
- збільшення інтенсивності використання індивідуального транспорту;
- зниження ефективності міського пасажирського транспорту;
- зростання потреби жителів міста в переміщеннях;
- диспропорція між рівнем автомобілізації й темпами дорожнього будівництва;
- містобудівні проблеми розвитку міської території.

Особливо проблематичними є високі прямі й непрямі економічні витрати, у тому числі високі витрати, пов'язані з логістикою, аваріями, заторами та забрудненням повітря. Від цього страждають конкурентоспроможність України та її привабливість для інвесторів. Тому головним завданням є модернізація концепцій мобільності в українських містах.

Затори не тільки порушують наші плани. Вони – основне джерело забруднення повітря, що негативно позначається на здоров'ї кожного. За даними Центру аналізу ризиків Гарвардського університету, затори у 83 найбільших містах Сполучених Штатів Америки стали причиною понад 2 200 випадків передчасної смерті у 2010 році та збільшили витрати на потреби охорони здоров'я на 18 млрд доларів.

Але ж є ще економічні витрати, пов'язані зі змарнованими в заторах годинами (робочими й неробочими) та із затримкою доставок. Водії в 10 американських містах із найбільш перевантаженим рухом щорічно проводять у заторах близько 42 годин, зазнаючи збитків на більш ніж 121 млрд доларів.

У період автомобільного буму 1960-х містобудівники бачили тільки одне, здавалося б, очевидне рішення: будувати більше доріг і робити їх ширшими. Але це не спрацювало. Чим більше доріг будували, тим більше автомобілів на них з'являлося. Наприклад, дослідження, проведене в Каліфорнії 1997 року, показало, що як би не збільшувалася пропускна здатність доріг, знадобиться всього п'ять років, щоб рівень їх завантаження досяг 90 %.

Проблема заторів не вирішується шляхом будівництва нових доріг і тунелів. Необхідно визначити пріоритети. Це означає, що громадський транспорт повинен мати окремі рейсові шляхи й виділені автобусні смуги, а також мати перевагу на світлофорах.

Шляхів вирішення проблем заторів дуже багато – від соціальних і психологічних до розробки моделей поведінки і розуміння основної причини появи заторів.

Під час первинного аналізу проблеми можна зробити висновок, що є головною причиною заторів. Це, здавалося б, очевидно – вузькі дороги і скупчення автомобілів. Проте, деякі затори, що на перший погляд, виникають спон-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

танно, можуть бути викликані так званим ефектом «метелика», коли всього один водій раптом робить нічим не виправданий маневр, наприклад, різко перебудовується в інший ряд. Автомобілям, які їдуть за ним, доводиться різко гальмувати, що викликає ланцюгову реакцію, миттєво призводить до утворення затору на дорозі.

Автори дослідження, проведеного в Технологічному університеті штату Джорджія, бачать проблему в поєднанні агресивних водіїв (їдуть занадто швидко й занадто близько до машини попереду) і боязких водіїв, які дотримуються занадто великої дистанції. І перші, і другі змушують інших водіїв гальмувати, у результаті чого рух сповільнюється ще більше, аж до повної зупинки.

Учені намагалися змоделювати транспортні потоки, шукаючи аналогії в тому, як рухаються рідина або газ, переміщаються птахи або лижники. Однак, як вважає Габор Орос з Університету штату Мічиган, «хоча подібні аналогії допомагають зрозуміти деякі закономірності, стає все більш очевидним, що транспортні потоки не схожі ні на які інші потоки в ньютонівському всесвіті».

У наш час покладають великі сподівання на смарттехнології і те, як саме вони можуть вирішити і вже вирішують проблеми транспортного трафіка. Оскільки велика кількість машин на дорозі – це ті, водії яких шукають місця для паркування, у деяких містах намагаються управляти дорожнім рухом, використовуючи датчики для визначення того, зайняте конкретне місце на вулиці або на автостоянці чи вільне.

Якщо зв'язати ці розумні датчики із системою, яка швидко й ефективно направляє водіїв на вільні паркувальні місця, є сподівання, що це знизить рівень завантаженості доріг. Першим містом для випробовування таких датчиків стало Сан-Франциско. Не відстає від сусіда й Лос-Анджелес. Сьогодні обидва міста обслуговує ACS, дочірня компанія корпорації «Xerox».

Ще одним способом позбутися заторів, як вважають деякі дослідники, може стати автоматизація самого процесу водіння. Нещодавно компанія «Google» представила власний прототип повністю автономного самокерованого автомобіля, якому не потрібен водій.

Мета

Основною метою статті є розробка безпечної моделі дорожнього руху шляхом імітаційного моделювання координованих транспортних потоків у міській дорожній мережі із застосуванням системи комп'ютерного моделювання.

Методика

Вивчення сутності проблем транспортної перевантаженості сучасних мегаполісів спиралося на два методологічні принципи: принцип історизму та принцип системності. Згідно з принципом історизму, основну увагу в аналізі було приділено формуванню, розвитку й динаміці досліджуваних об'єктів. Аналіз спирається на принцип історизму як методологічне вираження саморозвитку дійсності, включаючи вивчення сучасного стану, минулого та процесів генезису. Принцип системності дозволяє розглядати міський транспорт як складну систему. Причому тут можливі різні підходи. Наприклад, можна розглядати міський транспорт як складну систему з точки зору [14]:

- 1) інтенсивності руху по міських магістралях;
- 2) пропускної здатності перехресть;
- 3) оптимального регулювання й розподілу транспортних потоків за допомогою заборонних та обмежувальних знаків.

У цьому випадку елементами складної системи будуть:

- 1) міські магістралі та перехрестя;
- 2) засоби сигналізації та управління;
- 3) транспортні засоби.

Можна вивчати міський пасажирський транспорт як складну систему – сукупність транспортних засобів (тролейбусів, автобусів, трамваїв, метрополітену, таксі та ін.), маршрутів руху, перехресть і світлофорів, з урахуванням їх завантаження іншими видами транспорту, пасажиропотоками, що формуються в різних пунктах міста залежно від часу доби, диспетчерських пунктів, засобів зв'язку і збору інформації, органів планування й управління, засобів ремонту й заправки автомобілів і т. д. За такого підходу міський пасажирський транспорт як складну систему розглядають із точки

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

зору якості обслуговування пасажирів, планування маршрутів, розподілу рухомого складу на маршрутах і визначення оптимальних режимів руху (розкладів), планування поточного та капітального ремонту транспортних засобів [3]. Аналогічно як складну систему можна розглядати міський вантажний транспорт. Замість пасажиропотоків розглядаються вантажопотоки від постійних і тимчасових джерел, що вимагають доставки в постійні й тимчасові пункти призначення. Під час дослідження такої складної системи виникають питання попереднього й оперативного планування перевезень, що забезпечує своєчасну й економічну доставку вантажів, а також проблеми, пов'язані з нормальною експлуатацією транспортних засобів [3]. Для проектування й розробки інструментального забезпечення в ході дослідження автотранспортних потоків використовують середовище AnyLogic. Це єдиний інструмент імітаційного моделювання (ІМ), який підтримує всі підходи до створення імітаційних моделей: процесно-орієнтований (дискретно-подієвий), системно динамічний та агентний, а також будь-яку їх комбінацію [4]. Унікальність, гнучкість і потужність мови моделювання AnyLogic дозволяє врахувати будь-який аспект моделювання з будь-яким рівнем деталізації. Графічний інтерфейс AnyLogic, інструменти та бібліотеки дозволяють швидко створювати моделі для широкого спектру завдань – від моделювання виробництва, логістики, бізнес-процесів до стратегічних моделей розвитку компанії та ринків. AnyLogic – це імітаційна платформа для повного бізнес-циклу [15].

Агент – елемент моделі, який може мати поведінку, пам'ять (історію), контакти тощо. Як агентів можна моделювати людей, компанії, проекти, автомобілі, міста, тварин, кораблі, товари тощо.

Можна створювати всередині об'єкта змінні, діаграми станів, задавати події, потокові діаграми системної динаміки, а також додавати всередину агента об'єкти бібліотек AnyLogic. Можна створити в одній моделі стільки типів агентів, скільки агентів потрібно промодельовати [4].

Створення агента зазвичай починається з визначення його інтерфейсу для зв'язку із зовнішнім світом [4].

Початковий стан і поведінка агента можуть бути реалізовані різними способами. Стан (накопичену історію) агента можна представити за допомогою змінної, або стану діаграми станів. Поведінка може бути пасивною (агенти реагують тільки на прибуття повідомлень або на виклик методів і не мають власних подій, запланованих на майбутнє) або активною, коли внутрішня динаміка агента (події, заплановані через заданий тайм-аут або процеси системної динаміки) є причиною, здійснюваних ним дій. В останньому випадку всередині агентів швидше за все повинні бути задані події і/або діаграми станів [14].

AnyLogic містить графічну мову моделювання, а також дозволяє користувачеві розширювати створені моделі за допомогою мови Java. Інтеграція компілятора Java в AnyLogic надає більш широкі можливості під час створення моделей, а також створення Java-апплетів, які можуть бути відкриті будь-яким браузером. Ці апплети дозволяють легко розміщувати моделі AnyLogic на вебсайтах. Окрім Java-апплетів, AnyLogic Professional підтримує створення Java-додатків, у цьому випадку користувач може запустити модель без інсталяції AnyLogic [6].

Графічне середовище моделювання AnyLogic містить такі елементи:

- Stock & Flow Diagrams – діаграма потоків і накопичувачів, яку застосовують під час розробки моделей за методом системної динаміки [6];

- Statecharts – карти станів, які в основному використовують в агентних моделях для визначення поведінки агентів. Також їх часто використовують в дискретно-подієвому моделюванні, наприклад, для симуляції машинних збоїв [6];

- Action charts – блок-схеми, які використовують для побудови алгоритмів в дискретно-подієвому (маршрутизація дзвінків) та агентному моделюванні (для логіки рішень агента) [6];

- Process flowcharts – процесні діаграми, що є основною конструкцією, яку використовує

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

для визначення процесів у дискретно-подієвому моделюванні [6].

Середовище моделювання також містить: низькорівневі конструкції моделювання (змінні, рівняння, параметри, події тощо), форми подання (лінії, квадрати, овали і т. ін.), елементи аналізу (бази даних, гістограми, графіки), стандартні картини й форми експериментів [14].

Під час розробки моделі було використано елементи з таких бібліотек, як:

- бібліотека дорожнього руху (елементи бібліотеки показані на рис. 2);
- бібліотека моделювання процесів (елементи бібліотеки показані на рис. 3);
- пішохідна бібліотека (елементи бібліотеки показані на рис. 4).

Бібліотека дорожнього руху дозволяє детально імітувати фізичне переміщення машин по дорожній мережі. Крім того, вона дає можливість моделювати:

- рух з урахуванням правил дорожнього руху;
- світлофори й пріоритети проїзду на перехрестях;
- місця для паркування;
- рух і зупинки громадського транспорту.

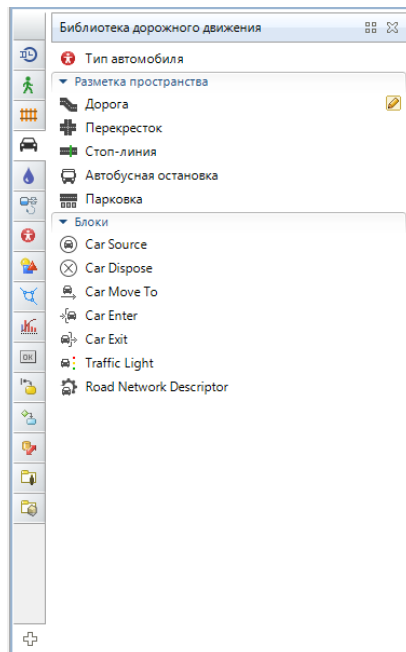


Рис. 2. Дорожня бібліотека

Fig. 2. Road library

Бібліотека моделювання процесів AnyLogic підтримує дискретно-подієвий, або, якщо бути більш точним, «процесний» підхід моделювання. За допомогою об'єктів бібліотеки процеси можна моделювати системи реального світу, динаміка яких уявляється як послідовність операцій (прибуття, затримка, захоплення ресурсу, поділ) над агентами, що представляють клієнтів, документи, дзвінки, пакети даних, транспортні засоби тощо. Ці агенти можуть володіти певними атрибутами, що впливають на процес їх обробки (наприклад, тип дзвінка, складність роботи) або накопичують статистику (загальний час очікування, вартість).

Процес задають у формі поточкових діаграм (блок-схем) – графічне представлення, яке застосовують у багатьох сферах: виробництво, бізнес-процеси, центри обробки дзвінків, логістика, охорона здоров'я тощо [14].

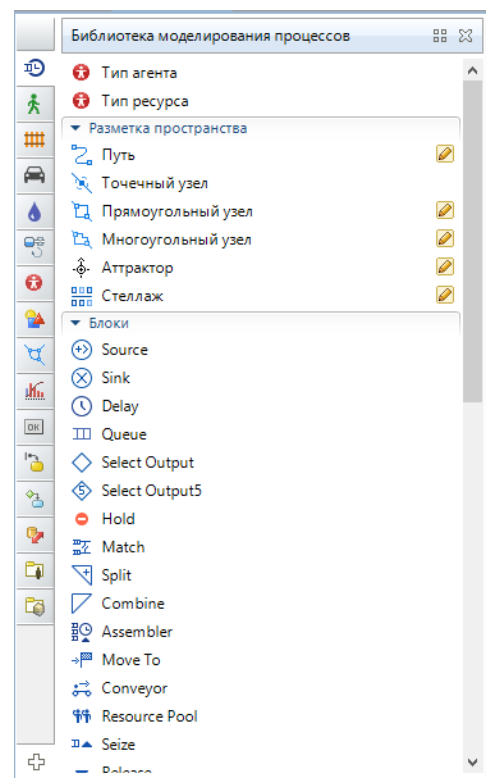


Рис. 3. Бібліотека моделювання процесів

Fig. 3. Process modeling library

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

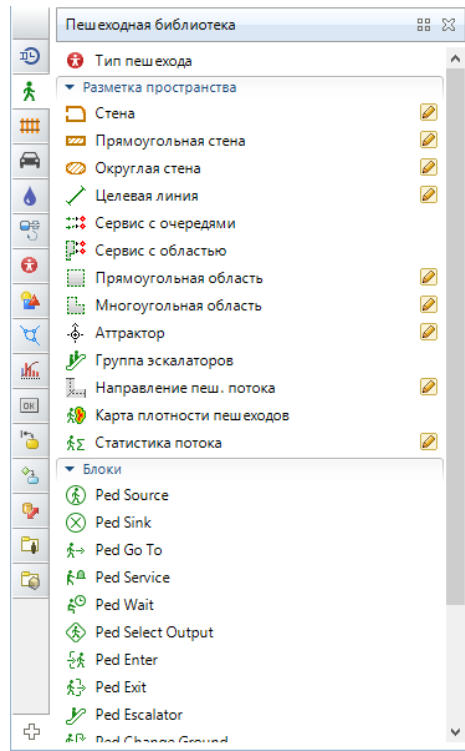


Рис. 4. Пішохідна бібліотека

Fig. 4. Pedestrian library

Пішохідна бібліотека AnyLogic є високорівневою бібліотекою моделювання руху пішоходів у фізичному просторі. Вона дозволяє моделювати будівлі, у яких рухаються пішоходи (станції метро, стадіони, музеї), а також вулиці й інші місця великого скупчення людей. За нею можна збирати статистичні дані [14].

Моделі руху пішоходів мають дві складові – середовище й поведінку. Під середовищем розуміють фізичні об'єкти – стіни, різні сфери, сервіси, черги тощо.

Основним об'єктом бібліотеки є пішохід, якого задають за допомогою об'єкта типу Ped. Пішохід «живе» в заданому фізичному просторі (середовищі) й пересувається згідно із заданими правилами. З іншого боку, тип пішохода успадкований від типу агента Agent, тому пішоходи пересуваються по блок-схемі так само, як агенти.

Блок-схему пішохідної моделі будують за допомогою об'єктів, що містяться в пішохідній бібліотеці. Тип агента Ped є базовим для моделювання пішоходів. У бібліотеці є об'єкти для створення пішоходів та управління потоком

пішоходів [7]. Правила задавання потоку пішоходів аналогічні правилам задавання потоку агентів у бібліотеці моделювання процесів.

Опис агентів:

➤ Main – головний агент моделі, який об'єднує всіх інших агентів. Цей агент описує повну роботу всієї моделі.

➤ Bus113A – агент, який описує властивості автобуса, що перевозить людей у системі. Він має свій параметр «Час появи 113», який фіксує час появи агента в системі. Агент має свою модель із 2D/3D – текстурою. Цей агент показаний на рис. 5.

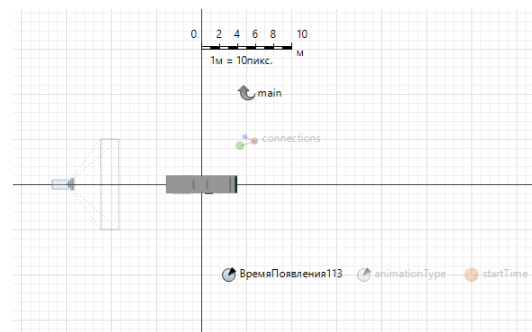


Рис. 5. Модель агента ➤ Bus113A

Fig. 5. Bus113A ➤ agent model

➤ Bus146A – агент, який описує властивості автобуса, що перевозить людей у системі. Він схожий з агентом ➤ Bus113A і має такий самий параметр – «Час появи 146».

➤ Car – агент, який описує властивості автомобілів, що рухаються у системі. Цей агент схожий з агентами ➤ Bus146A та ➤ Bus113A. Має властивість «Час появи» і п'ять текстур різного кольору. Агент представлений на рис. 6.

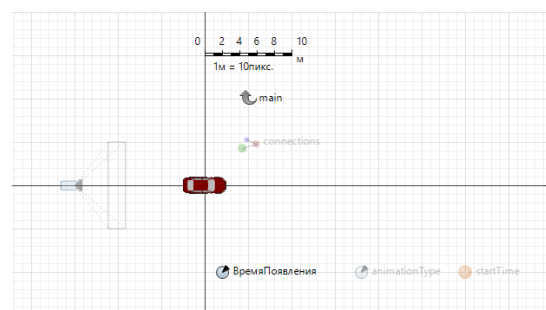


Рис. 6. Модель агента ➤ Car

Fig. 6. Car ➤ agent model

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

🚗 **Vehicle** – це агент без текстури, який слугує для того, щоб доповнювати агенти 🚗 **Car**, 🚌 **Bus146A**, 🚌 **Bus113A** та розширювати їх функціонал. Має камеру (camera), параметр «AnimationType» та змінну «StartTime».

🚶 **Пішохід** – агент, який описує властивості пішохода. Він схожий з агентом 🚗 **Car**, проте не доповнюється агентом 🚗 **Vehicle** і має свою текстуру.

В імітаційній моделі використано такі елементи:

1. Елемент «Дорога» 🛣️ є графічним елементом розмітки простору, це безперервна дорога (тобто така дорога, яка не містить перехресть).

2. За допомогою спеціального елемента 🏠 **Масштаб** можна задати масштаб анімації моделі, тобто відношення розміру об'єкта на анімації моделі до натурального розміру об'єкта, який моделюють. Фактично масштаб задають як співвідношення пікселів анімації та фізичної одиниці довжини.

3. За допомогою елемента розмітки простору «Перехрестя» можна поєднувати дві або більше дороги. Використовуючи дороги, перехрестя й інші елементи розмітки простору, можна створювати дорожні мережі для моделей бібліотеки дорожнього руху. Відображені на перехресті білі точкові лінії – з'єднувачі смуг – задають дозволені напрямки руху транспорту на (рис. 7).

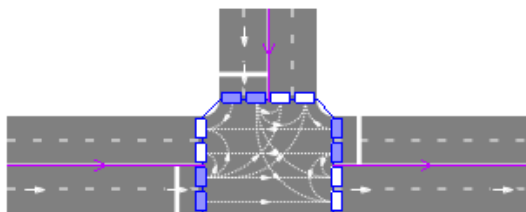


Рис. 7. Перехрестя

Fig. 7. Crossroad

4. За допомогою елемента розмітки простору «Автобусна зупинка» можна відобразити автобусну зупинку на узбіччі дороги в напрямку руху (рис. 8).

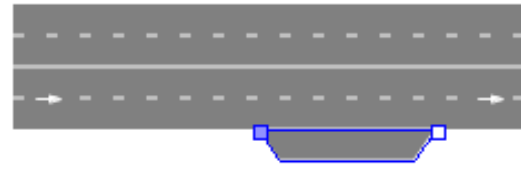


Рис. 8. Автобусна зупинка

Fig. 8. Bus stop

5. За допомогою елемента розмітки простору «Паркування» можна відображати однорядні паркувальні місця, розташовані на узбіччях дороги.

Паркування може бути паралельне (машини паркують в одну лінію з іншими припаркованими машинами) або перпендикулярне – це задають у властивості «Тип паркування» (рис. 9).

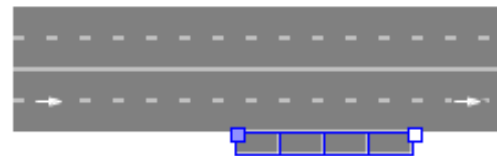


Рис. 9. Паркування

Fig. 9. Parking

1. 🚗 **CarSource** – створює автомобілі й намагається помістити їх у зазначеному місці дорожньої мережі (на обраній дорозі або паркувальному місці).

2. 🗑️ **CarDispose** – видаляє машини з моделі.

3. 🚗 **CarMoveTo** – блок, який керує рухом автомобіля. Автомобіль може їхати, тільки коли він перебуває у блоці **CarMoveTo**. Автомобіль намагається розрахувати шлях від свого поточного місця до зазначеного місця призначення, коли надходить до блока **CarMoveTo**. Місцем призначення можуть виступати: дорога, паркувальне місце, автобусна зупинка або стоп-лінія.

4. 🚦 **TrafficLight** – моделює світлофор, який керує рухом машин на перехресті або на будь-якій стоп-лінії.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

5.  RoadNetworkDescriptor – опцій блок. За його допомогою розробники отримують доступ до управління всіма транспортними засобами, що перебувають в одній дорожній мережі. Блок дозволяє задавати дії, які відбуватимуться під час додавання автомобіля до дорожньої мережі, в'їзду на дорогу, зупинки автомобіля, зміни смуги тощо. Крім того, за допомогою цього блока можна відобразити затори на дорогах.

6.  PedSource – створює пішоходів. Цей блок зазвичай використовують як початкову точку діаграми пішохідного процесу.

7.  PedSink – видаляє пішоходів. Цей блок зазвичай відображає кінцеву точку діаграми пішохідного процесу.

8.  PedGoTo – змушує пішоходів йти до заданої точки простору.

9.  PedEnter – поміщає вже створених раніше пішоходів у модельоване середовище.

10.  PedExit – видаляє пішоходів із модельованого середовища.

11.  Delay – затримує агентів на заданий період часу.

12.  Queue – зберігає агентів у певному порядку. Моделює чергу агентів, які чекають приймання об'єктами, заданими в потоковій діаграмі.

13.  SelectOutput – направляє агентів в один з двох вихідних портів залежно від виконання заданої умови.

14.  SelectOutput5 – направляє агентів в один із п'яти вихідних портів залежно від виконання заданих умов.

15.  Pickup – додає агентів до вмісту агента-контейнера.

16.  DropOff – видаляє обраних агентів з агента-контейнера й посилає їх далі.

17. 3D-вікно – це елемент, що задає на діаграмі агента область, у якій під час запуску моделі буде відображатися тривимірна анімація цього об'єкта.

18. Область перегляду. За допомогою цього елемента можна виділити на діаграмі типу агента деякі області, що містять логічно відокремлені групи елементів або ділянки діаграми. Здавши такі області, можна легко перемикатися

між ними під час виконання моделі за допомогою спеціальних засобів навігації. Це дозволить швидко переходити до тієї або іншої ділянки діаграми агента.

19. Гістограма – це елемент, що відображає дані, зібрані об'єктом (на одній гістограмі можуть одночасно відображатися дані відразу декількох таких об'єктів). Вісь X завжди масштабується таким чином, щоб вмістити всі дані. Масштаб по осі Y також вибирається автоматично, таким чином, щоб висота найвищого стовпця дорівнювала висоті області діаграми.

Початок руху автомобіля починається в одному з блоків CarSource (рис. 10).

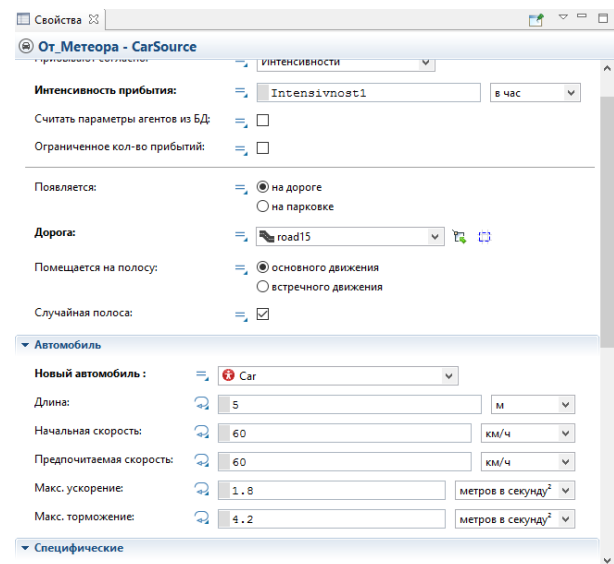


Рис. 10. Властивості блока CarSource

Fig. 10. CarSource block properties

У кожному з блоків CarSource можна вказати початкову дорогу або паркувальне місце, на яких будуть з'являтися автомобілі. Потрібно обрати тип автомобіля (агента, який відповідає за автомобіль), вказати початкові дані транспорту (початкову швидкість, середню швидкість, тощо), задати інтенсивність потоку.

Після цього потік потрапляє до блока SelectOutput5, який розподіляє, куди буде рухатися той чи інший автомобіль. у блоці SelectOutput5 є п'ять виходів зі своїми ймовірностями використання, що показано на рис. 11.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

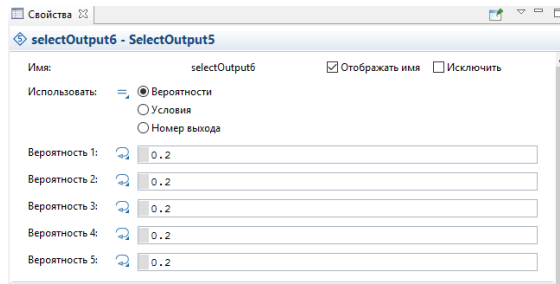


Рис. 11. Властивості блока SelectOutput5

Fig. 11. Properties of the SelectOutput5 block

Після обрання шляху автомобіль потрапляє до блока SelectOutput, який за властивостями схожий із блоком SelectOutput5, але має лише дві ймовірності з виходами:

1) за першою ймовірністю, автомобіль потрапляє до блока CarMoveTo, у властивостях якого вказано, до якої кінцевої дороги йому потрібно рухатися. Після приїзду до кінця обраної дороги автомобіль потрапляє до блока CarDispose, який видаляє його із системи;

2) За другою ймовірністю, автомобіль потрапляє до блока SelectOutput5, а після нього до блока CarMoveTo, у якому вказано місце паркування. Якщо немає вільного для паркування місця, то автомобіль їде далі за логікою. Якщо місце вільне, то автомобіль паркується і потрапляє до блока Delay, у якому вказано, скільки йому потрібно очікувати. Після потрібного очікування автомобіль їде далі за логікою моделі.

Після пункту 2 автомобіль знову потрапляє до блока вибору шляху, де, за ймовірністю обирає блок CarMoveTo. Автомобіль рухається до потрібної дороги, після чого видаляється із системи.

Логіку проїзду автомобілів у системі показано на рис. 12.

Після запуску моделі всі автомобілі рухаються за правилами дорожнього руху.

Такі блоки потрібні для того, щоб у процесі експерименту була можливість змінювати параметри (наприклад, параметр появи кількості автомобілів у системі).

У системі наявні елементи TrafficLight, які вже були описані. Налаштування таких блоків було повністю взято з реального життя для чистоти експерименту. Приклад налаштування показано на рис. 13.

Основну карту і логіку моделі показано на рис. 12–14.

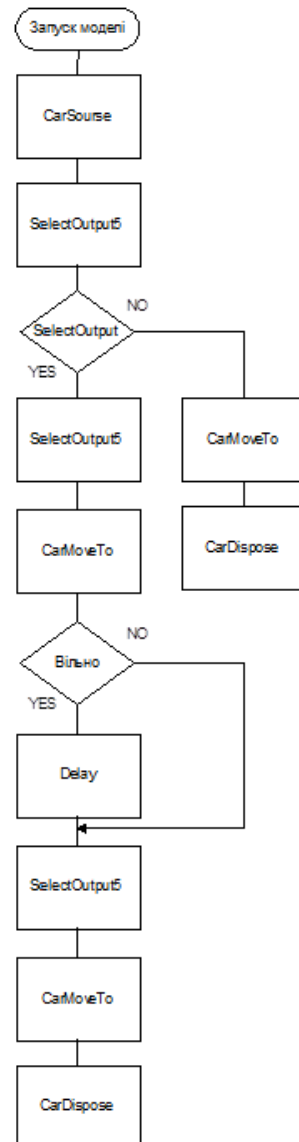


Рис. 12. Схема логіки проїзду автомобілів

Fig. 12. Scheme of the car passage logic

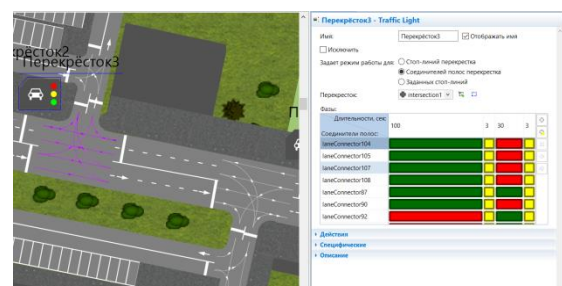


Рис. 13. Властивості блока TrafficLight

Fig. 13. TrafficLight block properties

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ



Рис. 14. Дорожня карта моделі

Fig. 14. Road map of the model

Результати

Експеримент повинен показати, які фактори найбільше впливають на появи заторів і збільшення навантаження на транспортну мережу. Для більш точних показників, кожен експеримент будемо проводити 5 разів. Час тестування – 1 година.

Експеримент 1. Провести експеримент у звичному режимі роботи транспортної мережі, без чинників, які впливають на систему.

Основні вхідні дані:

- кількість автомобілів у системі (табл. 1);
- кількість пішоходів у системі – 300 чоловік на годину;

- інтервал появи автобусів – кожні 10 хвилин;
- загальна кількість місць в автобусі – 45.

Таблиця 1

Кількість автомобілів у системі

Table 1

Number of cars in the system

Напрямок руху	Кількість появи легкових автомобілів
Від_Метеора Від_Макарова	200
Від_Кірова Від_Дафі	300
Від_Суворова	30
Від_Янгеля	70

Маємо статистику роботи моделі, для порівняння з іншими експериментами.

За динамікою проїзду автомобілів можна побачити, що модель працює стабільно, без просідань, стрімкого росту навантаження. Результати одного з експериментів показано на рис. 16.

Експеримент №	Час проїзду авто	Час проїзду 146 автобуса	Час проїзду 113 автобуса	Час знаходження пішоходів у системі	Середня постійна кількість пішоходів	Кількість авто у системі	Середня постійна кількість авто
1	210,09	364,31	449,94	601,10	50,79	1043	81,79
2	206,42	357,69	496,32	558,75	45,20	1012	71,88
3	204,65	428,41	497,30	597,55	48,99	977	75,44
4	220,92	354,39	467,93	674,08	55,88	973	73,19
5	201,57	414,41	458,30	652,60	54,79	1010	79,80
Середнє значення:	208,73	383,84	473,96	616,82	51,13	1003,00	76,42

Рис. 15. Результати експериментів

Fig. 15. The results of experiments

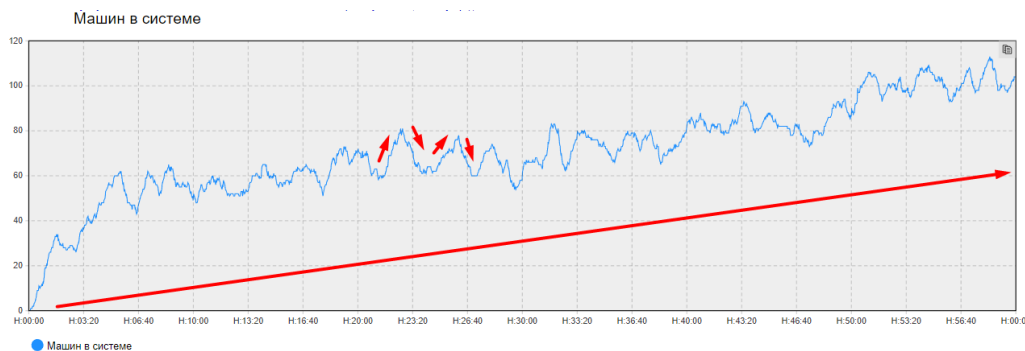


Рис. 16. Динаміка проїзду авто

Fig. 16. Car passage dynamics

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

A	B	C	D	E	F	G	H
Експеримент №	Час проїзду авто	Час проїзду 146 автобуса	Час проїзду 113 автобуса	Час знаходження пішоходів у системі	Середня постійна кількість пішоходів	Кількість авто у системі	Середня постійна кількість авто
1	393,16	630,12	624,25	869,98	42,95	991	148,34
2	391,12	611,41	666,03	909,63	65,56	1228	143,22
3	440,48	668,03	681,88	912,61	64,99	1199	145,18
4	441,55	663,61	713,30	903,59	73,78	1194	154,58
5	520,41	867,42	778,30	1009,31	86,39	1035	148,86
Середнє значення:	437,34	688,12	692,75	921,02	66,734	1129,40	148,04

Рис. 17. Результати експериментів

Fig. 17. The results of experiments

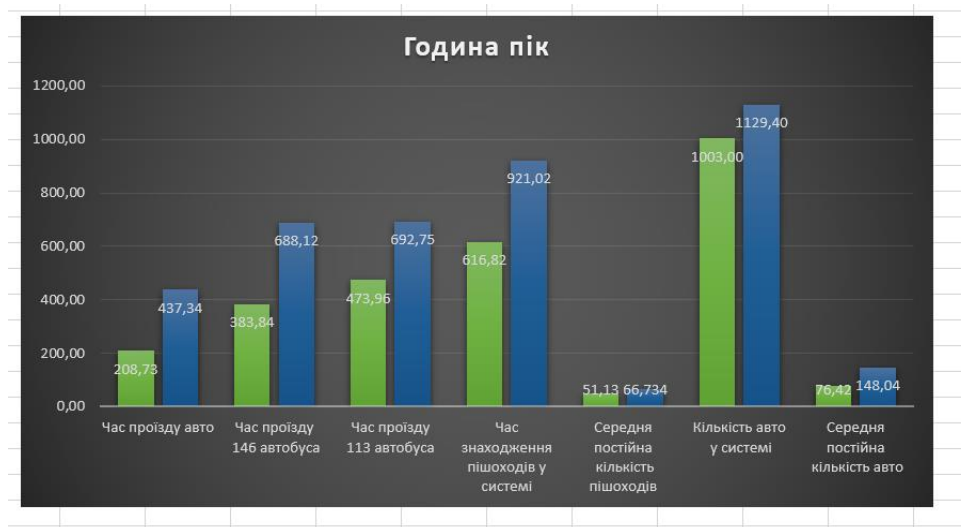


Рис. 18. Порівняння експериментів

Fig. 18. Comparison of experiments

Висновок: під час розбору графіка проїзду можна побачити зростання й падіння тренду, що є коректним. Основне зростання зумовлено тим, що в системі є місця для паркування автомобілів. Такі автомобілі теж вважають «Автомобілями в системі».

Ці результати будемо вважати результатами правильної роботи моделі.

Експеримент 2. Збільшити кількість автомобілів за кожним основним напрямком на 100, імітуючи «Годину пік». Вихідні дані:

- кількість автомобілів у системі (табл. 2)
- кількість пішоходів у системі – 300 чоловік на годину;
- інтервал появи автобусів – кожні 10 хвилин;
- загальна кількість місць в автобусі – 45.

Таблиця 2

Кількість автомобілів у системі

Table 2

Number of cars in the system

Напрямок	Кількість появи легкових авто
Від_Метеора Від_Макарова	300
Від_Кірова Від_Дафі	400
Від_Суворова	30
Від_Янгеля	70

На рис. 18 можна побачити стрімке зростання часу в кожному параметрі, у деяких зростання досягло понад 45 %.

Висновок: зі збільшенням кількості автомобілів у системі збільшується й час проходження

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

системи транспортом. Зростає час очікування й проходження системи для пішоходів, оскільки автобуси стоять у заторах і не можуть вчасно прибути до зупинки.

Під час проведення експериментів було виявлено, що в разі звичайної роботи транспортної мережі швидкість проїзду всього виду транспорту задовільна. У випадку появи чинників, які створюють велике навантаження, збільшується час проїзду всього виду транспорту. Було виявлено такі фактори, які можуть вплинути на оптимальну роботу мережі навіть під великим навантаженням:

1. Для уникнення великого скупчення людей на зупинках:

– у час, коли трафік починає збільшуватися (у ранці й вечері), зменшити інтервал між автобусами. Таким чином час очікування на зупинках зменшиться, а бюджет автопарку збільшиться;

– збільшити кількість місць в автобусі (оновлення автопарку);

– надавати можливість пішоходам використовувати альтернативний транспорт, наприклад, електросамокати;

– організувати окремі смуги для руху міського транспорту;

– побудувати метро;

2. Для уникнення заторів на дорогах:

– у час, коли трафік починає збільшуватися (у ранці й вечері) змінювати фази перемикавання світлофорів таким чином, щоб навантажені ділянки дороги проїжджати швидше;

– заохочувати автомобілістів пересідати на міський транспорт у годину пік;

– розширювати основні навантажені дороги/перехрестя.

Наукова новизна та практична значимість

Новим у роботі є створення загальної методології імітаційного моделювання процесів та вдосконалення формалізації методу агентного моделювання.

Усі результати, отримані в роботі, є новими й актуальними, зокрема, запропонована модель агента-учасника дорожнього руху, що відображає основні аспекти поведінки водіїв. Також виконано програмну реалізацію моделі агента, придатну для дослідження транспортних систем. Усі дослідження виконано на основі реальної транспортної системи.

Висновки

У цій статті запропоновано методику вирішення проблем заторів засобами імітаційного моделювання. Було побудовано модель на основі реальної транспортної мережі. Проведено ряд експериментів з імітацією різних проблем, які можуть виникнути на дорозі. За зібраними статистичними даними розроблено рекомендації для оптимізації руху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боев В. Д. *Компьютерное моделирование* : пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7. Санкт-Петербург : ВАС, 2014. 432 с.
2. Боев В. Д. *Моделирование в среде AnyLogic* : учебное пособие для вузов. Юрайт, 2017. 168 с.
3. Боев В. Д. *Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World* : учебное пособие. Санкт-Петербург, 2019. 346 с.
4. *Вільна енциклопедія Wikipedia*. URL: <https://uk.wikipedia.org>
5. Вионенко Л. Ф., Михайлов М. В., Першозванска Т. Н. *Імітаційне моделювання* : підручник і практикум для академічного бакалаврату. Москва, 2017. 283 с.
6. Задорожний В. М. *Аналітико-імітаційні дослідження систем та мереж масового обслуговування* : монографія. Омск, 2010. 280 с.
7. *Імітаційне моделювання*. URL: http://ni.biz.ua/5/5_3/5_32577_imitatsionnoe-modelirovanie.html
8. *Как Ford использует имитационное моделирование при разработке беспилотных автомобилей*. URL: <https://nfp2b.ru/2020/04/02/kak-ford-ispolzuet-imitatsionnoe-modelirovanie-pri-razrabotke-bespilotnyh-avtomobilej/>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

9. Куприяшкин А. Г. *Основы моделирования систем* : учеб. пособие. Норильск : НИИ, 2015. 135 с.
10. Міністерство інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/timeline/Dorozhne-gospodarstvo.html>
11. Першаков В. М., Беятинський А. О., Степанчук О. В., Кротов Р. В. *Дослідження транспортних потоків в аспекті заторових станів дорожнього руху* : монографія. Київ : НАУ, 2015. 177 с.
12. Система Actor Pilgrim. URL: <http://simulation.su/static/actor-pilgrim-full-info.html>
13. Строгалева В. П., Толкачева И. О. *Имитационное моделирование*. Москва, 2017. 296 с.
14. AnyLogic. URL: <https://www.anylogic.ru/>
15. Borshchev A., Grigoryev I. *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 8*. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/>
16. *Methodology for TRITIA transport model*. Transport Research Institute. 2019. 43 p.
17. Novikov A., Eremin S., Kulev A. Formation of recommendations for the selection of types of connections for different types of crossroads based on the generalized imitation model. *MATEC Web of Conferences ICMTMTE*. 2019. Vol. 298. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800047>

A. V. HORBOVA^{1*}, O. D. MERZLYI^{2*}

^{1*}Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

^{2*}Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail zver343434@gmail.com, ORCID 0000-0002-5219-5028

Research of Automobile Flows by Imitation Simulation

Purpose. Road transportation has become a very important part of the transportation process and interaction with all modes of transport, carrying out the transportation of goods and passengers. Due to the increase in traffic flows in the transport network, the problem of their rational organization is urgent. However, taking into account the influence of various factors, such as the congestion of the road section, the condition of the road, this problem cannot be solved using analytical models based on graph models. The purpose of solving the problem is to develop a safe traffic model by the method of simulation of coordinated traffic flows in the urban road network and to develop a computer simulation system necessary to achieve this purpose. **Methodology.** To search for effective strategies for controlled traffic flows in a megalopolis, optimal solutions for the design of the road network and traffic management, it is necessary to take into account a wide range of traffic flow characteristics, the regularities of the influence of external and internal factors on the dynamic characteristics of a mixed traffic flow. The use of modeling and the creation of an adequate model of traffic flow is an urgent task in the process of organizing and managing traffic. The research methodology will make it possible to create an integrated approach to solving problems of the given type and will contain a symbiosis of theoretical and experimental research. **Findings.** During the experiments, it was found that with the normal operation of the transport network, the travel speed of the entire mode of transport is satisfactory. With the appearance of factors creating a large load, the travel time of the entire mode of transport increases. We have identified the factors that can affect the optimal operation of the network, even under heavy load. **Originality.** For the first time the general methodology of simulation modeling was created and the formalization of the agent-based modeling method was improved. **Practical value.** The results of the work are used as the basis for a system of simulation modeling of traffic flows, which makes it possible to analyze the properties of existing and projected transport hubs. The system is implemented in the form of a software package that can be used in public administration institutions, design organizations and consulting companies involved in the design and reorganization of traffic patterns. The proposed agent model can be used as part of more complex simulation models of organizational and technical systems.

Keywords: traffic flow; simulation modeling; graph model; traffic management strategy; road network

REFERENCES

1. Boev, V. D. (2014). *Kompyuternoe modelirovanie: posobie dlya prakticheskikh zanyatiy, kursovogo i diplomnogo proektirovaniya v AnyLogic7*. Saint Petersburg: VAS. (in Russian)
2. Boev, V. D. (2017). *Modelirovanie v srede AnyLogic: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Yurayt. (in Russian)
3. Boev, V. D. (2019). *Modelirovanie sistem. Instrumentalnye sredstva GPSS World: uchebnoe posobie*. Saint Petersburg. (in Russian)
4. *Free encyclopedia Wikipedia*. Retrieved from <https://uk.wikipedia.org> (in Ukrainian)
5. Vionenko, L. F., Mikhailov, M. V., & Pershozvanska, T. N. (2017). *Imitacijne modeljuvannja: pidruchnyk i praktykum dlja akademichnogho bakalavratu*. Moscow. (in Ukrainian)
6. Zadorozhny, V. M. (2010). *Analitiko-imitacijni doslidzhennja sy`stem ta merezh masovogo obslugovuvannya: monografiya*. Omsk. (in Ukrainian)
7. *Simulation modeling*. Retrieved from http://ni.biz.ua/5/5_3/5_32577_imitatsionnoe-modelirovanie.html (in Ukrainian)
8. *Kak Ford ispolzuet imitatsionnoe modelirovanie pri razrabotke bespilotnykh avtomobiley*. Retrieved from <https://nfp2b.ru/2020/04/02/kak-ford-ispolzuet-imitatsionnoe-modelirovanie-pri-razrabotke-bespilotnyh-avtomobilej/> (in Russian)
9. Kupriyashkin, A. G. (2015). *Osnovy modelirovaniya sistem: uchebnoe posobie*. Norilsk: NIL. (in Russian)
10. *Ministry of Infrastructure of Ukraine*. Retrieved from <https://mtu.gov.ua/timeline/Dorozhne-gospodarstvo.html> (in Ukrainian)
11. Pershakov, V. M., Bieliatynskyi, A. O., Stepanchuk, O. V., & Krotov, R. V. (2015). *Doslidzhennja transportnykh potokiv v aspekti zatorovykh staniv dorozhnjogho rukhu: monoghrafija*. Kiev: NAU. (in Ukrainian)
12. *System Actor Pilgrim*. Retrieved from <http://simulation.su/static/actor-pilgrim-full-info.html> (in Russian)
13. Strogalev, V. P., & Tolkacheva, I. O. (2017). *Imitatsionnoe modelirovanie*. Moscow. (in Russian)
14. *AnyLogic*. Retrieved from <https://www.anylogic.ru/> (in Russian)
15. Borshchev, A., & Grigoryev, I. *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 8*. Retrieved from <https://www.anylogic.ru/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/> (in English)
16. *Methodology for TRITIA transport model*. (2019). Transport Research Institute. (in English)
17. Novikov, A., Eremin, S., & Kulev, A. (2019). Formation of recommendations for the selection of types of connections for different types of crossroads based on the generalized imitation model. *MATEC Web of Conferences* (Vol. 298, pp. 1-10). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929800047> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 01.10.21

УДК 519.87:004.942

О. В. ГОРБОВА^{1*}, М. С. МУРКОВИЧ^{2*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта nikolay.murkovich@gmail.com, ORCID 0000-0002-1031-8245

Дослідження складних процесів на основі поетапного моделювання

Мета. Для вирішення практичних завдань, що вимагають створення й подальшого аналізу моделі, важливим критерієм є трудомісткість моделювання. У зв'язку з цим метою статті є формалізація процесу моделювання та використання методики поетапного моделювання для проектування технологічних процесів. Такий підхід дозволяє проектувати процеси та завдання за такими етапами: фізичне моделювання, математичне моделювання, дискретне комп'ютерне моделювання та імітаційне моделювання. **Методика.** Для розв'язку задачі використовують методологію поетапного моделювання. Для моделювання використовують алгоритм декомпозиції, тобто розглядають задачу від глобального до детального. На першому етапі цієї реалізації проводять збір необхідної інформації для експерименту. Цю інформацію представляють у вигляді статистики. На другому етапі здійснюють подальшу обробку інформації шляхом перевірки на відповідність вхідних даних і процесу та питання, як потрібно виконувати цей процес. На останньому етапі відбувається моделювання проходжень цього фрагмента, який представлений ланцюгом переходів, отримання статистики часової ефективності процесу, його слабких місць і можливість порівняти результати отримані під час моделювання та в реальному процесі, а також можливість спрогнозувати результати й дії в системі на майбутнє. **Результати.** Методика може бути використана для дослідження складних технологічних процесів на підприємстві. Вона дозволяє моделювати складні процеси для отримання інформації про часову ефективність виконання технологічної операції, знаходження слабких місць у ній та закономірностей у виниканні випадкових подій, що можуть вплинути на операцію. Використання цього підходу може бути досить ефективним у рамках систем, у яких необхідний постійний контроль у режимі реального часу, оскільки цей підхід можна модифікувати додаванням наборів датчиків, що будуть постійно надсилати інформацію до системи, або доповнити додатковою системою, що буде надавати вже готові пакети інформації. **Наукова новизна.** Удосконалено методику поетапного моделювання представлення, що полягає в одночасному використанні фізичного, математичного та імітаційного моделювання складних процесів з набором етапів їх реалізації. **Практична значимість.** Запропонована методика призначена для поетапного моделювання технологічного процесу з подальшою побудовою імітаційного програмування.

Ключові слова: технологічний процес; імітаційне програмування; моделювання технологічного процесу; математичне моделювання

Вступ

В основі проектування технічного забезпечення, автоматизованих систем управління, розробки різноманітних технологічних процесів лежить моделювання предметної області, процесів або складових системи. Під час моделювання технологічних процесів застосовують різні методи й підходи [13].

Побудова моделей технологічних процесів є досить важливим завданням, тому що дозволяє передбачити їх особливості, що сприяють досягненню необхідних характеристик та влас-

тивостей. Дерево рішення дозволяє поліпшити оптимізацію складних процесів шляхом їх поетапного моделювання, а завдяки імітаційному моделюванню можна побачити та перевірити цю модель у часі [1, 2].

Під час вирішення практичних завдань зі створення й подальшого аналізу моделі важливим критерієм є трудомісткість цих процесів. Унаслідок цього постає питання формалізації процесу моделювання [13]. На базі формалізованого підходу до побудови й дослідження моделей доцільним є створення програмного ком-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

плексу, що автоматизує та впорядковує діяльність фахівців.

У [10] автори пропонують поетапний підхід до побудови моделі, що передбачає фізичне, математичне, дискретне комп'ютерне та імітаційне моделювання (рис. 1).

На кожному з етапів передбачена активна взаємодія з базою знань із метою накопичення типових рішень їх подальшого використання. Для єдності моделей об'єктів і систем управління, а також для адаптації типових рішень запропоновано застосування інтелектуального структурно-параметричного синтезу, заснованого на ідеї використання еволюційних алгоритмів як засобів автоматичної генерації моделі у вигляді мережі Петрі.

На етапі фізичного моделювання проводять дослідження технологічного процесу – ряд експериментів на наявному обладнанні. За відсутності такої можливості створюють фізичні моделі, що відображають основні закономірності досліджуваних процесів.

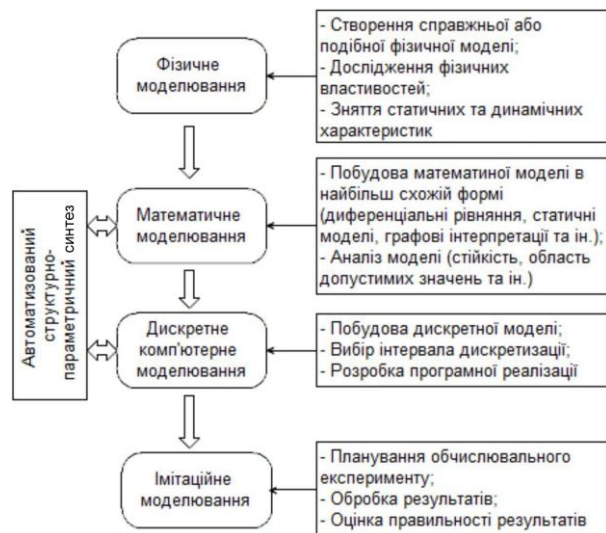


Рис. 1. Схема поетапного моделювання

Fig. 1. The scheme of step-by-step modeling

Основною метою побудови фізичної моделі є отримання статичних і динамічних характеристик процесу, який моделюють. Таким чином, реалізована й вивчена фізична модель дає можливість формально описати властивості досліджуваного процесу, визначити чисельні значення актуальних параметрів, оцінити їх кореляцію й динаміку зміни.

Після збору й обробки даних про функціонування фізичної моделі настає етап математичного моделювання. Залежно від особливостей технологічного процесу та цілей моделювання можуть бути обрані різні математичні апарати [4].

У разі моделювання схожих процесів доцільно використати шаблонні підходи, що дають приріст швидкості синтезу моделі. У цьому випадку виникає задача зберігання бази шаблонів і вибору необхідного шаблону моделі за заданими критеріями. Застосування систем управління базами даних і базами знань дає можливість створити автоматизовану систему, що пропонує на етапі математичного моделювання найбільш відповідну методологію й шаблон для створення математичного опису досліджуваного процесу.

У деяких випадках виникають труднощі в побудові математичної моделі у зв'язку зі складністю опису досліджуваного об'єкта. У такому разі може бути застосований підхід «чорної скриньки», коли модель синтезують лише на підставі накопиченої статистичної інформації про поведінку об'єкта. Для автоматизації цього процесу пропонують використати еволюційний алгоритм як засіб спрямованого пошуку структури й параметрів моделі, що адекватно описує отримані раніше вихідні емпіричні дані.

Етап імітаційного моделювання пов'язаний із дослідженням властивостей реалізованої на попередньому етапі дискретної комп'ютерної моделі. Застосування статистичних та аналітичних інструментів обробки результатів чисельних експериментів, а також їх планування дозволяє отримати не тільки окремі чисельні результати функціонування моделі технологічного процесу для одиничних вибірок вихідних умов, але й виявити якісні особливості поведінки модельованих систем та об'єктів, що володіють схожими характеристиками [6, 7].

Імітаційне моделювання, як правило, передбачає ітеративний процес запуску дискретної комп'ютерної моделі з різними наборами вихідних даних. Отримані результати підлягають подальшій обробці для виявлення функціональних залежностей та узагальнення результатів [1, 5, 7].

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

З узагальнення цього дослідження можна зробити висновок про схожість основної структури програмних засобів цієї категорії, а водночас про різницю в підходах у реалізації та властивостях програмних засобів.

У статті [11] показано, що для дослідження складних процесів соціальної взаємодії на сучасному етапі розвитку системного моделювання все частіше використовують ієрархічні системи когнітивних моделей, когнітивні архітектури та інтегровані системи моделювання. Щодо складних процесів система моделей повинна відображати різні абстракції опису структури, різноманітні аспекти її поведінки, етапи (ітерації) її еволюції в процесі функціонування й розвитку. Запропоновано розглядати архітектуру в сукупності моделей у контексті необхідності для вирішення завдання на конкретному етапі дослідження.

Як показує практика системного моделювання найбільш значущими і водночас найбільш складними є завдання аналізу й прогнозування розвитку процесів соціальної взаємодії. Такого роду завдання пов'язані з прогнозом досягнення довгострокових цілей шляхом адаптації до змін зовнішнього середовища. Завдання складні і вимагають урахування великої кількості факторів, інтересів, ризиків і наслідків, у їх рішеннях наявний високий ступінь невизначеності в оцінці зовнішнього середовища, слабка формалізація методів управління й широкое використання експертних оцінок і знань, багатокритеріальність під час оцінки прийнятих рішень. Для характеристики проблем модельного підходу до аналізу та прогнозування складних процесів соціальної взаємодії необхідно враховувати, що від постановки задачі моделювання до інтерпретації отриманих результатів постає велика група складних науково-технічних проблем, до основних із яких можна віднести такі: ідентифікація реальних об'єктів, вибір виду моделей, побудова моделей і їх програмна реалізація, взаємодія дослідника з моделлю в ході комп'ютерного експерименту, перевірка правильності отриманих у ході моделювання результатів, виявлення основних закономірностей у процесі моделювання. Залежно від об'єкта моделювання та виду використовую-

ваної моделі ці проблеми можуть мати різну значимість.

Зазначено, що, відповідно до принципу необхідної різноманітності, «різноманітність засобів моделювання повинна бути більшою або, принаймні, такою самою, як різноманітність об'єкта моделювання». У цьому випадку традиційний спосіб опису різних аспектів системи й процесу її створення, що передбачає послідовний розвиток однієї моделі, не є ефективним. Сама наявність такої єдиної моделі викликає сумніви, тому що занадто складний і багатогранний предмет опису – від реальних об'єктів і процесів до абстрактних інформаційних та інших об'єктів.

Наступний крок у дослідженні складних процесів соціальної взаємодії пропонують виконувати на основі інтегрованих систем моделювання. Їх принципова відмінність полягає у використанні різних парадигм моделювання для дослідження відповідних властивостей соціальних процесів.

Кожна з моделей має унікальні властивості, які відсутні в інших, і тому різною мірою відповідає реальним процесам. Використовувана модель, що інтерпретує досліджувану властивість процесів, у свою чергу, визначає й те, як буде осмислено проблему і які рішення буде прийнято.

У [9] запропоновано методи моделювання технологічних процесів із позиції системного аналізу. Подано формальні підходи до описання математичних моделей та показано моделювання технологічних об'єктів, що розрізняються ступенем деталізації процесів.

Для роботи [3] характерним є підхід до створення моделі технологічного процесу з використанням методології поетапного моделювання та її формалізації.

Під час моделювання технологічних процесів застосовують різні методи й підходи. Усі вони мають свої особливості, проте до моделювання предметної області висувають такі вимоги:

- однозначний опис структури предметної області;
- зрозумілість результатів передпроектного обстеження для замовників і розробників на

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

основі застосування графічних засобів відображення моделі;

- реалізованість, під якою розуміють наявність засобів фізичної реалізації моделі предметної області в інформаційних системах;

- забезпечення оцінки ефективності реалізації моделі предметної області на основі певних методів та обчислюваних показників.

Ефективним способом описання функціонування об'єктів, що забезпечує високу інформативність та інтуїтивно зрозуміле представлення інформації, є візуальне моделювання [8, 12]. Під час візуального моделювання кожен елемент виробничого процесу зображують у вигляді графічного позначення. Графічну модель можна створювати як на паперових носіях, так і за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення на ЕОМ. Відображення наявних виробничих процесів у вигляді простих діаграм і коротких описів допомагає досягти єдиного розуміння чинних норм та оперативних процедур між розробником і замовником проєктів розвитку залізничних станцій.

Мета

Основною метою цієї статті є представлення методики поетапного моделювання складних процесів шляхом їх декомпозиції.

Методика

Для вирішення поставленого завдання розроблено алгоритм, що відповідає потребам, які виникають під час дослідження.

У задачі «розробка алгоритму» в більшості випадків використовують відомі методики, їх комбінування та різні підходи до реалізації для отримання необхідного результату. Для розв'язку задачі використовують методологію поетапного моделювання. Моделювання передбачає 3 етапи за використанням алгоритму декомпозиції, тобто розглядає задачу від глобального до детального [8, 12].

Результати

Перший етап. На першому етапі цієї реалізації проводять збір необхідної інформації для експерименту. Ця інформація може бути подана у вигляді статистики, наборів інтервалів або

в будь-якому іншому вигляді, лише з одним обмеженням, щоб цю інформацію можна було представити згідно з вимогами методики.

Вимоги до представлення інформації:

- інформацію про процес, який досліджують, представляють у вигляді ієрархічного дерева процесів, де кожен вузол має свій номер, а кожному вузлу ставлять умову, за якою система буде розуміти, куди просуватиметься процес у ході виконання алгоритму. Номер необхідний для розуміння місцеположення та формування шляху проходження цього дерева, приклад інтерпретації зовнішнього вигляду дерева наведено на рис. 2. Після завантаження вся структура має бути записана у відповідному вигляді для зчитування системою необхідної інформації та виконання необхідних дій, приклад запису вхідного файлу з правилами переходів наведено на рис. 3;

- інформація про час виконання кожного вузла або час, необхідний для переходу з одного вузла до іншого, повинна бути записана у окремий файл в відповідній формі, приклад файлу з указаним необхідним часом зображено на рис. 5;

- необхідно вказувати кількість повторень моделювання часу проходження отриманого ланцюга.

Для подальшої обробки те, яким шляхом було отримано ці дані, не є важливим, але для використання цього алгоритму на практиці на цьому етапі можна залучати автоматизовану систему. Завданням такої системи стає відстежування станів її об'єктів під час роботи та передачі цих даних для подальшої обробки. Тобто в перспективі можлива повна автоматизація системи з використанням цього алгоритму, за умови, що до процесу, який відстежують можна застосовувати автоматизований підхід [16, 17].

Другий етап. На цьому етапі відбувається подальша обробка інформації, отриманої на першому етапі.

Обробку виконують шляхом перевірки на відповідність вхідних даних і процесу та питання, як потрібно виконувати цей процес. Алгоритм на відповідність вхідних даних і процесу виконують за допомогою програми, написаної мовою Prolog. Як результат роботи програми будують дерево переходів, що відповідає

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

тим підпроцесам, які відбуваються в системі або об'єкті під час виконання процесу. Побудову дерева виконують за допомогою зворотнього ланцюга виводу. У результаті проходження цього етапу буде отримано проміжний результат у вигляді ланцюга переходів, приклад проміжного файлу із ланцюгом виконання операцій наведено на рис. 7.

Третій етап. На останньому етапі відбувається моделювання проходження цього фрагмента, який представлений ланцюгом перехо-

дів, отримання статистики часової ефективності процесу, його слабких місць і можливість порівняти результати, отримані під час моделювання та в реальному процесі, а також можливість спрогнозувати результати й дії у системі на майбутнє [14, 15].

Залежно від указанної кількості повторів результат може істотно відрізнятись, чим більша кількість повторів, тим точніший буде результат.

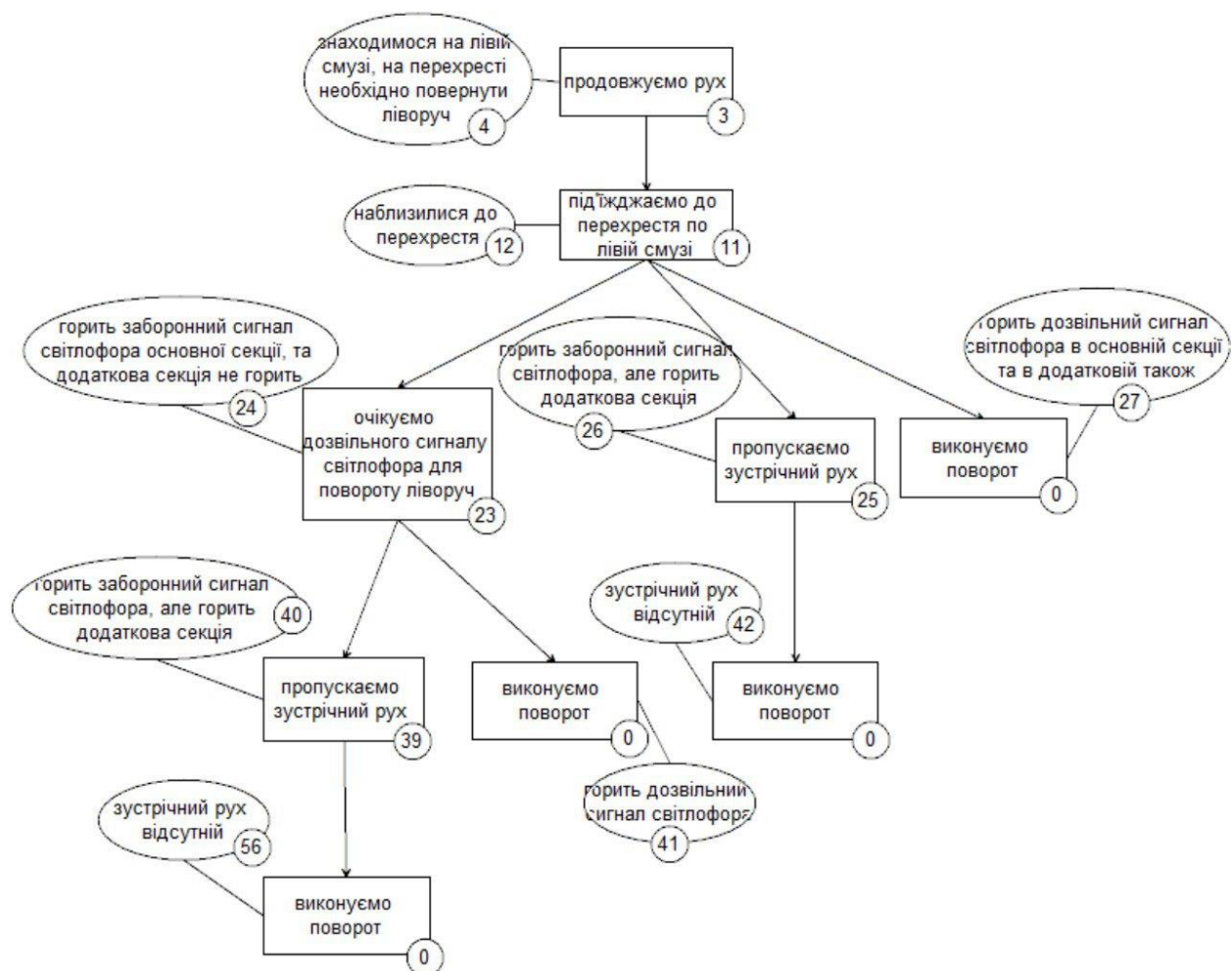


Рис. 2. Схема переходів у дереві ланцюга

Fig. 2. Scheme of transitions in the chain tree

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

```

rules.pl — Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка

%% база фактів
fact(1,'приближаемся к перекрестку',[2]).
fact(2,'видим впереди перекресток',[1]).
fact(3,'продолжаем движение',[1,4]).
fact(4,'находимся в левой полосе, на перекрестке необходимо повернуть налево',[1]).
fact(5,'включаем левый указатель поворота для перестроения',[1,6]).
fact(6,'находимся в правой полосе, на перекрестке необходимо повернуть на лево',[1]).
fact(7,'включаем правый указатель поворота для перестроения',[1,8]).
fact(8,'находимся в левой полосе, на перекрестке необходимо проехать прямо',[1]).
fact(9,'продолжаем движение',[1,10]).
fact(10,'находимся в правой полосе, на перекрестке необходимо проехать прямо',[1]).
fact(11,'подъезжаем к перекрестку в левой полосе',[3,12]).
fact(12,'приблизилась к перекрестку',[1]).
fact(13,'выполняем перестроение в левую полосу',[5,14]).
fact(14,'помеха слева отсутствует',[1]).
fact(15,'пропускаем попутный транспорт',[5,16]).
fact(16,'помеха слева присутствует',[1]).
fact(17,'пропускаем попутный транспорт',[7,18]).
fact(18,'помеха справа присутствует',[1]).
fact(19,'выполняем перестроение в правую полосу',[7,20]).
fact(20,'помеха справа отсутствует',[1]).
fact(21,'подъезжаем к перекрестку в правой полосе',[9,22]).
fact(22,'приблизилась к перекрестку',[1]).
fact(23,'ожидаем разрешающего сигнала светофора для поворота на лево',[11,24]).
fact(24,'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция не горит',[1]).
fact(25,'пропускаем встречное движение',[11,26]).
fact(26,'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция горит',[1]).
fact(27,'горит разрешающий сигнал светофора, дополнительная секция горит',[1]).
fact(28,'подъезжаем к перекрестку в левой полосе',[13,29]).
fact(29,'приблизилась к перекрестку',[1]).
fact(30,'выполняем перестроение в левую полосу',[15,31]).
fact(31,'помеха слева отсутствует',[1]).
fact(32,'выполняем перестроение в правую полосу',[17,33]).
fact(33,'помеха справа отсутствует',[1]).
fact(34,'подъезжаем к перекрестку в правой полосе',[19,35]).
fact(35,'приблизилась к перекрестку',[1]).
fact(36,'ожидаем разрешающего сигнала светофора для проезда по прямой',[21,37]).
fact(37,'горит запрещающий сигнал светофора',[1]).
fact(38,'горит разрешающий сигнал светофора',[1]).
fact(39,'пропускаем встречное движение',[23,40]).
fact(40,'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция горит',[1]).
fact(41,'горит разрешающий сигнал светофора',[1]).
fact(42,'встречный движение отсутствует',[1]).
fact(43,'ожидаем разрешающего сигнала светофора для поворота на лево',[28,44]).
fact(44,'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция не горит',[1]).
fact(45,'пропускаем встречное движение',[28,46]).
fact(46,'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция горит',[1]).
fact(47,'горит разрешающий сигнал светофора, дополнительная секция горит',[1]).
fact(48,'подъезжаем к перекрестку в левой полосе',[30,49]).
fact(49,'приблизилась к перекрестку',[1]).
fact(50,'подъезжаем к перекрестку в правой полосе',[32,51]).
fact(51,'приблизилась к перекрестку',[1]).

```

Рис. 3. Вид вхідного файлу

Fig. 3. View of input file

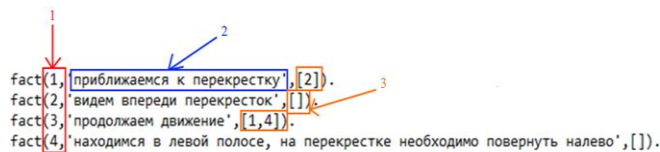


Рис. 4. Пояснення до рис. 3

Fig. 4. Explanation to Fig. 3

На рис. 4 наведено:

- 1 – номер вузла;
- 2 – опис вузла;
- 3 – пов'язані вузли.

```

time.txt — Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка

-1,60,600:8.авария на перекрестке
-2,60,420:4.авария на попутной полосе
-3,60,240:4.авария на встречной полосе
-4,10,120:25.тс с вкл спецсигналами
-5,10,240:20.неработает светофор
1,10,50
3,10,50,-1;-4;-5
5,2,10
7,2,10
9,10,50
11,10,50,-1;-4;-5
13,5,15,-4
15,5,15,-2;-4
17,5,15,-2,-4
19,5,15,-4
21,10,50,-1;-4;-5
23,5,130,-1;-5
25,5,50,-1;-3;-4
27,5,30
28,10,50,-1;-4;-5
30,10,20,-4
32,10,20,-4
34,10,50,-1;-4;-5
36,5,130,-1;-5
38,5,30
39,5,50,-1;-3;-4
41,5,30
42,5,30
43,5,130,-1;-5
45,5,50,-1;-3;-4
47,5,30
48,10,50,-1;-4;-5
50,10,50,-1;-4;-5
52,5,130,-1;-5
54,5,30
55,5,30
56,5,30
57,5,50,-1;-3;-4

```

Рис. 5. Файл із необхідним часом

Fig. 5. File with the required time

Легенду до рис. 5 наведено на рис. 6.

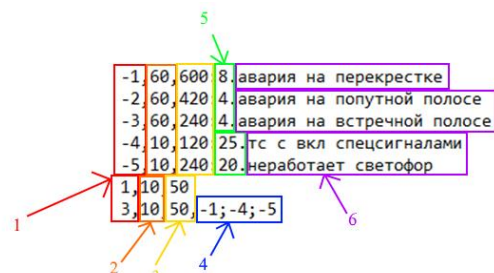


Рис. 6. Пояснення до рис. 5

Fig. 6. Explanation to Fig. 6

На рис. 6 наведено:

- 1 – номер вузла;
- 2 – початок інтервалу виконання;
- 3 – кінець інтервалу виконання;
- 4 – номер вузла вірогідної випадкової події;
- 5 – вірогідність виникнення події;
- 6 – пояснювальні коментарі.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

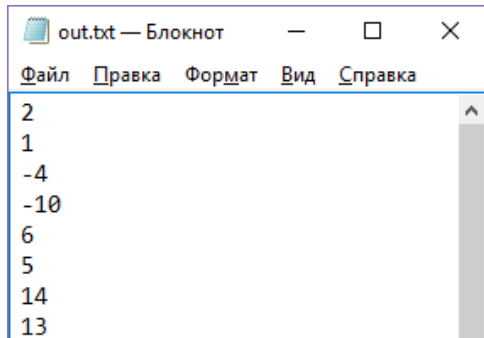


Рис. 7. Проміжний файл із ланцюгом виконання операцій

Fig. 7. Intermediate file with the chain of operations

Розроблена методика може бути використана для розв’язання прикладної задачі або дослідження складних технологічних процесів на підприємстві. Крім того, методика дозволяє моделювати складні процеси для отримання інформації про часову ефективність виконання технологічної операції, знаходження слабких місць у ній та закономірностей у виниканні випадкових подій, що можуть вплинути на операцію. Використання цього підходу може бути досить ефективним у рамках систем, у яких необхідний постійний контроль у режимі реального часу, оскільки цей підхід можна модифікувати додаванням наборів датчиків, що будуть постійно надсилати інформацію до системи, або доповнити додатковою системою, що буде надавати вже готові пакети інформації. Також цей підхід можна модифікувати для використання в мануальному режимі, шляхом модифікації системи створення та збору інформації,

необхідної для моделювання, а отримані результати використати під час побудови нового процесу або модифікації будь-якого іншого процесу. Також теоретично можливе використання цього підходу для роботи з бізнес-процесами, але для підтвердження цього необхідне більш детальне дослідження цього питання.

Наукова новизна та практична значимість

Новим у роботі є одночасне використання фізичного, математичного та імітаційного моделювання складних процесів із набором етапів їх реалізації.

Модель дозволяє будувати дерево рішень розв’язуваної задачі та аналізувати час виконання технологічної задачі в умовах випадкових подій.

Висновки

У цій статті запропоновано методику дослідження складних технологічних процесів та операцій на основі імітаційного програмування та поетапного моделювання.

Завдяки мові UML користувач має можливість описати технологічні процеси методом візуального програмування, а використання методики поетапного моделювання дозволить виділити об’єкти, наділити їх технологічними алгоритмами та переходами, у свою чергу імітаційне програмування дозволить змодельовувати ситуації для виділення окремих місць.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобровский В. И., Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., Малашкин В. В. *Функциональное моделирование работы железнодорожных станций* : монография. Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. Днепропетровск, 2015. 269 с.
2. Глушков В. М. *Синтез цифровых автоматов*. Москва : Физматлит, 1962. 476 с.
3. Горбова О. В. Формалізація технологічних процесів залізничних станцій на основі поетапного моделювання. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/181850>
4. Дозорцев В. М. Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Ч. 2. Компьютерные тренажеры реального времени. *Приборы и системы управления*. 1996. № 8. С.41–50.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

5. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Коробйова Р. Г. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіка. *Залізничний транспорт України*. 2008. № 4. С. 18–20.
6. Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., Малашкин В. В. Автоматизированное формирование функциональных моделей железнодорожных станций. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2014. № 8. С. 65–73.
7. Козаченко Д. Н. Объектно-ориентированная модель функционирования железнодорожных станций. *Наука та прогрес транспорту*. 2013. № 4 (46). С. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/16570>
8. Леоненков А. В. *Самоучитель UML*. Санкт-Петербург : БХВ–Петербург, 2002. 576 с.
9. Мальков М. В., Олейник А. Г., Федоров А. М. Моделирование технологических процессов: методы и опыт. *Труды КНЦ РАН*. 2010. № 3 (3). С. 93–101.
10. Петросов Д. А., Игнатенко В. А. Поэтапное моделирование технологических процессов с использованием интеллектуального структурно-параметрического синтеза. *Фундаментальные исследования*. 2017. № 12 (1). С. 97–102. DOI: <https://doi.org/10.17513/fr.41986>
11. Розин М. Д., Свичкарев В. П. Проблемы системного моделирования сложных процессов социального взаимодействия. *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 2. С. 609–618.
12. Bianco Vieri del, Lavazza L., Mauri M. A formalization of UML statecharts for real-time software modeling. URL: <https://cutt.ly/QeZxM3q>
13. Gorbova O. V. Modeling Work of Sorting Station Using UML. *Science and Transport Progress*. 2015. № 1 (55). P. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/38260>
14. Harel D. Statecharts: A visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*. 1987. Vol. 8. Iss. 3. P. 231–274. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-6423\(87\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0167-6423(87)90035-9)
15. Harel D. Statecharts: A visual formalisms. *Communications of the ACM*. 1988. Vol. 31. Iss. 5. P. 514–530.
16. Silva M., Colom J.-M., Julvez J., Mahulea C., Schuppen J. H., van Su R., ... Darondeau P. *On Modeling of Hierarchical and Distributed Discrete-Event Systems*. The DISC Project Perspective, 2007. 85 p.
17. Zimmermann A., Trowitzsch J. *Eine Quantitative Untersuchung des European Train Control System mit UML State Machines*. URL: <https://cutt.ly/HeZxV5r>

O. V. HORBOVA^{1*}, N. S. MURKOVYCH^{2*}

^{1*}Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

^{2*}Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail nikolay.murkovich@gmail.com, 0000-0002-1031-8245

Research of Complex Processes Based on Step-By-Step Modeling

Purpose. When solving practical problems that require the creation and further analysis of the model, an important criterion is the labour intensity of modeling. In this regard, the article is aimed at formalizing the modeling process and using the method of step-by-step modeling for the design of technological processes. This approach allows you to design processes and tasks according to the following stages: physical modeling, mathematical modeling, discrete computer modeling and simulation. **Methodology.** To solve the problem, a methodology of step-by-step modeling is used. The simulation involves 3 stages and uses the decomposition algorithm, i. e. considers the problem from global to detailed. At the first stage of this implementation, the necessary information is collected for the experiment. This information is presented in the form of statistics. In the second stage, further processing takes place, which is performed by checking the compliance of the input data and the process with the question of how this process should be performed. The last stage is the simulation of passages of this fragment, which is represented by a chain of transitions, obtaining statistics of time efficiency of this process, weaknesses of the process and the ability to compare the results obtained during modeling and in the real process, as well as the ability to predict future results and actions. **Findings.** The technique can be used to study complex technological processes in the enterprise. It allows modeling of complex processes to obtain information about the time efficiency of the technological operation, finding weaknesses in it and patterns in the occurrence of random events that may affect the operation. Using

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

this approach can be very effective in the systems that require constant real-time monitoring, as this tool can be modified by adding sensor kits that will constantly send information to the system or equip an additional system that will provide ready-made information packets. **Originality.** The method of step-by-step modeling of representation has been improved, which consists in the simultaneous use of physical, mathematical and simulation modeling of complex processes with a set of stages of their implementation. **Practical value.** The proposed technique is designed for step-by-step modeling of the technological process with the subsequent construction of simulation programming.

Keywords: technological process; simulation programming; technological process modeling; mathematical modeling

REFERENCES

1. Bobrovsky, V. I., Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V., & Malashkin, V. V. (2015). *Funktsionalnoe modelirovaniye raboty zheleznodorozhnykh stantsiy*: monografiya. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnepropetrovsk. (in Russian)
2. Glushkov, V. M. (1962). *Sintez tsifrovyykh avtomatov*. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
3. Gorbova, O. V. (2016). Formalization of the Technological Processes at Railway Stations Based on the Step-by-Step Modeling. *Science and Transport Progress*, 5(83), 71-80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/181850> (in Ukrainian)
4. Dozortsev, V. M. (1996). Dinamicheskoe modelirovaniye v optimalnom upravlenii i avtomatizirovannom obuchenii operatorov tekhnologicheskikh protsessov. Ch. 2. Kompyuternye trenazhery realnogo vremni. *Instruments and Systems*, 8, 41-50. (in Russian)
5. Kozachenko, D. M., Vernigora, R. V., & Korobyova, R. G. (2008). The Software Package for Simulation of Railway Stations Based on Plan-Schedule. *Railway Transport of Ukraine*, 4, 18-20. (in Ukrainian)
6. Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V., & Malashkin, V. V. (2014). Automated formation of functional models of railway stations. *Transport systems and transportation technologies*, 8, 65-73. (in Russian)
7. Kozachenko, D. M. (2013). Object-oriented model of railway stations operation. *Science and Transport Progress*, 4(46), 47-55. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/1657> (in Russian)
8. Leonov, A. V. (2002). *Samouchitel UML*. Saint Petersburg: BHV-Petersburg. (in Russian)
9. Malkov, M. V., Oleynik, A. G., & Fedorov, A. M. (2010). Modeling of technological processes: methods and experience. *Transactions Kola Science Centre*, 3(3), 93-101. (in Russian)
10. Petrosov, D. A., & Ignatenko, V. A. (2017). Step-by-modeling of technological processes with use of intelligent structural-parametric synthesis. *Fundamental research*, 12(1), 97-102. DOI: <https://doi.org/10.17513/fr.41986> (in Russian)
11. Rozin, M. D., & Svichkarov, V. P. (2012). Problemy sistemnogo modelirovaniya slozhnykh protsessov sotsialnogo vzaimodeystviya. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2, 609-618. (in Russian)
12. Bianco, Vieri del, Lavazza, L., & Mauri, M. A *formalization of UML statecharts for real-time software modeling*. Retrieved from <https://cutt.ly/QeZxM3q> (in English)
13. Gorbova, O. V. (2015). Modeling Work of Sorting Station Using UML. *Science and Transport Progress*, 1(55), 129-138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/38260> (in English)
14. Harel, D. (1987). Statecharts: a visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*, 8(3), 231-274. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-6423\(87\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0167-6423(87)90035-9) (in English)
15. Harel, D. (1988). Statecharts: A visual formalisms. *Communications of the ACM*, 31(5), 514-530. (in English)
16. Silva, M., Colom, J.-M., Julvez, J., Mahulea, C., Schuppen, J. H. van, Su, R., ... & Darondeau, P. (2007). *On Modeling of Hierarchical and Distributed Discrete-Event Systems*. The DISC Project Perspective. (in English)
17. Zimmermann, A., & Trowitzsch, J. *Eine Quantitative Untersuchung des European Train Control System mit UML State Machines*. Retrieved from <https://cutt.ly/HeZxV5r> (in German)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 01.10.21

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 629.4.027.11:669.14.017

О. І. БАБАЧЕНКО¹, Т. В. БАЛАХАНОВА², О. А. САФРОНОВА^{3*}, Г. А. КОНОНЕНКО⁴,
К. Г. ДЬОМІНА⁵

¹Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail A_Babachenko@i.ua, ORCID 0000-0003-4710-0343

²Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID 0000-0003-2493-218X

^{3*}Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail safronovaaa77@gmail.com, ORCID 0000-0002-4032-4275

⁴Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail perlit@ua.fm, ORCID 0000-0001-7446-4105

⁵Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Ак. Стародубова К. Ф., 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790 05 14, e-mail katya20@ua.fm, ORCID 0000-0001-9668-8169

Вплив методів гарячого деформування на пророблюваність металу за перерізом під час виробництва осьових заготовок

Мета. У роботі передбачено визначити вплив різних технологій виробництва чорнових залізничних осей із вуглецевої сталі марки F на особливості пророблення структури за перерізом для підвищення якості виготовлення залізничних осей на вітчизняних підприємствах. **Методика.** Проаналізовано чотири технології виготовлення чорнових залізничних осей. Особливість дослідження полягала в тому, що технології відрізнялися тільки схемою деформування. При цьому розміри вихідних безперервнолитих заготовок та отриманих із них чорнових осей були однакові для всіх режимів деформації. Хімічний склад і температури деформації також не відрізнялись. Як основну металографічну характеристику, що дозволяє оцінити ступінь деформаційного пророблення чорнових осей за перерізом, було взято щільність слідів дендритної структури. Аналіз проведено на темплетях, вирізаних із кожного перерізу осі. Пророблення металу оцінено за трансформацією слідів дендритної структури (ліквацийних ділянок). Дендритну структуру, а саме її щільність, визначено як кількість дендритів на 1 мм² площі шліфа, а для точного розрахунку розміру дендрита заміри здійснено мінімум по двох осях овала – великій і малій. **Результати.** Показано, що попри значний ступінь вковування осьових заготовок із вуглецевої сталі під час застосування різних схем деформування їх пророблення за перерізом суттєво відрізняється. Визначено найбільш ефективну технологію виготовлення чорнових залізничних осей із вуглецевої сталі марки F із точки зору пророблення за перерізом прокату та оцінено вплив кожного з досліджених способів деформації. Установлено найбільший і найменший коефіцієнти пророблюваності осьової заготовки в разі застосування різних методів деформаційного впливу. **Наукова новизна.** Виявлено технологію виготовлення чорнових залізничних осей, яка забезпечує найбільш рівномірне пророблення прокату за перерізом. **Практична значимість.** Визначення коефіцієнта пророблюваності необхідне для кількісної оцінки впливу гарячої деформації та встановлення закономірності формування щільності дендритних слідів у напрямку від поверхневих до центральних шарів заготовки.

Ключові слова: залізнична вісь; деформаційне пророблення; безперервнолита заготовка (БЛЗ); мікроструктура; дендритна структура; коефіцієнт витяжки

Вступ

Удосконалення технології виробництва та якості залізничних осей, попри столітній досвід проведених робіт, не втрачає своєї актуальності. На вітчизняних підприємствах проводять роботи як із підвищення якості осевого металу, так і з оптимізації технологічних схем виробництва готових осей.

Найчастіше основним показником розробки маршрутних схем виробництва металопрокату є нормування браку, зниження витрати металу і трудовитрат під час прокатки і, звичайно ж, обов'язкове дотримання вимог відповідної нормативної документації.

Як показує досвід виробництва [3–4], вимоги за механічними властивостями, хімічним складом, середнім параметрам мікроструктури, як правило, виконують. Основний відсоток браку припадає на наявність внутрішніх дефектів, які виявляють за допомогою ультразвукової діагностики і контролю макроструктури, якості поверхні і, в дещо меншій мірі, однорідності мікроструктури [15, 18]. Усі ці властивості перебувають у прямому зв'язку із сумарним обтисненням металу в процесі деформації та залежать від вихідної якості зливків [2, 5].

Істотне підвищення якості поверхні прокату й зниження витрат металу було реалізовано під час переходу від зливків, відлитих у виливниці, до безперервного відливання заготовок однак у цьому разі ще більш актуальним є питання поліпшення якісних характеристик макроструктури. Адже, незважаючи на нижчу бальність дефектів безперервнолитого металу (що зумовлено геометрією, швидкістю твердіння та зовнішнім впливом на формування безперервнолитих заготовок (БЛЗ) під час кристалізації), важливу роль відіграє не тільки ступінь ущільнення металу, але й рівномірність пророблення структури за перерізом прокату [4–6, 13, 16–17].

Здебільшого під поняттям пророблення розуміють зміну щільності металу, яка найчастіше визначає якість макроструктури. Наприклад, у роботі [9] автори застосовують лише такий показник, як коефіцієнт витяжки. Проте пророблення, або пророблюваність, – це насамперед роздроблення первинної дендритної структури

литого металу в процесі деформації початкового зливка [11–12].

Поліпшення пророблення металу заготовки під час гарячої пластичної деформації сприяє не тільки «заварюванню» деяких внутрішніх дефектів, а й формуванню сприятливого фону хімічної неоднорідності, який після проведення термічної обробки забезпечує однорідну й дрібнозернисту мікроструктуру вуглецевої сталі [7, 11, 14].

Знання про проникнення деформації стиснення дозволить визначити оптимальний режим виготовлення залізничних осей.

Мета

У роботі передбачено провести аналітичні дослідження різних деформаційних способів виготовлення чорнових залізничних осей і встановити, за якої зі схем досягається найкраща деформаційна пророблюваність за перерізом прокату.

Методика

У ході дослідження розглянуто чотири способи деформування залізничних осей. Унікальність цього експерименту полягала в тому, що розміри вихідних БЛЗ Ø 470 мм та отриманих із них осевих заготовок (ОЗ) Ø 260 мм були однакові для всіх режимів деформації. Це дозволило оцінити вплив кожного з досліджених способів деформування на пророблення перерізу деформованих осевих заготовок.

Хімічний склад усіх залучених для роботи плавів осевої сталі марки F наведено в табл. 1.

Аналіз темплетів осевих заготовок показав, що їх макроструктура в розглянутому перерізі є щільною та однорідною будову й має низький рівень осевої ліквациї. Ступінь розвитку осевої ліквациї (шкала 2 СОУ МПП 77.040 – 191: 2007) складає не більше одного бала в поперечному та поздовжньому темплетях. Тобто параметри осевої ліквациї залишилися незмінними. Не спостерігаються такі дефекти макроструктури, як центральна пористість (усадні раковини) й надмірна ліквация. Слід зауважити, що ці дефекти є неприпустимими згідно з вимогами стандарту ААР М 101.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних плавок сталі марки F

Table 1

Chemical composition of the studied heats of F steel grade

№ плавки	Вміст елементів, % мас.												
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	V	[H] ppm
1	0,48	0,66	0,20	0,014	0,004	0,09	–	0,08	0,018		–	0,040	1,35
3	0,49	0,84	0,20	0,010	0,002	0,09	–	0,12	0,024	0,170	–	0,040	1,54
2	0,50	0,80	0,19	0,011	0,001	0,10	≤ 0,010	0,10	0,028	0,150	≤ 0,005	≤ 0,005	–
Сталь марки F	Вимоги AAR M – 101												
	0,45	0,70	min	max	max	–	–	–	–	–	–	–	–
	– 0,59	– 1,00	0,15	0,045	0,050								

Для отримання чорнової осі (осьової заготовки) Ø 260 мм деформацію вихідної БЛЗ Ø 470 мм здійснювали за різними способами. Інформація щодо обладнання, способів деформування та застосованих режимів, наведена в табл. 2.

Для визначення пророблення металу за перерізом прокату було використано оцінювання пророблення осьових заготовок за трансформацією слідів дендритної структури [1, 12], яка набуває все більшої популярності. Переваги цієї методики цілком очевидні – відносна простота виготовлення зразків. Для виявлення структури було застосовано гарячий розчин пікрату натрію, адаптований до складу вуглецевих сталей. На наш погляд, він більш чітко дозволяє виявити первинну структуру середньовуглецевої осьової сталі, ніж його аналоги [10, 12]. Металографічний аналіз виконано на світловому мікроскопі «Axiovert 200 M MAT» виробництва фірми «Carl Zeiss». Підрахунок розмірів ділянок попередньої дендритної структури виконано методом вимірювання довжин хорд у програмі «AxioVision 4.6.3» в напівавтоматичному режимі.

Автори роботи під час аналізу дендритної структури пропонують оперувати не поняттям «лінійні елементи», а «площинні фігури», тобто щільність дендритної структури визначати як кількість дендритів N , зосереджених на 1 мм² площі шліфа металографічного зразка. Із кожного перерізу відбирали 6 зразків, які на рівномірній відстані один від одного дозволили охопити весь переріз безперервнолитих та осьових заготовок (від поверхні до центру).

Попри те, що в мікроструктурі досліджуваної БЛЗ і в поздовжньому, і в поперечному перерізі дендритні осі мають форму овала (рис. 1), для спрощення методики аналізу за форму дендритної осі в будь-якому перерізі БЛЗ і в поперечному перерізі прокату взято коло. Для точного визначення розміру дендриту D заміри його осі потрібно виконувати мінімум по двох (великій і малій) осях овала. На цьому етапі й надалі середній розмір дендритної структури D взято як суму середніх розмірів дендритної осі 1 або 2-го порядку (ділянок без видимої ліквіації) й міждендритного простору (ліквіаційної ділянки).

Таблица 2

Маркування та опис зразків безперервнолитих осьових заготовок

Table 2

Marking and description of samples of continuously cast axle billets

№ способу деформування осьової заготовки	№ плавки	Розмір заготовки. Спосіб гарячої деформації. Обладнання. Підприємство
—	1	БЛЗ Ø 470 мм. Розливання сталі на криволінійно-радіальній МБЛЗ № 2 (базовий радіус – 12 метрів) та одержання литої заготовки Ø 470 мм. ТОВ «МЗ» ДНПРОСТАЛЬ»
1	1	Осьова заготовка Ø 260 мм. Поздовжня прокатка на пілігримовому стані № 2 ТПА 5 – 12" в ТПЦ № 4. Маршрут: Ø 470 → Ø 260 мм. ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ»
2	3	Осьова заготовка Ø 260 мм. Протягання в комбінованих бойках (верхній плоский, нижній вирізний) на пресі зусиллям 20 МН. Маршрут: Ø 470 → Ø 350 → Ø 260 мм. ТОВ «ДНПРОПРЕС СТАЛЬ»
3	2	Осьова заготовка Ø 260 мм. Поздовжня прокатка на ТЗС900/750–3 в прокатному цеху. Маршрут у кліті 900: Ø 470 → Ø 260 мм, 13 проходів. ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»
4	2	Осьова заготовка Ø 260 мм. Вільне кування на плоских бойках по всій довжині заготовки, режим № 2 – $\Delta h = 40 - 45$ мм, 5 кантувань / поворотів. Молот кувальний пароповітряний 3 150 кг (0,031 МН). Маршрут: Ø 470 → Ø 260 мм. Ремонтно-механічний цех (РМЦ) ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ»

Щільність дендритної структури N сталі марки F у напрямку від поверхневих до центральних шарів БЛЗ зменшується в 7,2 раза, без урахування значень щільності дендритів у вузькій кірковій зоні. Таким чином, у разі зниження інтенсивності тепловідведення збільшується середній розмір дендритів. Далі в роботі саме щільність слідів дендритної структури, у зв'язку зі своєю інформативністю, використано як основну металографічну характеристику, що дозволяє оцінити ступінь деформаційного пророблення сталі. Середня за зразками заготовки щільність дендритної структури розрахована без розгляду її значення в поверхневій зоні мінімальних рівновісних дендритів або зростання наявних дендритів з осями вищого, ніж 1 і 2-ий, порядків.

Результати

Об'ємна частка ліквіаційних ділянок (попередніх міждендритних просторів) у міру просування від поверхні до центральної частини за-

готовки, що складається з великих рівновісних дендритів, збільшується від 20,0 до 30,0 %. Але поблизу теплового центра БЛЗ спостерігається різке зменшення кількості ліквіаційних ділянок (рис. 1, d , e), що безпосередньо пов'язано з особливостями протікання процесу об'ємної кристалізації, зокрема з термкінетичними умовами її затвердіння.

Для отримання картини розподілу деформації по перерізу осьових заготовок Ø 260 мм проаналізуємо, як після гарячої прокатки та вільного кування змінилася щільність слідів дендритної структури. Як було сказано вище, під час розробки методу оцінки деформованого стану металу найінформативнішим показником змін, яких дендритна структура зазнає в разі впливу різних факторів, є щільність її слідів.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

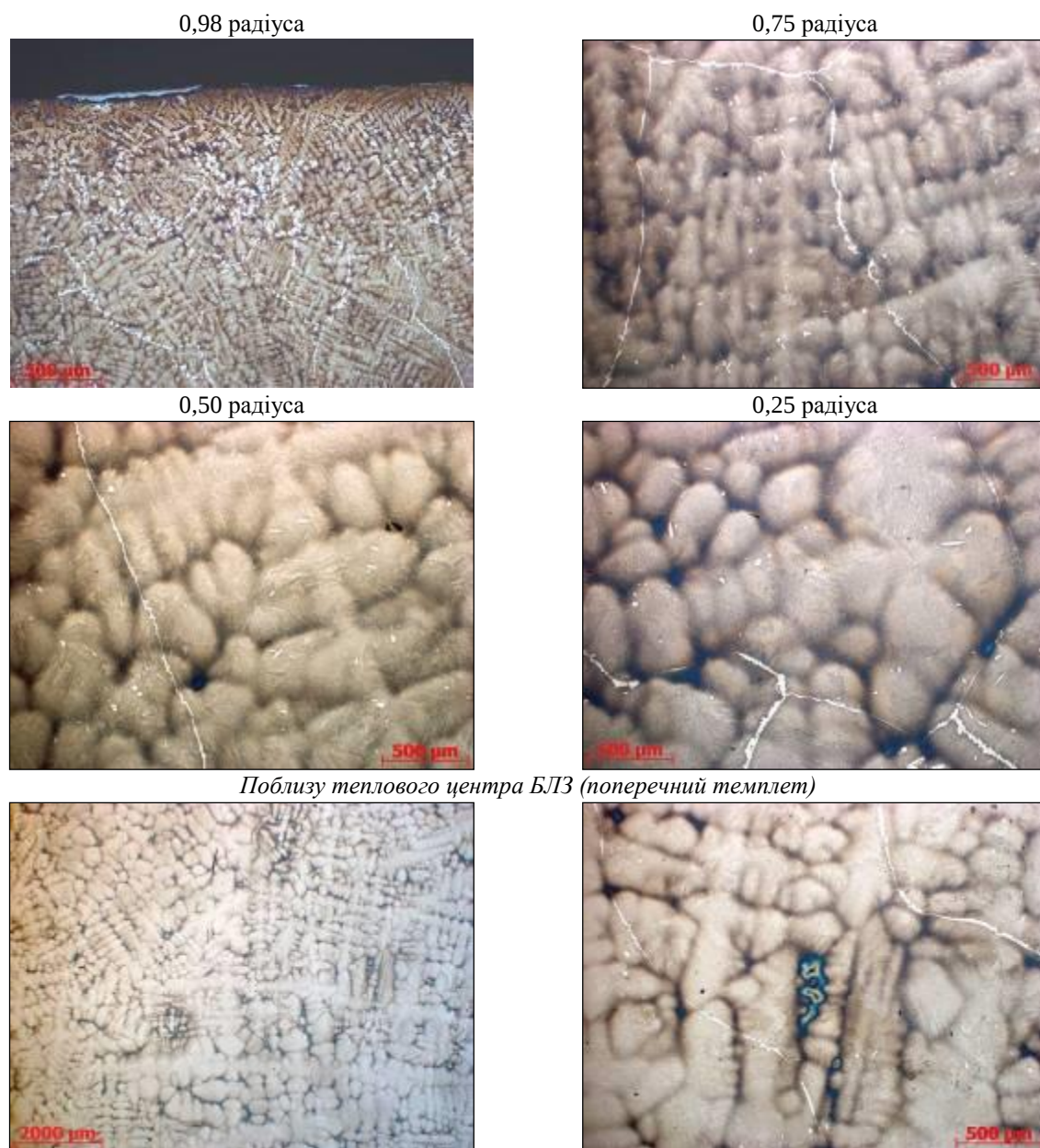


Рис. 1. Сліди дендритної структури в зразках вихідної БЛЗ Ø 470 мм, плавка № 1

Fig. 1. Traces of dendritic structure in samples of the original continuously cast billet Ø 470 mm, heat no. 1

На рис. 2 наведено фото структури кожного шару зразків БЛЗ Ø 470 мм (до деформації) та осевих заготовок Ø 260 мм (після деформації) зі слідами дендритної структури. Помітно, що після прокатки й кування тенденція зміни як виду дендритів (дрібні рівновісні, стовпчасті, великі рівновісні), так і щільності слідів попередньої дендритної структури за перерізом деформованих заготовок аналогічна характеру її

зміни в поперечному перерізі литої заготовки до деформування. У міру віддалення від поверхні до центра заготовки щільність слідів дендритної структури зменшується. Розглянемо, яких змін зазнала дендритна структура сталі марки F за різних способів гарячої деформації БЛЗ Ø 470 мм. Найпомітніші сліди дендритної структури в мікроструктурі вуглецевої сталі марки F до і після деформації показані на рис. 2.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

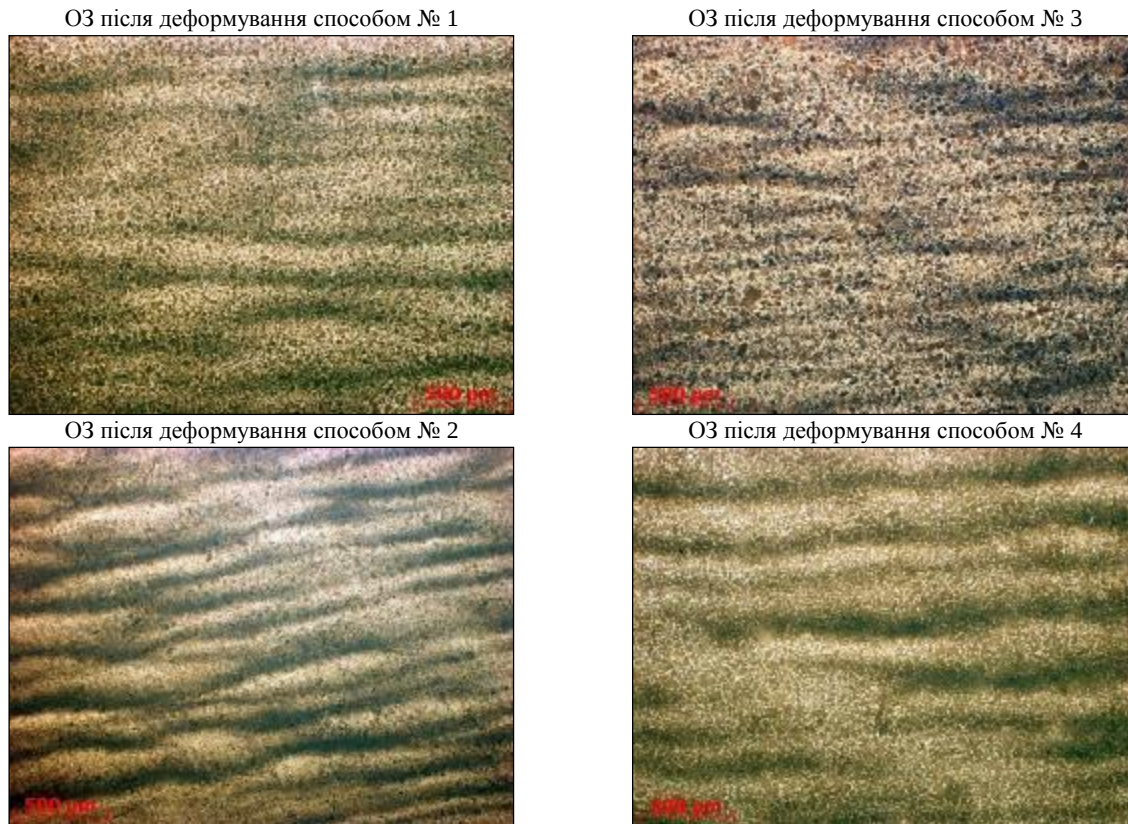


Рис. 2. Сліди попередньої дендритної структури у зразках, вирізаних на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса осової заготовки $\varnothing 260$ мм, $\times 50$

Fig. 2. Traces of the previous dendritic structure in the samples cut at a distance $\frac{1}{2}$ of the radius of the axle billet $\varnothing 260$ mm $\times 50$

Для кількісної оцінки впливу гарячої деформації на щільність слідів дендритної структури визначена величина її ущільнення C (від англ. *compaction* – ущільнення, стиснення, пресування):

$$C = \frac{N_2}{N_1},$$

де N_1 – щільність слідів дендритної структури в початковому стані (до деформації); N_2 – щільність слідів дендритної структури в деформованому стані.

На нашу думку, цей параметр характеризує, як у процесі прокатки й протягання відбувається природна витяжка кожного аналізованого шару заготовки і наскільки її величина відрізняється від коефіцієнта фактичної витяжки λ . Зміна ущільнення слідів дендритної структури за перерізом усіх досліджуваних заготовок має

однаковий характер: у міру віддалення від поверхні заготовки його значення збільшуються, досягають максимальних значень на відстані $\frac{1}{2}$ радіуса (після протягання на пресі – на відстані $\frac{3}{4}$ радіуса заготовки) та зменшуються в центральних шарах.

У роботах [14, 15] за критерій оцінки методу визначення пророблюваності структури взято коефіцієнт витяжки λ – відношення площі поперечного перерізу заготовки до і після прокатки. Для встановлення залежності ущільнення структури в процесі деформації від величини фактичної витяжки запропонований коефіцієнт пророблюваності слідів дендритної структури K , який визначають за формулою:

$$K = 1 - \delta_\lambda,$$

де δ_λ – відхилення значення ущільнення слідів дендритної структури щодо коефіцієнта витяжки λ .

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Якщо $K < 1$, то структура металу в цих шарах заготовки не зазнає особливого деформаційного впливу. Якщо $K > 1$, то структура металу заготовки в таких мікрообсягах перебуває в зоні інтенсивної пластичної деформації. Отримані результати цілком узгоджуються з описом розподілу зон деформації в її осередку під час прокатки «високих» тіл [8]. Очевидно, що мала деформація є і, як наслідок, мале ущільнення слідів дрібних дендритних кристалів у поверхневому шарі – це наслідок наявності зони прилипання, вузької області утрудненої деформації під час контакту поверхні заготовки з прокатними валками.

Зміна коефіцієнта пророблюваності структури K за перерізом осевої заготовки після протягання в комбінованих бойках на гідравлічному пресі зусиллям 20 МН показує, що в зоні інтенсивної пластичної деформації структура пророблена краще, ніж в аналогічних шарах ОЗ після прокатки на пілігримових станах. Але для ОЗ, отриманих куванням, зона інтенсивної пластичної деформації зосереджена на відстані від 75 до 50 % радіуса заготовки.

За результатами аналізу макроструктури та слідів дендритної структури можна зробити висновок, що режим деформування заготовки, реалізований в умовах ТОВ «ДНІПРОПРЕС СТАЛЬ» під час протягання в комбінованих бойках преса 20 МН (2 000 тонн), дозволяє досягати максимального пророблення на певній глибині кування. Але, як зазначає низка дослідників, деформування круглої заготовки в нижньому кутовому (вирізнному) й верхньому плоскому бойках є одним із найбільш раціональних варіантів процесу кування, оскільки його застосування знижує ймовірність утворення осевих тріщин, підвищує інтенсивність процесу протягання, величину подачі металу в бойки й величину вковування λ . Варіацією технологічних параметрів процесу протягання в комбінованих бойках (кут вирізу бойка й кут кантування, величина відносної подачі і відносного обтискання та ін.) можна досягти рівномірного пророблення металу по перерізу поковки. Загалом розглянутий у цій роботі варіант протягання початкової литої заготовки за маршрутом $\varnothing 470 \rightarrow \varnothing 350 \rightarrow \varnothing 260$ мм забезпечив серед-

ній за перерізом коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,64$. Таке пророблення металу в процесі гарячої деформації осевої заготовки є слабшим порівняно з поздовжньою прокаткою на трубозаготівельному стані ТЗС 900 / 750 – 3 (середній за перерізом коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,99$) і на пілігримовому стані № 2 ТПА 5 – 12" (середній за перерізом коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,89$). Але водночас коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,64$ – це найкращий результат під час отримання осевих заготовок методом кування.

Зіставлення значень коефіцієнта пророблюваності структури K осевих заготовок, отриманих протяганням у комбінованих бойках та методом вільного кування в напрямку від центра до поверхні, починаючи від 50 % радіуса, дозволяє стверджувати, що краще пророблення цієї частини ОЗ відбувається під час протягання на пресі. Так, значення коефіцієнта K на відстані 50, 75, 90 і 98 % радіуса ОЗ після протягання на пресі більше ніж в ОЗ після вільного кування відповідно (точки 1–4 на рис. 3).

Імовірно, у центральних шарах дія стискальних напружень слабшає, і макропластична деформація реалізується в основному за рахунок витягування заготовки в осевому напрямку.

Зміну коефіцієнта пророблюваності K слідів дендритної структури вуглецевої сталі марки F за перерізом осевих заготовок $\varnothing 260$ мм показано на графіках (рис. 3). Зазначені графіки демонструють, що зона інтенсивної пластичної деформації поширюється від поверхні до середини радіуса заготовок. Можна вважати, що центральні шари заготовок у процесі поздовжньої прокатки й протягання не зазнали особливого деформаційного впливу і, як наслідок, виявилися недостатньо «проробленими».

Наукова новизна та практична значимість

У роботі проаналізовано чотири способи деформації залізничних осей і встановлено, що в разі поздовжньої прокатки на трубозаготівельному стані ТЗС 900 / 750 – 3 за дослідним режимом деформації досягається найбільший коефіцієнт пророблюваності за перерізом осевої заготовки.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

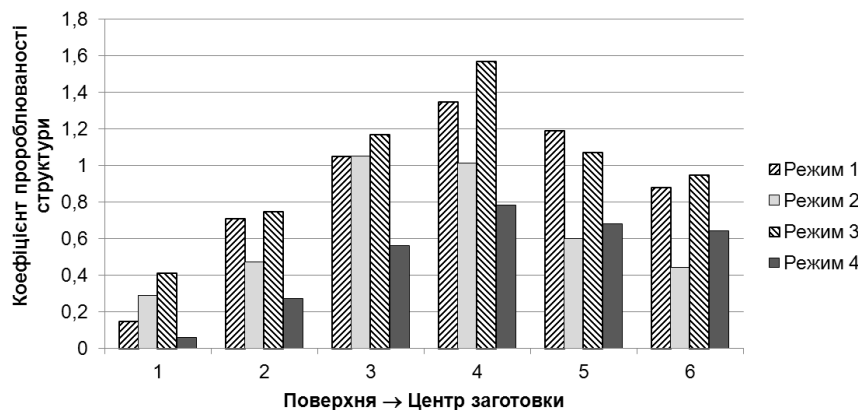


Рис. 3. Зміна коефіцієнта пророблюваності структури за перерізом осевих заготовок Ø 260 мм зі сталі марки F

Fig. 3. Change in the structure workability coefficient on the cross section of the axial billets Ø 260 mm of F steel grade

Висновки

1. Розглянуто вплив технології виробництва на особливості структури всього перерізу чорнових осей із вуглецевої сталі марки F, виготовлених відповідно до вимог стандарту ААР М – 101. Установлено закономірність формування дендритної структури за перерізом досліджуваної БЛЗ Ø 470 мм. Середня товщина дендритних гілок у напрямку від поверхні до центральних шарів БЛЗ змінюється від 50,0 до 370,0 мкм.

2. Установлено, що щільність слідів дендритної структури сталі марки F в напрямку від поверхневих до центральних шарів БЛЗ Ø 470 мм без урахування значень щільності дендритів у вузькій кірковій зоні зменшується в 7,2 раза. Таким чином, щільність слідів дендритів у напрямку від поверхні до центра БЛЗ повною мірою визначає характер зміни інтенсивності тепловідведення.

3. З'ясовано, що найкраща пророблюваність структури початкової литої заготовки Ø 470 мм була досягнута в процесі поздовжньої прокатки на трубозаготівельному стані ТЗС 900 / 750 – 3 за дослідним режимом деформації. Середній за перерізом коефіцієнт пророблюваності структури $K = 0,99$. Поздовжня прокатка на пілігримовому стані № 2 ТПА 5 – 12" за один прохід із використанням нового овального калібрування робочої частини прокатних валків забезпечила пророблюваність структури вуглецевої сталі марки F на рівні $K = 0,89$. Протягання на гідравлічному пресі зусиллям 20 МН (2 000 тонн) за два проходи – на рівні $K = 0,64$. І нарешті, найнижче значення $K = 0,32$ – середній за перерізом осевої заготовки Ø 260 мм коефіцієнт пророблюваності структури вуглецевої сталі марки F – отримано в результаті кування вихідної литої заготовки Ø 470 мм на пароповітряному молоті зусиллям 0,031 МН (3,150 тонн).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левченко Г. В., Дёмина Е. Г., Воробей С. А., Нефедьева Е. Е., Мединский Г. А. Оценка деформированного состояния металла по изменению параметров дендритной структуры. *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. 2009. № 5. С. 72–75.
2. Паламар Д. Г., Воробей С. О., Раздобреєв В. Г., Балаханова Т. В. Дослідження нерівномірності механічних властивостей по перерізу безперервнолитих заготовок. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2018. № 32. С. 250–258.
DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2018-32-250-258>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

3. Панченко А. И., Кийко С. Г., Гасик М. И., Сальников А. С., Левченко Г. В., Горобец А. П., Климчик Ю. В. Современные технологии выплавки и разливки стали ЕА1N для производства железнодорожных осей. *Современная электрометаллургия*. 2019. № 2. С. 35–42.
DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.02.06>
4. Петренко Ю. П., Мюнх В. Ф., Богатов А. А., Витькин Д. А. Анализ влияния технологических схем деформации на качество осевого металла ОАО НТМК. *Металлург*. 2009. № 10. С. 181–187.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-010-9224-2>
5. Правосудович В. В., Сокурено В. П., Данченко В. Н., Кондратьев С. В., Ключник Ю. А., Панюшкин Е. Н. *Дефекты стальных слитков и проката* : справочное издание. Москва : Интермет Инжиниринг, 2006. 384 с.
6. Снитко С. А., Яковченко А. В., Сотников А. Л. Влияние схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного прессы и износ инструмента деформации. *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2018. № 61 (5). С. 385–392. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-385-392>
7. *Способ исследования течения металла при горячей объемной штамповке изделий*: пат. 2506138С2 РФ: МПК В21J 5/02 (2006.01) G01N 3/28. № 2012113089; заявл. 03.04.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 4.7 с.
8. Тарновский И. Я., Поздеев А. А., Ляшков В. Б. *Деформация металла при прокатке*. Свердловск : Металлургиздат, 1956. 287 с.
9. Энгельман В., Фосс Х., Кольп Р. Обрабатываемость давлением заготовок непрерывной разливки. *Чёрные металлы*. 1967. № 17. С. 27–34.
10. Basso A., Toda-Caraballo I., San-Martín D., Caballero F.G. Influence of cast part size on macro- and microsegregation patterns in a high carbon high silicon steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 3013–3025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.052>
11. Delgado P., Cuesta I. I., Alegre J. M., Díaz A. State of the art of Deep Rolling. *Precision Engineering*. 2016. Vol. 46. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.05.001>
12. Ennis B. L., Jimenez-Melero E., Mostert R., Santillana B., Lee P. D. The role of aluminium in chemical and phase segregation in a TRIP-assisted dual phase steel. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 115. P. 132–142.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.046>
13. Fonseca L., Faria A. Energy balance approach to analyze crankshaft deep rolling simulation results. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. 2017. P. 1–9.
DOI: <https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2017.cob17-0606>
14. Galkin S. P., Aleschenko A. S., Romantsev B. A., Gamin Yu. V., Iskhakov R. V. Effect of Preliminary Deformation of Continuously Cast Billets by Radial-Shear Rolling on the Structure and Properties of Hot-Rolled Chromium-Containing Steel Pipes. *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. Iss. 1–2. P. 185–195.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01147-4>
15. Guanzhen Zh., Ruiming R. Study on typical failure forms and causes of high-speed railway wheels. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 105. P. 1287–1295.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.063>
16. Mos'pan V. V., Medinskii G. A., Levchenko G. V., Gritsai T. V., Nefed'eva, E. E. Structure formation in steel 45 for railroad axles at high temperatures. *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. Iss. 7. P. 597–599.
DOI: <https://doi.org/10.3103/s0967091212070066>
17. Yershov S., Levchenko G., Wu K., Zhou W., Rui K. The development of a new deformation regime for microstructure refinement in solid railway axles by hot deformation optimization. *Теорія і практика металургії*. 2020. № 1 (124). P. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2020.01>
18. Zoran O. Analysis of the railway freight car axle fracture. *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 4. P. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.009>

O. I. BABACHENKO¹, T. V. BALAKHANOVA², O. A. SAFRONOVA^{3*},
H. A. KONONENKO⁴, K. H. DOMINA⁵

¹Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790 05 14, e-mail A_Babachenko@i.ua, ORCID 0000-0003-4710-0343

²Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID 0000-0003-2493-218X

^{3*}Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790 05 14, e-mail safronovaaa77@gmail.com, ORCID 0000-0002-4032-4275

⁴Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790 05 14, e-mail perlit@ua.fm, ORCID 0000-0001-7446-4105

⁵Dep. «Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems», Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubova K. F. Sq., 1, 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 790 05 14, e-mail katya20@ua.fm, ORCID 0000-0001-9668-8169

Impact of Hot Deformation Methods on Metal Workability along the Section During the Production of Axle Billets

Purpose. The work is aimed to determine the influence of various technologies for the production of rough railroad axles from F grade carbon steel on the workability features along the section in order to improve the quality of railway axles at domestic enterprises. **Methodology.** Four production technologies of the rough railway axles were analyzed. The peculiarity of the study was that the technologies differed only in the deformation pattern. The dimensions of the initial continuously cast billets and the resulting rough axes were the same for all deformation modes. The chemical composition and temperature of deformation also did not differ. The density of traces of the dendritic structure was taken as the main metallographic characteristic, which makes it possible to assess the degree of deformation workability of the rough axes along the section. The analysis was performed on templates cut from each section of the axle. The workability of the metal was assessed by the transformation of traces of the dendritic structure (liquation areas). The dendritic structure, namely its density, was determined as the number of dendrites per 1 mm² of the microsection area, and to accurately calculate the dendrite size, measurements were made at least along two ellipse axes—large and small. **Findings.** It is shown that, despite a significant degree of forging of axle billets made of carbon steel, when using different deformation schemes, their workability along the section differs significantly. The most effective production technology of rough railroad axles from F grade carbon steel has been determined from the point of view of workability along the section of rolled stock, and the impact of each of the investigated deformation methods has been assessed. The largest and the smallest workability coefficients of the axle billet have been established when using various methods of deformation impact. **Originality.** The production technology of rough railway axles has been determined, which ensures the most uniform workability of rolled products along the section. **Practical value.** The workability factor for a quantitative assessment of the effect of hot deformation was determined and the formation pattern of the dendritic traces' density in the direction from the surface to the central layers of the workpiece was established.

Keywords: railway axle; deformation workability; continuously cast billet' microstructure; dendritic structure; elongation ratio

REFERENCES

1. Levchenko, G. V., Dyomina, E. G., Vorobej, S. A., Nefed'eva, E. E., & Medinskij, G. A. (2009). Ocenka deformirovannogo sostojanija metalla po izmeneniju parametrov dendritnoj struktury. *Metallurgical and mining industry*, 5, 72-75. (in Russian)
2. Palamar, D. G., Vorobey, S. A., Razdobreev, V. G., & Balahanova, T. V. (2018). Investigation of the unevenness of mechanical properties along the cross-section of continuously cast billets. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 32, 250-258.
DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2018-32-250-258> (in Ukrainian)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

3. Panchenko, A. I., Kijko, S. G., Gasik, M. I., Salnikov, A. S., Levchenko, G. V., Gorobets, A. P., Projdak, Yu. S., & Klimchuk, Yu. V. (2019). Modern technologies of melting and casting of steel EA1N for production of railway axles. *Sovremennââ Ëlektrometallurgîâ*, 2019(2), 35-42.
DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.02.06> (in Russian)
4. Petrenko, Y. P., Myunkh, V. F., Bogatov, A. A., & Vit'kin, D. A. (2009). Analysis of the effect of deformation scheme on the quality of axle steel at the nizhniy tagil metallurgical combine. *Metallurgist*, 53(9-10), 627-632. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-010-9224-2> (in Russian)
5. Pravosudovich, V. V., Sokurenko, V. P., Danchenko, V. N., Kondrat'ev, S. V., Klyushnik, Yu. A., & Panyushkin, E. N. (2006). *Defekty stalnykh slitkov i prokata: spravocnoe izdanie*. Moscow: Intermet Inzhiniring. (in Russian)
6. Snitko, S. A., Yakovchenko, A. V., & Sotnikov, A. L. (2018). Influence of Wheel Billet Stamping Schemes on Power Modes of Forming Press Operation And on Wear of the Deformation Tool. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 61(5), 385-392. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-385-392> (in Russian)
7. Astashchenko, V. I., Ishchenko, V. I., Shveyov, A. I., Shveyova, T. V., Martyugin, V. S., & Mahonin, V. V. (2014). *RU Patent № 2506138 Fyedyeralnaya Sluzhba po Intyellyektualnoy Sobstvyennosti*. (Rospatent)
8. Tarnovskiy, I. Ya., Pozdeev, A. A., & Lyashkov, V. B. (1956). *Deformatsiya metalla pri prokatke*. Sverdlovsk: Metallurgizdat. (in Russian)
9. Jengel'man, V., Foss, H., & Kol'p, R. (1967). Obrabatyvaemost' davleniem zagotovok nepreryvnoj razlivki. *Chjornye metally*, 17, 27-34. (in Russian)
10. Basso, A., Toda-Caraballo, I., San-Martín, D., & Caballero, F. G. (2020). Influence of cast part size on macro- and microsegregation patterns in a high carbon high silicon steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3013-3025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.052> (in English)
11. Delgado, P., Cuesta, I. I., Alegre, J. M., & Díaz, A. (2016). State of the art of Deep Rolling. *Precision Engineering*, 46, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.05.001> (in English)
12. Ennis, B. L., Jimenez-Melero, E., Mostert, R., Santillana, B., & Lee, P. D. (2016). The role of aluminium in chemical and phase segregation in a TRIP-assisted dual phase steel. *Acta Materialia*, 115, 132-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.046> (in English)
13. Fonseca, L., & Faria, A. (2017). Energy balance approach to analyze crankshaft deep rolling simulation results. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering* (pp. 1-9). DOI: <https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2017.cob17-0606> (in English)
14. Galkin, S. P., Aleschenko, A. S., Romantsev, B. A., Gamin, Yu. V., & Iskhakov, R. V. (2021). Effect of Preliminary Deformation of Continuously Cast Billets by Radial-Shear Rolling on the Structure and Properties of Hot-Rolled Chromium-Containing Steel Pipes. *Metallurgist*, 65(1-2), 185-195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01147-4> (in English)
15. Guanzhen, Zh., & Ruiming, R. (2019). Study on typical failure forms and causes of high-speed railway wheels. *Engineering Failure Analysis*, 105, 1287-1295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.063> (in English)
16. Mos'pan, V. V., Medinskii, G. A., Levchenko, G. V., Gritsai, T. V., & Nefed'eva, E. E. (2012). Structure formation in steel 45 for railroad axles at high temperatures. *Steel in Translation*, 42(7), 597-599. DOI: <https://doi.org/10.3103/s0967091212070066> (in English)
17. Yershov, S., Levchenko, G., Wu, K., Zhou, W., & Rui, K. (2020). The development of a new deformation regime for microstructure refinement in solid railway axles by hot deformation optimization. *THEORY AND PRACTICE*, 1(124), 5-17. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2020.01> (in English)
18. Zoran, O. (2017). Analysis of the railway freight car axle fracture. *Procedia Structural Integrity*, 4, 56-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.009> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 30.09.2021

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.016.12:519.87

М. А. БАРИБІН^{1*}, А. П. ФАЛЕНДИШ², О. В. КЛЕЦЬКА³, Д. А. ІВАНЧЕНКО⁴,
О. В. КІРІЦЕВА⁵

^{1*}Каф. «Теплотехніка, теплові двигуни та енергетичний менеджмент», Український державний університет залізничного транспорту, м-н Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 77, ел. пошта kanifoli4.92@gmail.com, ORCID 0000-0002-1397-7852

²Каф. «Рухомий склад транспортних систем», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 62, ел. пошта far_hiit@ukr.net, ORCID 0000-0003-3602-7945

³Каф. «Рухомий склад транспортних систем», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 62, ел. пошта gura@ukr.net, ORCID 0000-0002-4682-860X

⁴Каф. «Рухомий склад транспортних систем», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 62, ел. пошта ukrart.ers@gmail.com, ORCID 0000-0002-3024-3930

⁵Каф. «Рухомий склад транспортних систем», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87555, тел. +38 (0629) 44 61 62, ел. пошта evkiritseva@gmail.com, ORCID 0000-0002-2481-5883

Удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу

Мета. У цій роботі автори ставлять за мету удосконалити методику тягових розрахунків та режимів ведення тягового рухомого складу шляхом застосування оптимізаційних моделей і закону збереження механічної енергії. **Методика.** Наведено блок-схему алгоритму виконання тягових розрахунків. На базі аналізу наявних методів впливу профілю колії на рівняння руху поїзда та формалізації состава як матеріальної точки і запропоновано модель концентричного впливу у вузлах переходу крутизни профілів, впроваджено методику нерівномірності завантаження візків на бугристих та гірських профілях руху, запропоновано вирази для поділу поїзда на кінцеву величину множин. На основі закону збереження механічної енергії розроблено методику визначення величини питомих сил тяги та гальмування, необхідних для динамічного розв'язання рівняння руху поїзда. Графічно відображено алгоритм виконання пошуку питомих сил тяги та гальмування, використано методи рекурсивних функцій за умови перевищення питомими силами максимально допустимих значень тягових характеристик локомотивів. **Результати.** Графічно відображено та математично обчислено відмінності в методиці наявних правил тягових розрахунків і запропонованій методиці впливу профілю колії. Математично доведено необхідність перегляду наявних правил розрахунку, установлено величини для вантажного поїзда вагою 609 тонн на плечі обслуговування локомотивним депо. Проаналізовано неможливість отримання подібних величин точними методами на базі правил тягових розрахунків, визначено необхідність створення нових режимних карт під час перегляду вагових норм. За результатами досліджень рекомендовано впровадити математичні моделі в правила тягових розрахунків. **Наукова новизна.** Запропоновано методику вдосконалення тягових розрахунків на базі переоцінки впливу профілю колії на рухомий склад. Впроваджено методику визначення режимів ведення тягового рухомого складу й запропоновано математичні методи пошуку питомих величин необхідних керуваних сил у режимах тяги, вибігу та гальмування на базі дільничних графіків руху поїздів (у частині використання часу перегінного ходу). **Практична значимість.** Результати проведених досліджень підвищать точність обчислень, сприятимуть енергоефективному перегляду та розробці режимних карт ведення поїзда, зменшенню витрат на тягу поїздів та пошуку прихованих можливостей підвищення провізної здатності наявних ліній залізниць, а також сприятимуть підвищенню ефективності функціонування залізничного комплексу країни.

Ключові слова: тягові розрахунки; вплив профілю колії; питомі сили; математичне моделювання; тяговий рухомий склад; закон збереження механічної енергії

Вступ

Сучасний залізничний комплекс являє собою не тільки одну з найбільших сфер народного господарства країни, але і складну людино-машинну взаємопов'язану систему. В його основу покладено взаємовплив засобів тяги, перевезень вантажів чи пасажирів, систем енергопостачання, інфраструктурного розташування, особливостей руху та експлуатації, нормативних документів та людського фактора. Він з'єднує велику кількість промислових і гірничорудних підприємств країни, населених пунктів та долі людей. Завдяки такому поєднанню створюються не тільки унікальні умови для функціонування і розвитку економіки країни, але й виникає велика соціальна відповідальність залізничного транспорту. В умовах нестабільних цін на енергоресурси, соціальних, екологічних та економічних потрясінь особливо гостро постає питання ефективного функціонування залізниць. Ключовими факторами такого функціонування є мінімізація собівартості перевезень, максимізація використання рухомого складу та збільшення пропускної здатності наявних мереж. Правила тягових розрахунків, як основний документ під час експлуатації та побудови нових гілок вимагають методів максимальної точності та автоматизованих систем обліку.

Не дивно, що безліч фахівців присвятили свої праці тяговим розрахункам, моделям та методикам оптимізації режимів ведення поїзда, розробці рекомендацій щодо ощадного використання паливно-енергетичних ресурсів та зменшення екологічного впливу залізничного транспорту на навколишнє середовище. Серед них слід виділити джерела [1, 5], у яких описано всі сили, що виникають у процесі руху поїзда, та методологію проведення тягових розрахунків. Основоположним документом АТ «Укрзалізниця» є праця [2], недолік якої – відсутність урахування розвитку електронно-обчислювальної техніки, нових методик обліку, застарілість величин паспортних значень та відсутність таких для тягового рухомого складу з подовженим терміном експлуатації, низька точність тощо. Розуміючи це, автори праці [9] зробили великий крок у визначенні ролі інформаційних технологій під час експлуатації та забезпечення надійно-

сті функціонування локомотивів. Невідповідність праці духу часу, ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту» та вимоги до перегляду паспортних значень створили умови для появи джерела [6]. Відставання нашої країни в цьому питанні може призвести до зниження конкурентоспроможності залізничного транспорту. Конкуренція в нинішніх умовах передбачає економічну складову у вигляді екологічних податків та вимагає мінімізації шкідливих викидів і максимізації використання транспортної інфраструктури [10, 13, 16]. Усе це можливо лише за умови впровадження засобів автоматизації процесів, пристроїв підвищеної точності та лінійно-релізних методів наближення моделей до кривих реального об'єкта [14]. Програмна симуляція всіх параметрів руху поїзда дозволяє мінімізувати витрати та зменшити час на випробування тягового рухомого складу й оптимізувати використання наявних технічних засобів залізниць [18]. Автори роботи [17] пропонують для цього формувати стратегію розвитку математичних моделей та динамічного відслідковування технічних параметрів рухомого складу. Колектив авторів праці [12] запропонував модифікувати наявні моделі під час визначення границь застосування та значення величин у змінних інтегрування рівняння руху поїзда. У [15] автори досліджують характеристики руху поїзда в кривих та підвищують якість її проходження. До найбільш оптимального розв'язання подібних задач наблизились колективи авторів [7–8, 11], що формують гнучкі математичні моделі рівнянь руху поїзда, які, проте, не мають значного апробаційного часу на виробництві.

Аналіз нормативних документів та економічного стану АТ «Укрзалізниця» показав гостру необхідність у пошуку методів зниження витрати ресурсів на тягу як основної складової собівартості перевезень, що досягається завдяки тяговим розрахункам та нормуванню [3–4].

Мета

Основною метою статі є вдосконалення тягових розрахунків та визначення режимів ведення тягового рухомого складу на основі перегляду впливу профілю колії та дільничних графіків руху. Для досягнення зазначеної мети визначено такі завдання:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- навести алгоритм розв’язання рівняння руху поїзда за допомогою наявної методики тягових розрахунків;
- проаналізувати вплив профілю колії та встановити методи підвищення точності розрахунків;
- математично та графічно продемонструвати відмінність методик, що враховують вплив профілю колії;
- на базі закону збереження механічної енергії запропонувати методику визначення питомих величин керованих сил та вирази для їх обчислення, встановити ці величини для вантажного поїзда певної ділянки обслуговування й заданого графіка руху.

Методика

Згідно з правилами тягових розрахунків (ПТР), розв’язання рівняння руху поїзда полягає в аналізі сил впливу, пошуку їх величин та засобів і методів зниження чи підвищення (залежно від їх користі). У загальному вигляді цю методику можна представити як блок-схему, графічне зображення якої наведено на рис. 1. Проте в нашій роботі буде розглянуто та проаналізовано лише вплив «Блоку А» як найбільш складного та такого, що використовує наближені методи чи потребує дослідної експлуатації.



Рис. 1. Блок-схема виконання тягових розрахунків

Fig. 1. Flowchart for performing traction calculations

Загалом вплив додаткового опору від профілю колії, згідно з методикою ПТР, на поїзд (як матеріальну точку) заснований на сумуванні фактора крутизни результуючого та фіктивного (базою якого є математичне відображення дисипації енергії під час проходження поїздом кривих) підйому. Розгляд останнього не є доцільним, оскільки математична інтерпретація виразів однакова для характеристики поїзда як точки чи множини точок. Таким чином, першою головною відмінністю запропонованого методу є гранична кількість точок, величина яких обу-

мовлена кількістю візків у складі поїзда. Розвиток апаратних та програмних засобів надає змогу проводити розрахунок великих масивів інформації на персональних комп'ютерах. Головною особливістю методики ПТР є спрямлення колії, що не є зовсім доцільно, оскільки займає багато часу, потребує кваліфікованого спеціаліста та не враховує повністю характеру руху поїзда на ділянці. На рис. 2, а зображено ділянку руху, спрямлення якого виконують за виразом:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$i'_c = \frac{i_1 \cdot S_1 + i_2 \cdot S_2 + \dots + i_n \cdot S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}, \quad (1)$$

де i_1, i_2, i_n – крутизна підйомів чи спусків, %;

S_1, S_2, S_n – протяжність підйомів чи спусків, м.

Указана методика зовсім не враховує, що перехід з одного елемента на інший під час реальної експлуатації відбувається за деякою округленою траєкторією (рис. 2, б). Множина візків у поїзді вимагає врахування нерівномірності завантаження їх на підйомах та спусках. Тому було запропоновано вираз для визначення величини

результуючого підйому в будь-який момент часу та координатного розташування поїзда:

$$i'_c = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{P + Q}, \quad (2)$$

де w_i – середньозважений фактор впливу колії, Н; P – зчіпна вага локомотива, т; Q – вага складу, т.

Тоді для візків із величиною підйому $i_{k+1} - i_k > 0$ та $i_{k+1} - i_k < 0$ відповідно вираз для обчислення середньозваженого фактора впливу колії буде мати вигляд:

$$w_i = m_i \cdot (i_k + (i_{k+1} - i_k) \cdot \frac{h_i \cdot \cos \left| \frac{i_k + (i_{k+1} - i_k) \cdot \frac{h_i}{H_i}}{1000} \right|}{H_i}); \quad (3)$$

$$w_i = m_i \cdot (i_k + (i_{k+1} - i_k) \cdot \frac{h_i \cdot (2 - \cos \left| \frac{i_k + (i_{k+1} - i_k) \cdot \frac{h_i}{H_i}}{1000} \right|)}{H_i}), \quad (4)$$

де m_i – навантаження на i -й візок; i_k, i_{k+1} – відповідно крутизна попереднього та наступного

підйомів; h_i, H_i – відповідно пройдена відстань та довжина округленого переходу, м.

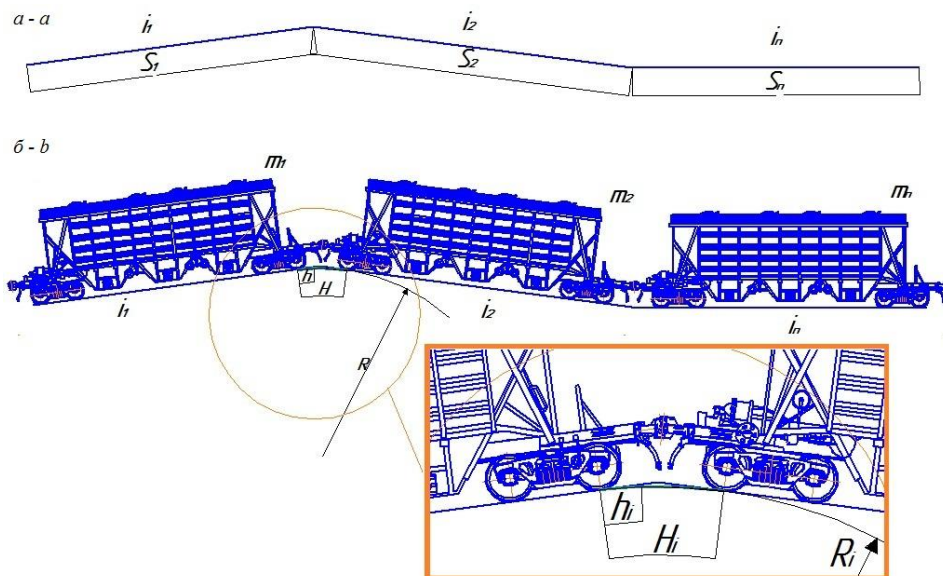


Рис. 2. Графічне відображення впливу профілю колії:
а – згідно з методикою ПТР; б – запропонована схема обліку

Fig. 2. Graphical display of the impact of the track profile:

a – according to the methodology of the traction calculation rules; b – the proposed accounting scheme

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для визначення необхідних величин питомих сил тяги та гальмування можна скористатися законом збереження механічної енергії:

$$E = m \cdot \left(0,5 \cdot (V_2^2 - V_1^2) + g \cdot (h_2 - h_1) \right), \quad (5)$$

де V_1, V_2 – швидкість поїзда на початку та в кінці інтервалу фіксації; m – маса поїзда; g – прискорення вільного падіння; h_1, h_2 – відповідно висоти на початку та в кінці інтервалу фіксації.

З іншого боку, значення механічної роботи, згідно із законами механіки, має вигляд добутку сили впливу на протяжність шляху, використавши 2-й закон Ньютона, отримаємо вираз:

$$E = m \cdot a \cdot S, \quad (6)$$

де a – прискорення руху поїзда; S – довжина ділянки впливу.

У процесі руху поїзда виникає безліч сил впливу, умовно їх можна поділити на зовнішні та внутрішні. Оскільки внутрішні сили не мають фізичного впливу на рівняння руху поїзда та балансуються всередині системи цих сил, до розгляду буде взято лише зовнішні. За характером

$$F_K - W - B_T = \frac{(P + Q) \cdot g \cdot \left(0,5 \cdot (V_2^2 - V_1^2) + g \cdot (h_2 - h_1) \right)}{\xi \cdot S}, \quad (8)$$

Зовнішні сили впливу в рівнянні руху поїзда, за можливості управління, поділяють на некеровані (сили опору руху W) і керовані (сили тяги F_K та гальмівні B_T). Для розрахунку буде взято лише останні як такої, що задають режимізацію руху поїзда (у режимах тяги, гальмування чи вибігу) за факторного впливу сил опору руху. Методика проведення тягових розрахунків оперує, в остаточних значеннях, питомими силами впливу, взаємозв'язок яких під час розгляду лівої частини формули (8) має вигляд:

$$f_K - w - b_T = \frac{F_K - W - B_T}{(P + Q) \cdot g}, \quad (9)$$

де f_K, w, b_T – відповідно питома сила тяги, опору руху та гальмівні сили.

впливу зовнішні сили поділяють на тягові (єдиним джерелом у поїзді є сили тяги локомотива), гальмівні (викликані пневматичними, електропневматичними, реостатними, рекупераційними, магніто-рейковими чи іншими засобами сповільнення руху рухомого складу) та сили опору (інші некеровані сили, фізична природа яких може мати характер як сповільнення, так і прискорення). Спираючись на закони механіки (якщо на точку чи механічну систему діє декілька сил, то їх можна замінити однією рівнодіючою) та [5], отримаємо вираз для обчислення прискорення руху поїзда:

$$a = \frac{\xi \cdot (F_K - W - B_T)}{(P + Q) \cdot g}, \quad (7)$$

де ξ – коефіцієнт питомого прискорення; F_K, W, B_T – відповідно сила тяги локомотива, опору руху поїзда та гальмівні сили.

Підставимо вирази (6) та (7) у формулу (5) таким чином: виконаємо скорочення однотипних параметрів впливу в лівій і правій частині рівняння, згрупуємо величини зовнішніх сил у лівій частині, а інші складові в правій; тоді отримаємо вираз:

Одним з основних завдань локомотивної бригади є дотримання графіка руху поїздів. Складання цього документа виконують щорічно на базі: особливостей профілю експлуатації; рухомого складу; обмежень швидкості; забезпеченості пристроями сигналізації, централізації та блокування; пропускну здатності станцій, вузлів, роз'їздів чи перегінних ходів; вимог народного господарства чи пасажирів залізниці. Головним параметром графіка руху є час перегінного ходу, що регламентує максимальний період зайняття поїздом колії між осями суміжних станцій, парків чи роз'їздів. Виконання графіка руху є обов'язковим для всіх працівників залізничного транспорту, які пов'язані з рухом поїздів. Оскільки час, у фізичному сенсі, є параметром швидкості, а головною особливістю залізничного транспорту слугує прив'язаність до інфраструктури (колії, тобто $S = const$), це дає змогу

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

визначити середню швидкість руху на ділянці експлуатації. Математична основа проведення тягових розрахунків полягає в конкретизації поїзних умов і типів рухомого складу, але найголовніше – у визначенні стартової точки, часу, температури та швидкості руху. Так, у разі розв’язання класичної задачі руху поїзда зі станції *A* до станції *B* початкова швидкість руху має

$$f_K = w(V_{cp}) + \frac{\left(0,5 \cdot \left((2 \cdot V_{cp} - V_1)^2 - V_1^2\right) + g \cdot (h_2 - h_1)\right)}{\xi \cdot S}; \quad (10)$$

$$b_T = -1 \cdot \left[w(V_{cp}) + \frac{\left(0,5 \cdot \left((2 \cdot V_{cp} - V_1)^2 - V_1^2\right) + g \cdot (h_2 - h_1)\right)}{\xi \cdot S} \right], \quad (11)$$

де V_{cp} – середня швидкість руху на ділянці (установлена на базі діляничного графіка руху, часу ходу по перегону та $S = const$).

Використання висот у виразах (10) та (11) нетипове для тягових розрахунків залізничного

транспорту, основним параметром якого є крутизна елементів ділянки та математичні параметри кривих руху. Тому пропонуємо заміну складової $(h_2 - h_1)$ вказаних виразів у випадках задання через радіус кривих та центральні кути на відповідні рівняння:

$$(h_2 - h_1) = \left[i + \frac{200}{R} + 1,5 \cdot \left(\frac{V_{cp}^2}{13 \cdot R} - \frac{h \cdot g}{S_K} \right) \right] \cdot \frac{S}{1000}; \quad (12)$$

$$h_2 - h_1 = \left[i + 3,5 \cdot \frac{\alpha}{S_{KP}} + 1,5 \cdot \left(\frac{V_{cp}^2}{13 \cdot \frac{360 \cdot S_{KP}}{2 \cdot \pi \cdot \alpha}} - \frac{h \cdot g}{S_K} \right) \right] \cdot \frac{S}{1000}, \quad (13)$$

де R – радіус кривої; h – різниця між висотами голівок рейок; S_{KP} – протяжність кривої; S_K – відстань між кругами кочення колісної пари рухомого складу, для колії 1 520 мм $S_K = 1\,600$ мм; α – центральний кут; π – математична постійна.

У випадку, коли довжина кривої чи протяжність розглянутого елемента в кривій менші за довжину поїзда, складові виразів (12)

$$\frac{200}{R} + 1,5 \cdot \left(\frac{V_{cp}^2}{13 \cdot R} - \frac{h \cdot g}{S_K} \right) \quad \text{та} \quad (13)$$

$3,5 \cdot \frac{\alpha}{S_{KP}} + 1,5 \cdot \left(\frac{V_{cp}^2}{13 \cdot \frac{360 \cdot S_{KP}}{2 \cdot \pi \cdot \alpha}} - \frac{h \cdot g}{S_K} \right)$ необхідно помножити на $\frac{S_{KP}}{l_{\Pi}}$ [5, 2], де l_{Π} – довжина поїзда в метрах.

Для спрощених розрахунків або за відсутності величини підвищення зовнішньої рейки вирази (12) і (13) пропонуємо замінити на:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$(h_2 - h_1) = \left[i + \frac{700}{S_C} \sum_{i=1}^n \frac{S_{KPi}}{R_i} \right] \cdot \frac{S}{1000}; \quad (14)$$

$$(h_2 - h_1) = \left[i + \frac{12,2}{l_{II}} \sum_{i=1}^n \alpha_i \right] \cdot \frac{S}{1000}, \quad (15)$$

де S_C , S_{KPi} – відповідно довжина розглянутого елемента та i -ої кривої елемента дільниці; R_i – радіус i -ої кривої розглянутого елемента дільниці; n – кількість кривих на розглянутому елементі дільниці.

Наступник кроком є обчислення питомих сил (у режимах тяги, вибігу та гальмування) для визначеної середньої швидкості (установленої за графіком руху). Для цього побудуємо графік питомих сил за режимами ведення руху для вантажного поїзда вагою 5 350 тонн під тягою тепловоза 2ТЕ116 із завантаженими чотиривісними піввагонами на підшипниках кочення та чавунними гальмівними колодками за методикою, викладеною у [2, 5]. Дані про локомотив узяті з [2]. Отримані результати наведено на рис. 3.

Нанесемо на цьому графіку на криву режиму тяги криву сходинок як методику апроксимації значень на середніх інтервалах руху [2, 5]. Фізична суть кривої сходинок в апроксимації питомих сил тяги – це взаємозв'язок зміни струму тягових електродвигунів (для рухомого складу

з гідравлічною передачею (ГП) – коефіцієнта наповнення гідроапаратів, величини сили Каріоліса та її напрямку, гітротемпературні умови роботи мастила), швидкості та сили тяги локомотива, через магнітний потік (для тепловозів із ГП – гідравлічний потік), нелінійно пов'язаних від струму. Наслідком цього є відсутність у ПТР [2] аналітичних виразів для сили тяги, наявна методика пропонує лише апроксимовані значення у вигляді графіків чи таблиць. У зв'язку з цим неможливо розв'язати рівняння руху поїзда точними методами, тому застосовують наближені. Суть цих методів полягає в підміні фактичних значень ab_{cp} питомої сили тяги, в заданому діапазоні швидкостей, середніми значеннями $a'b'_{cp}$. Тобто у необхідному інтервалі швидкості (на рис. 4 це [10, 20] км/год) на реальній кривій питомих сил у режимі тяги $f_1 = f_K(V) - w_0(V)$ є середнє значення між величинами (точки a та b), що складає величину $a'b'_{cp}$. При цьому фактичне реальне значення ab_{cp} є рухомим у сторону збільшення чи зменшення; причиною слугує вплив технічного стану, технічні особливості кожного номера серії локомотива чи похибка апроксимації ліанеризованих значень усього «парку МШС СРСР» загалом (у разі розгляду через призму ПТР [2]) та АТ «Укрзалізниця» зокрема. Установлення реальних кривих для кожного типу рухомого складу можливе за використання під час експлуатації систем глобального позиціонування та інформації з них.

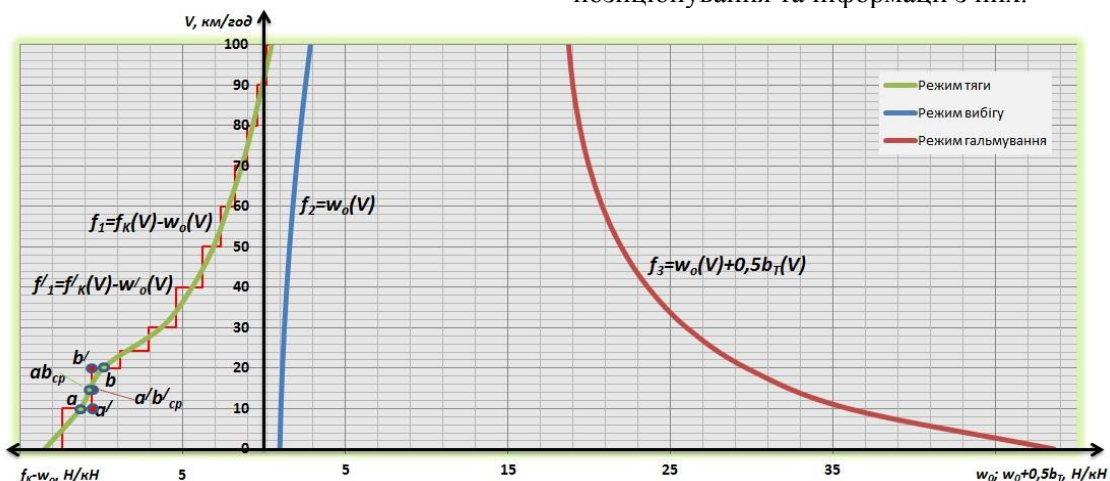


Рис. 3. Графічне зображення питомих сил поїзда на відповідних режимах руху та методики апроксимації кривою сходинок

Fig. 3. Graphical representation of the specific forces of a delineated train on the corresponding driving modes and step curve approximation methodology

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Як видно з рисю 3, похибка розрахунків із середніми значеннями (за кривою сходинок) залежить від величини інтервалу швидкостей руху. Розвиток електронно-обчислювальної техніки та засобів програмування дає можливість обчислювати великі масиви даних і мінімізувати діапазони швидкостей, тобто $\forall f'_K(V) - w'_0(V) - \frac{V_{n+1} - V_n}{0} \rightarrow f_K(V) - w_0(V)$.

Зобразимо блок-схему методики проведення обчислень на рис. 4 та врахуємо обмеження сили максимальними тяговими характеристиками тепловоза за виразом:

$$f_K^{\text{ПТР}} = \frac{F_K}{(P + Q) \cdot g}. \quad (16)$$

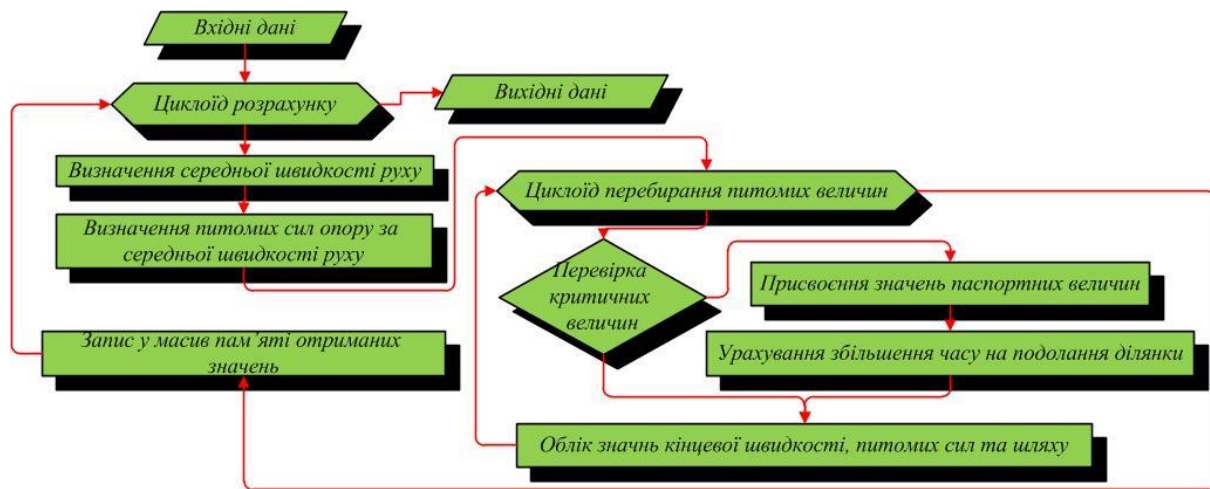


Рис. 4. Блок-схема пошуку питомих значень сил тяги та гальмування

Fig. 4. Flowchart for finding specific values of traction and braking forces

Результати

Виконаємо розрахунок впливу профілю за виразами (1) і (2) для тягового плеча локомотивного депо Харків–Сортувальний – Основа–Індустріальна вагою 609 т; формування поїзда: локомотив ЧМЕЗ та 7 чотиривісних піввагонів. Обчислення даних синьої лінії виконаємо, згідно з ПТР, червоною – за зазначеною вище методикою в часовому інтервалі зміни поїзних обставин 4 с. Розгляд впливу кривих до розрахунку не взято. Результати проведених обчислень наведені на рис. 5.

Проведемо розрахунок питомих сил для зазначеного вище вантажного поїзда регіональної філії «Південна залізниця» з урахуванням фіктивного підйому (i''_c) від кривих та середньої графікової швидкості руху (V_{cp}). Результати обчислень зведемо до табл. 1.

Порівняльна характеристика отриманих результатів (для реального вантажного поїзда вагою 609 т № 8503 з часом відправлення 01:24 20.01.2021 зі ст. Основа) в таблиці 1 з режимною картою ведення поїзда неможлива у зв'язку з невідповідністю наявної в депо ТЧ–10 Харків–Сортувальний режимної карти ведення вантажного поїзда вагою 800 т та наказом № 570/Н про обмеження максимальної ваги до 600 т на вказаному плечі обслуговування. Методика обчислень за ПТР дає лише загальні рекомендації щодо обліку цих сил, остаточні величини яких можна встановити лише методом багаторазового розв'язання рівняння руху поїзда, тобто розв'язання відбувається за наближеними методами з використанням професійних думок спеціалістів. Застосування запропонованих методів дозволить підвищити контроль, зменшити психоемоційне навантаження та витрату паливно-енергетичних ресурсів. Проте ця методика потребує роботи (фахівця) з коригування чи аналізу отриманих результатів.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

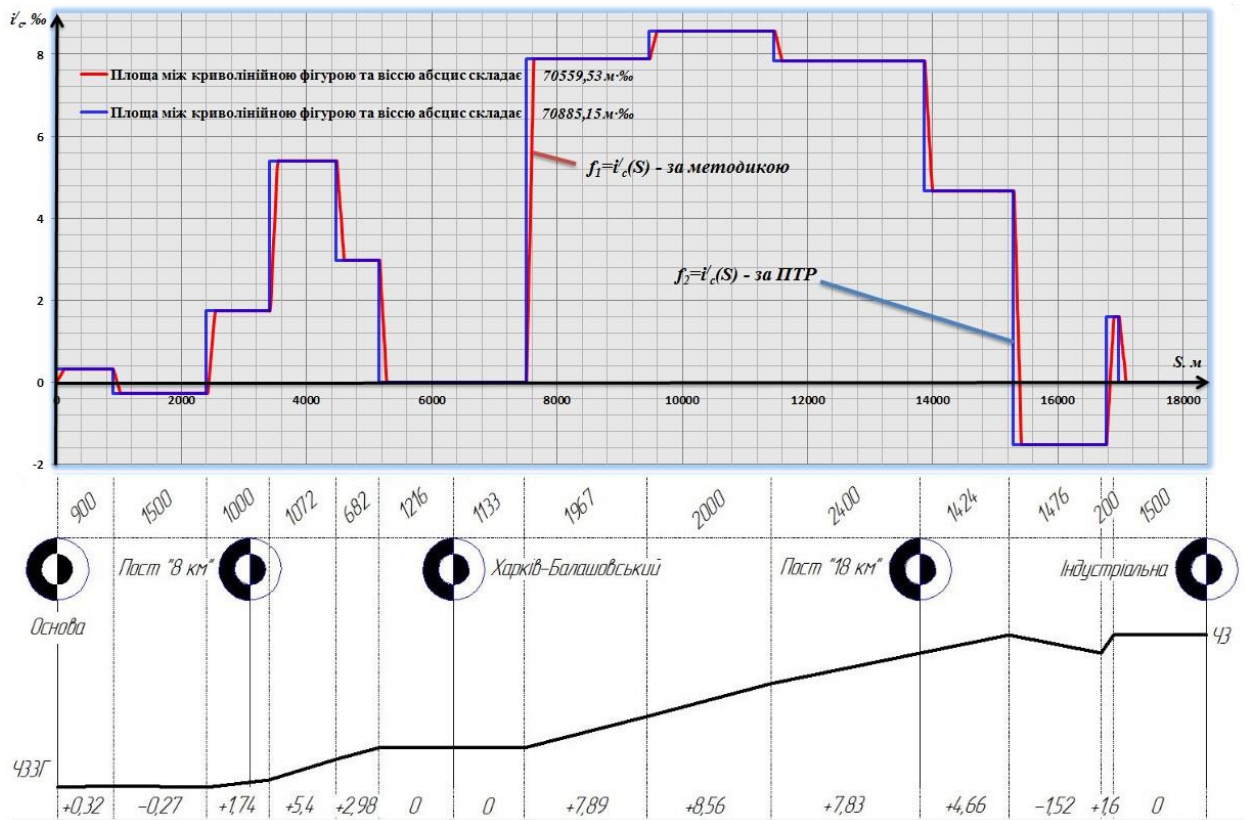


Рис. 5. Графічне відображення результатів розрахунку за запропонованою методикою та методикою, викладеною в ПТР

Fig. 5. Graphical display of calculation results according to the proposed methodology and the methodology described in the traction calculation rules

Таблиця 1

Результати розрахунку питомих сил тяги та гальмування за умов експлуатації

Table 1

Results of calculating the specific traction and braking forces of the outlined operating conditions

$S, \text{ м}$	$i'_c, \%$	$i''_c, \%$	$h_2 - h_1, \text{ м}$	$V_{\text{ср}}, \text{ км/год}$	$f_k, \text{ Н/кН}$	$f_k^{\text{ПТР}}, \text{ Н/кН}$
900	+0,32	+0,05	0,333	12,5	4,39	34,13
1 500	-0,27	+0,11	-0,24	40	8,41	9,47
1 000	+1,74	+0,03	1,77	51,5	0	7,55
1 072	+5,4	0	5,7888	35	0	10,31
682	+2,98	+0,08	2,08692	20	4,43	18,52
1 216	0	0	0	20	1,18	18,52
1 133	0	0	0	20	1,18	18,52
1 967	+7,89	+0,53	16,56214	25	10,17	15,32

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продовження табл. 1

Continuation of Table 1

$S, \text{ м}$	$i'_c, \text{ ‰}$	$i''_c, \text{ ‰}$	$h_2 - h_1, \text{ м}$	$V_{\text{ср}}, \text{ км/год}$	$f_k, \text{ Н/кН}$	$f_k^{\text{ПТР}}, \text{ Н/кН}$
2 000	+8,56	+0,39	17,9	25	10,73	15,32
2 400	+7,83	+0,41	19,776	25	9,97	15,32
1 424	+4,66	+0,37	7,16272	20	6,51	18,52
1 476	–1,52	+0,12	–2,0664	20	2,58	18,52
200	+1,6	0	0,32	20	0	18,52
1 500	0	0	0	20	0	18,52
Дисипація енергії в гальмівних пристроях по станції Індустріальна $b_T \cdot S, \text{ м} \cdot \text{Н/кН}$						3 981,54

**Наукова новизна та практична
значимість**

Запропоновано методику вдосконалення тягових розрахунків на базі переоцінки впливу профілю колії на рухомий склад. Упроваджено методику режимів ведення тягового рухомого складу й запропоновано методи пошуку величин необхідних питомих сил тяги та гальмування в режимах тяги, вибігу та гальмування на базі часу з дільничних графіків руху поїздів.

Результати проведених досліджень підвищать точність обчислень, сприятимуть енергоефективному перегляду режимних карт ведення поїзда, зменшенню витрат на тягу поїздів та пошуку прихованих можливостей підвищення провізної здатності наявних ліній залізниць.

Висновки

У роботі графічно відображено алгоритм розв'язання рівняння руху поїзда за допомогою методики тягових розрахунків. Проаналізовано вплив профілю колії та встановлено методику підвищення точності розрахунків. Математично та графічно продемонстровано відмінність методики впливу спрямленого профілю за ПТР та запропонованої методики (рис. 5). На базі закону збереження механічної енергії запропоновано методику визначення питомих величин керованих сил та вирази для їх обчислення, встановлено ці величини для вантажного поїзда окремої дільниці обслуговування й заданого графіка руху. У подальшому доцільно впровадити математичне моделювання та засоби автоматизації в локомотивне господарство, диспетчеризацію логістичних потоків вантажів із метою зниження ресурсів на тягу, екологічного навантаження транспорту та масової практичної апробації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анисимов В. А., Анисимов В. В. *Тяговые расчеты* : монография. Хабаровск, 2013.
URL: <https://www.sites.google.com/site/tagapoezd/monografia>
2. Гребенюк П. Т., Долганов А. Н., Некрасов О. А., Лисицын А. Л. *Правила тяговых расчетов для поездной работы*. Москва : Транспорт, 1985. 287 с.
3. *Наказ № 062-Ц. Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів (ЦТ-0059)*. [Чинний від 2003-03-05]. Київ, 2003. 85 с.
4. *Наказ № 204-Ц. Положення про інспекцію з контролю ефективності використання енергоресурсів Укрзалізниці*. [Чинний від 2014-05-16]. Київ, 2014. 10 с.
5. Осипов С. И., Осипов С. С. *Основы тяги поездов* : учебник для ст. техн. и колледжей ж/д тр-та. Москва : УМК МПС России, 2010. 592 с.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Приказ № 867 р. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 р. Москва. 510 с.
7. Фалендиш А. П., Гатченко, В. О., Возненко С. В., Клецка О. В., Барибін М. А. Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках. *Збірник наукових праць ДУИТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. № 35. С. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>
8. Фалендиш А. П., Гатченко В. О., Клецка О. В., Кіріцева О. В., Барибін М. А. Модель визначення характеристик режимних карт ведення поїзда. *Збірник наукових праць ДУИТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. № 36. С. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-14>
9. Черемисин В. Т. Роль информационных технологий в обеспечении надежности локомотива. *Локомотив*. 2017. № 9. С. 2–4.
10. Borda-de-Água L., Barrientos R., Beja P., Pereira H. M. *Railway Ecology*. Springer International Publishing, 2017. 337 p.
11. Barybin M., Falendysh A., Hatchenko V., Kletska O., Kiritseva E. Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1021. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012011>
12. Bondar B., Kapitsa M., Bobyr D., Kyslyi D. Defining the limits of application and the values of integration variables for the equations of train movement. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 6. P. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/9>
13. Daszkiewicz P., Andrzejewski M., Tomaszewski S., Rymaniak Ł. Economic and ecological analysis of vehicles used in railways. *Transport Economics and Logistics*. 2019. Vol. 81. P. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.26881/etil.2019.81.05>
14. Gao R.-Z., Wang Y.-J., Lai J.-F., Gao H. Neuro-adaptive faulttolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. *Information Sciences*. 2016. Vol. 367–368. P. 449–462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.05.033>
15. Kapitsa M., Mikhailov E., Kliuiev S., Semenov S., Kovtanets M. Study of rail vehicles movement characteristics improvement in curves using fuzzy logic mechatronic systems. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403019>
16. Strelkov A. K., Teplykh S. Y. Ecological and economic efficiency of the life cycle of railway territorial-industrial complexes. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 775. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/775/1/012035>
17. Uyulan C., Gokasan M., Bogosyan S. Readhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. *Journal of Modern Transportation*. 2018. Vol. 26. Iss. 1. P. 36–48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0158-x>
18. Wang M., Kou B., Zhao X. Analysis of Energy Consumption Characteristics Based on Simulation and Traction Calculation Model for the CRH Electric Motor Train Units. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. 2018. P. 2738–2743. DOI: <https://doi.org/10.23919/icems.2018.8549182>

M. A. BARYBIN^{1*}, A. P. FALENDYSH², O. V. KLETSKA³, D. A. IVANCHENKO⁴,
O. V. KIRITSEVA⁵

^{1*}Dep. «Heat Engineering, Heat Engines and Energy Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 77, e-mail kanifoli4.92@gmail.com, ORCID 0000-0002-1397-7852

²Dep. «Rolling Stock of Transport Systems», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 62, e-mail fap_hiit@ukr.net, ORCID 0000-0003-3602-7945

³Dep. «Rolling Stock of Transport Systems», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 62, e-mail gurao@ukr.net, ORCID 0000-0002-4682-860X

⁴Dep. «Rolling Stock of Transport Systems», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 62, e-mail ukrsart.erps@gmail.com, ORCID 0000-0002-3024-3930

⁵Dep. «Rolling Stock of Transport Systems», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87555, tel. +38 (0629) 44 61 62, e-mail evkiritseva@gmail.com, ORCID 0000-0002-2481-5883

Improvement of Traction Calculations and Driving Modes of Traction Rolling Stock

Purpose. The authors aim to improve the methodology of traction calculations and operation modes of traction rolling stock by applying optimization models and the law of mechanical energy conservation. **Methodology.** The article provides a flowchart of the algorithm for performing traction calculations. Based on the analysis of existing methods of influence of track circumstances on the train movement equations and formalization of the train as a material point, a model of concentric influence in the transition nodes of profiles steepness was proposed, a method of uneven loading of bogies on bumpy and mountain traffic profiles was introduced, expressions for dividing the train by a finite value of sets were proposed. Based on the law of mechanical energy conservation, a method was developed for determining the value of controlled specific forces necessary for dynamic solving the equation of train motion. The algorithm for searching for specific traction and braking forces is graphically displayed, and methods of recursive functions are used when the specific forces exceed the maximum permissible values of traction characteristics of locomotives. **Findings.** Differences in the methods of existing rules of traction calculations and the proposed methodology for the influence of the track profile are graphically displayed and mathematically calculated. The need to revise the existing calculation rules is mathematically proved, the values for a freight train weighing 609 tons on the locomotive depot service shoulder were set. The impossibility of obtaining such values by accurate methods based on the rules of traction calculations is analyzed, and the need to create new mode maps when revising weight standards is determined. Based on the research results, it is proposed to introduce mathematical models in the locomotive traction calculation rules. **Originality.** A method for improving traction calculations based on revaluation of the influence of the track profile on rolling stock is proposed. A methodology for modulating the operation of traction rolling stock is introduced and mathematical methods for finding the specific values of the required controlled forces in traction, run-out and braking modes based on train traffic schedules are proposed. **Practical value.** The results of the research will improve the accuracy of calculations, allow for energy-efficient revision and development of regime maps of train management, help reduce the cost of train traction and search for hidden opportunities to improve the carrying capacity of existing railway lines, and also contribute to improving the efficiency of the country's railway complex.

Keywords: traction calculations; track profile influence; specific forces; mathematical modeling; traction rolling stock; the law of mechanical energy conservation

REFERENCES

1. Anisimov, V. A., & Anisimov, V. V. (2013). *Tyagovye raschety: monografiya*. Habarovsk. Retrieved from <https://www.sites.google.com/site/tagapezd/monografia> (in Russian)
2. Grebenyuk, P. T., Dolganov, A. N., Nekrasov, O. A., & Lisicyn, A. L. (1985). *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty*. Moscow: Transport. (in Russian)
3. *Nakaz No 062-C. Instrukcija po tekhnichnomu normuvannju vytrat elektrychnoji energhiji i palyva lokomotyvamy na tjaghu pojizdiv (CT-0059)*. (2003). (in Ukrainian)
4. *Nakaz No 204-C. Polozhennja pro inspekciu z kontrolju efektyvnosti vykorystannja energhoresursiv Ukr-zaliznyci*. (2014). (in Ukrainian)
5. Osipov, S. I., & Osipov, S. S. (2010). *Osnovy tyagi poezdov: uchebnik dlya studentov tekhnikumov i kolledzhey zheleznodorozhnogo transporta*. Moscow: UMK MPS Rossii. (in Russian)
6. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty*. (2016). Order 867 from 12.05.2016. Moscow: JSC Russian Railways. (in Russian)
7. Falendish, A., Hachenko, V., Voznenko, S., Kletska, O., & Barybin, M. (2020). Mathematical modeling of the basic Parameters in the pulling calculations. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 35, 102-112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11> (in Ukrainian)
8. Falendysh, A., Gatchenko, A., Kletska, O., Kiritseva, E., & Barybin, M. (2020). Model for determination of characteristics of railway train regime maps. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 36, 102-112. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-14> (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

9. Cheremisin, V. T. (2017). Rol informatsionnyih tehnologiy v obespechenii nadezhnosti lokomotiva. *Locomotive*, 9, 2-4. (in Russian)
10. Borda-de-Água, L., Barrientos, R., Beja, P., & Pereira, H. M. (2017). *Railway Ecology*. Springer International Publishing. (in English)
11. Barybin, M., Falendysh, A., Hachenko, V., Kletska, O., & Kiritseva, E. (2021). Determination of rational locomotive operating modes and resource costs based on information from global positioning systems. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1021, pp. 1-9). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012011> (in English)
12. Bondar, B., Kapitsa, M., Bobyr, D., & Kyslyi, D. (2019). Defining the limits of application and the values of integration variables for the equations of train movement. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 59-65. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/9> (in English)
13. Daszkiewicz, P., Andrzejewski, M., Tomaszewski, S., & Rymaniak, Ł. (2019). Economic and ecological analysis of vehicles used in railways. *Transport Economics and Logistics*, 81, 57-69. DOI: <https://doi.org/10.26881/etil.2019.81.05> (in English)
14. Gao, R.-Z., Wang, Y.-J., Lai, J.-F., & Gao, H. (2016). Neuro-adaptive fault-tolerant control of high speed trains under traction-braking failures using self-structuring neural networks. *Information Sciences*, 367-368, 449-462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.05.033> (in English)
15. Kapitsa, M., Mikhailov, E., Kliuiev, S., Semenov, S., & Kovtanets, M. (2019). Study of rail vehicles movement characteristics improvement in curves using fuzzy logic mechatronic systems. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 294, pp.1-7). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929403019> (in English)
16. Strelkov, A. K., & Teplykh, S. Y. (2020). Ecological and economic efficiency of the life cycle of railway territorial-industrial complexes. In *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 775, pp. 1-6). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/775/1/012035> (in English)
17. Uyulan, C., Gokasan, M., & Bogosyan, S. (2018). Re-adhesion control strategy based on the optimal slip velocity seeking method. *Journal of Modern Transportation*, 26(1), 36-48. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0158-x> (in English)
18. Wang, M., Kou, B., & Zhao, X. (2018). Analysis of Energy Consumption Characteristics Based on Simulation and Traction Calculation Model for the CRH Electric Motor Train Units. In *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 2738-2743). DOI: <https://doi.org/10.23919/icems.2018.8549182> (in English)

Надійшла до редколегії: 26.05.2021

Прийнята до друку: 27.09.2021

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463-592.11

В. Г. РАВЛЮК^{1*}, Н. Ю. ЛАМНАУЕР², І. Ш. ОГЛИ ЕЛЯЗОВ³, І. К. КИРИЧЕНКО⁴,
Н. М. СКУБАК⁵^{1*}Каф. «Інженерія вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, м-н Фейс-рбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта ravvg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482²Каф. «Охорона праці, стандартизація та сертифікація», Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, Харків, Україна, 61003, тел.+38 (093) 149 39 17, ел. пошта lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761³Каф. «Транспортна техніка та технологія управління», Азербайджанський технічний університет, пр. Савіда Хусейна, 25, Баку, Азербайджан, AZ 1148, тел. +994 (050) 664 42 71, ел. пошта iselyazov@beu.edu.az, ORCID 0000-0002-7690-9996⁴Каф. «Вища математика», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (095) 487 02 38, ел. пошта iKir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275⁵Каф. «Інженерія вагонів та якості продукції», Український державний університет залізничного транспорту, м-н Фейс-рбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта nata.7skubak@gmail.com, ORCID 0000-0002-6923-8370**Оцінка ресурсу гальмових колодок вантажних вагонів в умовах експлуатації**

Мета. Це дослідження спрямоване на обґрунтування й розробку коректної для практичного використання моделі вичерпання ресурсу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів на основі масових обстежень їх зносу з використанням елементів теорії статистичних висновків. **Методика.** Проведені в декілька етапів виробничі дослідження дали змогу виявити та накопичити достатню кількість статистичних даних про наявність несправностей, відмов або дефектів елементів гальмової важільної передачі (ГВП). Статистичні дані щодо визначення ресурсу композиційних гальмових колодок до їх повної відмови зібрано для типової та модернізованої конструкції важільної передачі візків вантажних вагонів. Як методику досліджень використано відомі положення теорії статистичних висновків, які застосовують до технічних гальмових систем вузлів та елементів вантажних вагонів. **Результати.** За поточними обстеженнями зносу композиційних гальмових колодок важільних передач отримано емпіричні характеристики. Це дало змогу досягти більш достовірних результатів із закону розподілу випадкових величин щодо зносу композиційних гальмових колодок – обмежити робочий ресурс колодок за пробігом за умов їх безпечної експлуатації. Запропонована в роботі модель функції щільності розподілу випадкової величини для композиційних гальмових колодок дозволяє з високою точністю оцінити таку важливу характеристику, як граничний поріг ресурсу, що дає можливість прогнозувати роботоздатність гальмових колодок і визначити ефективність роботи важільних передач візків вантажних вагонів. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано коректну статистичну модель зносу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів. На підставі розробленої моделі досліджено хронологію виникнення клинодуального зносу композиційних гальмових колодок і його вплив на їх ресурс в умовах експлуатації. Проведені натурні дослідження на експериментальних візках вантажних вагонів підтвердили, що ресурс робочого тіла композиційних колодок збільшився в середньому до 64,3 % для модернізованих гальмових важільних передач порівняно з типовими. **Практична значимість.** Отримані в роботі позитивні результати в подальшому буде враховано для розв'язання технічних проблем ненормативного зносу композиційних гальмових колодок у візках вантажних вагонів парку АТ «Укрзалізниця», що дасть можливість подовжити міжремонтні періоди.

Ключові слова: гальмова колодка; знос; гальмова важільна передача (ГВП); вантажний вагон; аналіз; модель; статистичні дослідження; параметр

Вступ

Звітні дані останніх років, що висвітлюють безпеку руху у вагонному господарстві АТ «Укрзалізниця», свідчать, що механічне обладнання гальмових систем візків вантажних вагонів стало занадто вразливим у сучасних

умовах підвищення швидкостей руху та збільшення обсягу вантажу, який перевозять у вагонах.

Останнім часом докладають багато зусиль, щоб вирішити проблему ненормативного зносу гальмових колодок як у візках вантажних вагонів АТ «Укрзалізниця», так і власного парку

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

вагонів, як експлуатованих на мережі магістрального транспорту колії 1520 мм [1]. Ця проблема спричинена конструкційними особливостями гальмової важільної передачі (ГВП). Відхилення він нормативного зносу колодок пов'язано зі зниженням ефективності гальмувань рухомого складу через зменшення площі контакту між гальмовими колодками й колесами візків, що призводить до збільшення частоти й обсягу ремонту рухомого складу, додаткових витрат енергоресурсів на тягу поїздів та сумарного зниження економічних показників вантажних перевезень. Тому в останні роки провідні організації вагонобудування постійно модернізують ГВП з метою підвищення її надійності, довговічності та ремонтпридатності [16].

Тріангелі гальмових передач візків вантажних вагонів працюють так, що під час гальмування вагона до коліс одночасно притискаються гальмові колодки, а система ГВП повинна бути врівноваженою щодо силового навантаження кожної колодки. За рахунок динаміки від взаємодії коліс із нерівностями рейкової колії ця врівноваженість порушується, і колодки зношуються найчастіше у верхніх краях, а це є основною причиною їх клинодуального зносу [14].

Шляхи конструктивного уникнення таких наслідків у роботі ГВП було запропоновано в праці [13]. Проте ніяких застережень щодо клинодуального зносу колодок в експлуатації у відповідній Інструкції [6] не передбачено тому, що цей стохастичний процес недостатньо вивчено на прикладі серійних візків (мод. 18–100) з ГВП, які експлуатують на мережі АТ «Укрзалізниця».

Виправити таке становище з надмірним вилученням колодок за цим дефектом намагалися і вітчизняні, і закордонні дослідники шляхом створення спеціальних пристроїв. У дослідженнях [23–25] перевірку на роботоздатність гальмових систем візків проведено на каткових стендах із вимірюванням параметрів зносу й температурних показників.

У подібному дослідженні [5] ідентифікацію справних гальмових колодок визначено вимірюванням таких параметрів: сили натискання колодок на колеса, твердість матеріалу колодок тощо. Також статистично визначено залежність

часу гальмування вагонів від ухилів рейкової колії, величини гальмового шляху під час повного службового гальмування рухомого складу. Проте в цій роботі не приділено достатньо уваги специфічним умовам контакту клинодуально зношених композиційних гальмових колодок із колесами візків.

У роботі [22] запропоновано методику визначення гальмової ефективної (корисної) площі колодки в разі появи зносу на поверхні її контакту з колесом, але тільки у верхніх її частинах (стертості) залежно від зазору між ними.

У дослідженні [7] описано регресійну модель тертя колодки об колесо у підвізних-вивізних локомотивах промислових підприємств в умовах невизначеності, коли кількість вхідних параметрів досить велика, а вихідних – обмежена з урахуванням значення коефіцієнта тертя. Проте за значної розмірності математичної моделі отримані вихідні параметри не мають стабільних рішень.

У роботі [15] висвітлено можливі причинно-наслідкові зв'язки появи небажаного дуального зносу колодок і запропоновано декілька змін у конструкції тріангеля ГВП. Шляхом нескладних статичних розрахунків достатньо коректно наведена привабливість запропонованих рішень, які сприяють подовженню терміну експлуатації колодок ГВП трьохелементних візків. На жаль, такий підхід не дає змоги прогнозувати строк працездатності колодок і визначати періоди їх планово-попереджувального ремонту.

Інший підхід, запропонований у роботі [8], присвячений питанням триботехнічних явищ та їх наслідків, що мають місце на поверхнях кочення коліс і на робочих поверхнях гальмових колодок. Ідеться про процеси, які відповідають розподілу досліджуваних параметрів, що підпорядковуються нормальному закону розподілу випадкових величин. Однак у роботі не враховано, як впливає ненормативний знос композиційних колодок на поверхню кочення коліс під час гальмування поїзда.

У працях [2, 9, 19, 21] проведено подібні дослідження, але особливості планово-попереджувального ремонту (ППР) гальмових систем вантажних вагонів у жодній із них не відображено.

У роботах щодо модернізації ГВП [12, 25] дослідження клинодуального зносу гальмових

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

колодок до позитивних конструктивних змін не дійшло тому, що їх розробники пішли шляхом створення допоміжних пристроїв протидії моментам сил, які нахиляють колодки так, що вони впираються верхніми крайками в колеса.

Таку ж мету було поставлено в дослідженні [18], яке проведено як кінетостатичний аналіз роботи ГВП.

Однак вирішити цю актуальну проблему на практиці майже неможливо, оскільки конструкція ГВП стає не тільки складнішою, але й збільшує свою вагу та номенклатуру складових елементів, а це, у свою чергу, призводить до підвищення собівартості ППР.

У виробничих дослідженнях на державне замовлення АТ «Укрзалізниця» виконано розробку конструкторсько-технологічної документації щодо модернізації ГВП візків вантажних вагонів [17]. Проте у цій НДР не було проведено статистичних досліджень [16] зносу гальмових колодок парку вантажних вагонів приватних підприємств які, на відміну від вагонів АТ «Укрзалізниця», мають постійне місце дислокації й експлуатуються в пом'якшених умовах щодо напруження колодок на ресурс.

Мета

Це дослідження спрямоване на обґрунтування й розробку коректної для практичного використання моделі вичерпання ресурсу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів на основі масових обстежень їх зносу з використанням елементів теорії статистичних висновків.

Для досягнення мети потрібно виконати такі завдання:

- запропонувати наближену модель для оцінки ресурсу колодок вантажних вагонів із використанням масових випробувань їх відмов;
- з допомогою цієї моделі оцінити граничну межу ресурсу гальмової колодки вантажного вагона за пробігом, що дає змогу цілеспрямовано виконувати її огляд у визначений час щодо граничного значення критичного зносу (ресурсу) колодки;
- порівняти основні ресурсні оцінки гальмових колодок вантажних вагонів як у типовій, так і в модернізованій конструкції ГВП і довести, що запропонована модернізація справді пдовжує їх ресурс.

Методика

В умовах експлуатації вантажних вагонів під час візуальних спостережень за Інструкцією [6] ми вперше виявили, що їх гальмові колодки зношуються особливо, як закономірне масово розповсюджене фізичне явище – клинодуальне «спотворення» зносу гальмових колодок, яке притаманне типовій у візку розгалуженій важільно-шарнірній системі передачі рухів і зусиль одночасно на чотири гальмові колодки.

Попередньо виконаний аналіз кінетостатичних та інтенсивних динамічних дій у гальмовій системі вантажних візків під час руху вагонів показав, що на утворення та зростання клинодуального зносу колодок впливають різноманітні експлуатаційні чинники, пов'язані зі зносами та пошкодженнями вузлів і деталей загалом у всій розгалуженій складній важільно-шарнірній конструкції візка [14].

Аналіз накопиченого статистичного матеріалу дає змогу послідовно встановити причини виникнення несправностей елементів ГВП та обґрунтувати підстави для вдосконалення гальмової системи візка з позиції використання повного ресурсу гальмових колодок на увесь гарантований міжремонтний період експлуатації вантажних вагонів.

Виробничі дослідження щодо виявлення та накопичення достатньої кількості статистичних даних про наявність несправностей, відмов або дефектів, що зумовлюють утворення й розвиток клинодуального зносу гальмових колодок і пошкодження поверхонь коліс, проведено в декілька етапів. Було зібрано статистичний матеріал щодо визначення ресурсу до повної відмови (заміни) на підставі дослідження 210 гальмових колодок. Дослідження проведено для типової та модернізованої конструкції ГВП візків вантажних вагонів.

Результати

За результатами експериментальних досліджень знайдено оптимальне число розбиття інтервалів для побудови гістограми з оцінювання вибіркової щільності функції розподілу нестационарного числового ряду. Оптимальне число розбиття на інтервали взято на основі досліджень [20], де за обсягом вибірки $n = 210$ узято число $r = 9$. Це відповідає вимогам до стандар-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тів сучасних статистичних досліджень [22].

Такий підхід слід вважати обґрунтованим, якщо враховувати результат використання формули Стерджеса, за якою маємо $r = 1 + 3,322 \lg n \approx 8,7$. Тобто вибірки напрацювання на ресурс потрібно поділити на 9 інтервалів, якщо сумарна кількість спостережень перевищує 100 одиниць.

Результати ресурсних випробувань колодок вантажних вагонів у годинах роботи для типової та модернізованої конструкції ГВП візків наведено в табл. 1, на основі яких побудовані гістограми (рис. 1).

Із рис. 1 (а і б) видно, що випадкова величина ресурсу колодок несиметрична і не підпорядковується нормальному закону розподілу.

Таблиця 1

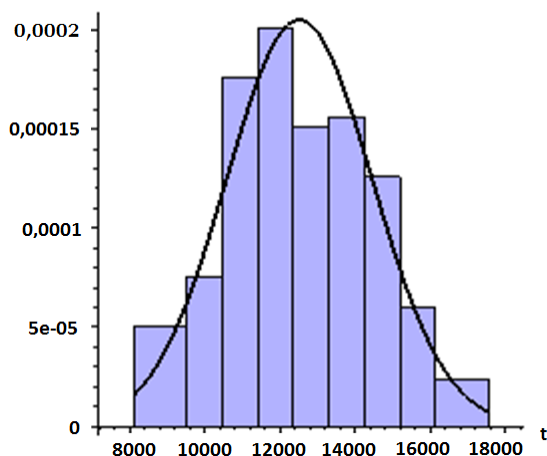
Результати досліджень ресурсу гальмових колодок у часі для ГВП

Table 1

Research results of brake pads resource in time for brake rigging

№ r	Типова ГВП		Модернізована ГВП	
	Інтервал напрацювання на ресурс, год	Частота, n_i	Інтервал напрацювання на ресурс, год	Частота, n_i
1	8567 – 9512,4	15	11499 – 12355,6	15
2	9512,4 – 10457,9	15	12355,6 – 13212,1	15
3	10457,9 – 11403,3	35	13212,1 – 14068,7	45
4	11403,3 – 12348,8	40	14068,7 – 14925,2	42
5	12348,8 – 13294,2	30	14925,2 – 15781,8	29
6	13294,2 – 14239,7	31	15781,8 – 16638,3	29
7	14239,7 – 15185,1	15	16638,3 – 17494,9	21
8	15185,1 – 16130,6	12	17494,9 – 18351,4	8
9	15185,1 – 17076	7	18351,4 – 19208	6

а – а



б – б

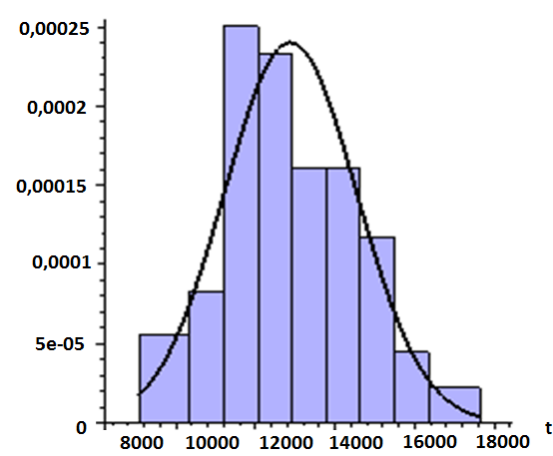


Рис. 1. Гістограма ресурсу T в часі колодок з апроксимацією нормальним законом розподілу:
а – типової ГВП; б – модернізованої ГВП

Fig. 1. Resource histogram T of the pads in time with an approximation of the normal distribution law:
а – typical brake rigging; б – modernized brake rigging

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За випробуванням колодок вантажних вагонів були знайдені в часі числові характери-

стики ресурсу колодок типової та модернізованої конструкції ГВП візків (табл. 2).

Таблица 2

Числові характеристики вибірки

Table 2

Numerical characteristics of the sample

Числові характеристики	Конструкція ГВП	
	типової	модернізованої
Середнє значення ресурсу $\bar{t}$ на час	12505,43810	14881,42381
Виправлена дисперсія, s^2	3779571,961	2762500,073
Емпіричний стандарт, s	1944,112127	1662,077036
Коефіцієнт асиметрії, as	0,139372094	0,291046355
Квадрат коефіцієнта асиметрії, as^2	0,019424581	0,084707980
Коефіцієнт ексцесу: – з мінусом 3 <i>eks</i> . – без мінуса 3 <i>eks</i> .	–0,68983109 2,31016891	–0,43725999 2,56274001

Для аналізу більшості робіт за ресурсними випробуваннями використовують розподіл Вейбулла, тому спочатку перевіримо, чи можна застосувати такий розподіл для наших експериментальних досліджень [4].

Функція щільності трипараметричного розподілу Вейбулла має вигляд:

$$f(x, \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} (x - \gamma)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{(x - \gamma)^\beta}{\alpha}\right), & x \geq \gamma, \\ \gamma \geq 0, \quad \beta > 0, \quad \alpha > 0; \\ 0, & x < \gamma, \end{cases}$$

де α – параметр масштабу; β – параметр форми; γ – параметр зсуву.

Математичне сподівання має вигляд:

$$\mu = \gamma + \alpha^{1/\beta} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right),$$

а дисперсія:

$$\sigma^2 = \alpha^{2/\beta} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right].$$

Якщо розподіл має моду, то її визначають за виразом:

$$x_{\text{mod}} = \gamma + \left[\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \right]^{1/\beta}, \quad \beta > 1.$$

Звідси коефіцієнт:

$$K = \frac{\mu - x_{\text{mod}}}{\sigma} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) - \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{1/\beta}}{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}}.$$

Замінивши μ на вибіркове середнє $\bar{x}$, σ на емпіричний стандарт s та оцінивши за гістограмою x_{mod} , знайдемо оцінку коефіцієнта K . Отримаємо для колодок типової ГВП $K = 0,3237377882$ і для модернізованої ГВП $K = -0,2840278578$.

Знайдемо оцінки параметрів розподілу Вейбулла й оцінимо параметр β , розв'язуючи рівняння зі значеннями коефіцієнта K .

Отримаємо, що для колодок типової ГВП оцінка параметра β дорівнює 2,13748367, а мо-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

дернізованої – 7,412764773. Оскільки $\beta \geq 1$, то ці результати експериментів можуть бути описані розподілом Вейбулла з модою.

Оцінку параметра α знайдемо з формули дисперсії, прирівнюючи σ^2 до виправленої дисперсії s^2 . Отримаємо для колодок типової ГВП $\alpha = 63096485,15$, а модернізованої – $\alpha = 0,9840401283 \cdot 10^{30}$.

Оцінку параметра γ знайдемо з формули математичного очікування, прирівнюючи її до вибіркового середнього $\bar{t}$, звідки отримаємо значення для колодок типової ГВП $\gamma = 8\,557,23$, відповідно, для модернізованої $\gamma = 4\,448,13$. Зауважимо, що отримане значення граничного порогу ресурсу для колодок типової ГВП становить $\gamma = 8\,557,23$ годин, що практично збігається зі спостережуваним значенням ресурсу, а для колодок із модернізованою ГВП граничний поріг ресурсу $\gamma = 4\,448,13$ годин очевидно занижений порівняно зі спостережуваним значенням 11 499 годин.

Це пов'язано з тим, що застосована модель Вейбулла не має верхньої межі ресурсу. Ресурс композиційних гальмових колодок із сітчастодротяним каркасом вантажних вагонів має граничне обмеження за товщиною 10 мм, що перевіряють із зовнішнього боку колодки, а в разі клиноподібного зносу – на відстані 50 мм від

тонкого верхнього її кінця. Після досягнення гранично – допустимої величини за товщиною колодку замінює слюсар із ремонту рухомого складу на нову. У зв'язку з цим застосуємо розподіл, який має нижній і верхній поріг ресурсу до відмови.

Функцію щільності розподілу $f(t)$ випадкової величини T для колодок рекомендують визначати за виразом [3]:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t \notin (b, c), \\ \frac{1+k}{c-b} \left[1 - \left(\frac{t-a}{b-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & t \in [b, a], \\ \frac{1+k}{c-b} \left[1 - \left(\frac{t-a}{c-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right], & t \in (a, c], \end{cases} \quad (1)$$

де a – модальне значення; b, c – нижня і верхня межа часу відповідно; k – параметр форми. Модель (1) визначена за $k > 0$ і $k < -1$, де $b < a < c$ і $b \geq 0$.

Функція розподілу випадкової величини часу T має вигляд [10]:

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t \leq b \\ \left\{ t - b + k(t - a) \left[1 - \left(\frac{t-a}{b-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \right\} / (c-b), & b < t \leq a \\ \left\{ t - b + k(t - a) \left[1 - \left(\frac{t-a}{c-a} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \right\} / (c-b), & a < t \leq c \\ 1, & t > c \end{cases} \quad (2)$$

Для оцінки параметрів цієї моделі виконаємо заміну

$$a = (b + cq) / (1 + q). \quad (3)$$

Тоді математичне очікування $M(T)$ випадкової величини часу T для гальмових колодок вантажних вагонів матиме вигляд:

$$M(T) = \frac{3kb + kbq + b + bq + 3kqc + kc + c + qc}{2(1+q)(2k+1)}.$$

Дисперсія випадкової величини часу для моделі (1) має вигляд [3, 11]:

$$D(T) = \frac{(c-b)^2 (k+1)(2k^2q + 7k^2 + 7k^2q^2 + (4k+1)(q+1)^2)}{12(2k+1)^2(1+q)^2(3k+1)}.$$

Для цієї моделі квадратам асиметрії є функція двох змінних, яка має вигляд:

$$\beta_1^2 = \mu_3^2 / \mu_2^3,$$

де μ_k – центральний момент k -го порядку,

$$\begin{aligned} \beta_1^2 = & 108(4k^2q^2 - 4k^2 + 4k^2q^3 - 4k^2q + 3kq^3 + 7kq^2 - 3k - 7kq - \\ & - 1 - q + q^2 + q^3)^2 k^4 (3k+1) / ((k+1)(2k^2q + 7k^2 + 7k^2q^2 + \\ & + 4k + 8kq + 4kq^2 + 1 + 2q + q^2)^3 (4k+1)^2). \end{aligned}$$

Ексцес визначають за формулою $\beta_2 = \mu_4 / \mu_2^2$. Тоді:

$$\begin{aligned} \beta_2 = & 9(3k+1)(1 + 90kq^2 + 60kq + 1184k^3q^3 + 368k^2q + 1011k^5 + 572k^6 + \\ & + 813k^4 + 4q^3 + 366k^3 + 6q^2 + 102k^2 + q^4 + 532k^2q^2 + 1184k^3q + \\ & + 1636k^3q^2 + 1932k^4q + 1932k^4q^3 + 2958k^4q^2 + 102k^2q^4 + 1684k^5q + \\ & + 1011k^5q^4 + 366k^3q^4 + 572k^6q^4 + 528k^6q^3 + 528k^6q + 813k^4q^4 + 60kq^3 + \\ & + 368k^2q^3 + 1684k^5q^3 + 2546k^5q^2 + 872k^6q^2 + 4q + 15k + 15kq^4) / (5(2k^2q + \\ & + 7k^2 + 7k^2q^2 + 4k + 8kq + 4kq^2 + 1 + 2q + q^2)^2 (4k+1)(5k+1)(k+1)). \end{aligned}$$

Оцінки параметрів моделі (1) можуть бути знайдені методом моментів, тому що для неї розраховані числові характеристики: квадрат асиметрії й ексцес, які містять тільки два параметри – k і q . Розв'язуючи системи рівнянь, в

обох випадках $\begin{cases} as^2 = \beta_1^2; \\ ek = \beta_2. \end{cases}$ отримаємо: для коло-

док типової ГВП $k = 0,796616022$ і $q = 0,7099086449$, а модернізованої – $k = 1,494338579$ і $q = 0,6053181062$. Для зна-

ходження оцінок параметрів моделі (1) b і c

розв'яжемо систему рівнянь $\begin{cases} M(T) = \bar{t} \\ D(T) = s^2 \end{cases}$, підс-

тавляючи знайдені параметри k і q . Отримаємо для колодок типової ГВП: $b = 8\,143,000275$

і $c = 17\,355,13453$; відповідно, модернізованої: $b = 11\,054,76894$ і $c = 19\,484,54429$.

Оцінку параметра a знаходимо з рівняння-заміни (3). Отримаємо для колодок типової ГВП $a = 11\,967,63370$, модернізованої $a = 14\,233,38858$ годин.

Із такою функціональною характеристикою, як інтенсивність відмов $L(t) = f(t) / (1 - F(t))$ [10], можна однозначно визначити модель випадкової величини.

За отриманими оцінками параметрів для моделі (1) і моделі Вейбулла знайдемо функціональні теоретичні характеристики $L(t)$ і порівняємо їх з емпіричними значеннями.

Результати порівняння наведені на рис. 2, а для колодок типової ГВП, а на рис. 2, б – модернізованої ГВП.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

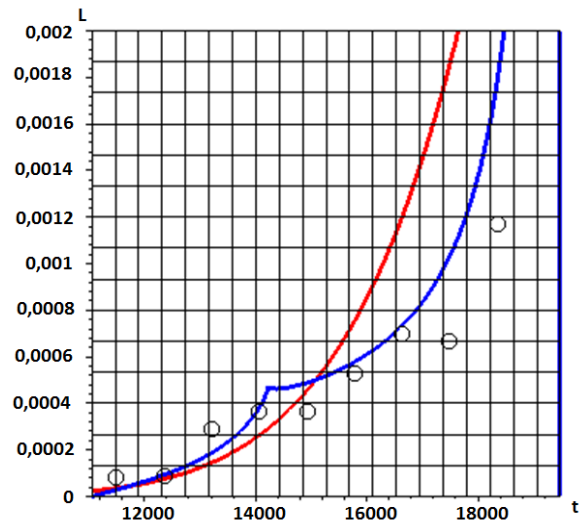
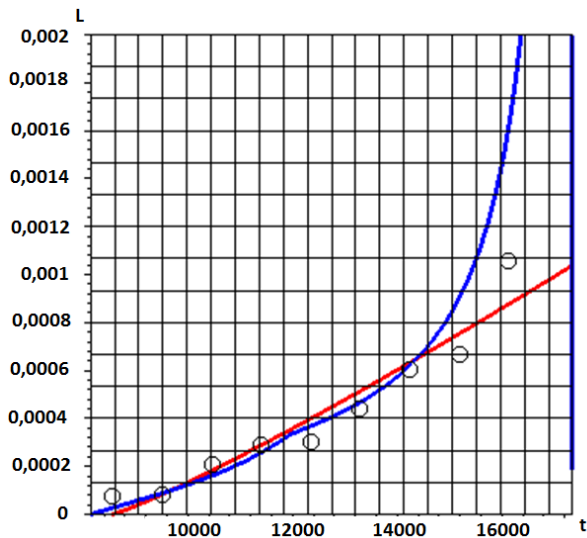
 $a - a$ $b - b$ 

Рис. 2. Емпіричні оцінки інтенсивності відмов (кола), моделі Вейбулла (червона лінія) і розробленої моделі (1) (синя лінія):

a – колодок типової ГВП; b – колодок модернізованої ГВП

Fig. 2. Empirical estimates of failure rate (circles), Weibull model (red line) and developed model (1) (blue line):

a – pads of typical brake rigging; b – pads of modernized brake rigging

Із рис. 2, a видно, що найкраще наближення має модель (1) в обох випадках (як для колодок модернізованої ГВП, так і для типової). Більш того, модель (1), за заданого обсягу експериментів $n = 210$, дає більш реальні оцінки граничного порога ресурсу в годинах, ніж розподіл Вейбулла. Поліпшення оцінки граничного порогу ресурсу гальмових колодок модернізованої ГВП порівняно з типовою становить 65,8 %, а оцінка середнього ресурсу – 64,3 %.

За поточними обстеженнями зносу композиційних гальмових колодок важільних передач отримано емпіричні характеристики. Це дало змогу досягти більш достовірних результатів із закону розподілу випадкових величин щодо зносу композиційних гальмових колодок – обмежити робочий ресурс колодок за пробігом за умов їх безпечної експлуатації. Запропонована в роботі модель функції щільності розподілу випадкової величини для композиційних гальмових колодок дозволяє з високою точністю оцінити таку важливу характеристику, як граничний поріг ресурсу, що дає можливість прогнозувати роботоздатність гальмових колодок і визначити ефективність роботи важільних пе-

редач візків вантажних вагонів.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше запропоновано коректну статистичну модель зносу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів. На підставі розробленої моделі досліджено хронологію виникнення клинодуального зносу композиційних гальмових колодок і його вплив на ресурс їх роботи в умовах експлуатації. Проведені натурні дослідження на експериментальних візках вантажних вагонів підтвердили, що ресурс робочого тіла композиційних колодок збільшився в середньому до 64,3 % для модернізованих гальмових важільних передач порівняно з типовими.

Отримані в роботі позитивні результати в подальшому буде враховано для розв'язання технічних проблем ненормативного зносу композиційних гальмових колодок у візках вантажних вагонів парку АТ «Укрзалізниця», що дасть можливість подовжити міжремонтні періоди.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Висновки

1. Проведені дослідження показали, що модель функції щільності розподілу випадкової величини має краще наближення до емпіричних оцінок інтенсивності відмов, отриманих під час виробничих випробувань для композиційних гальмових колодок вантажних вагонів, ніж застосована модель Вейбулла.

2. Використання емпіричної характеристики інтенсивності відмов дозволило зробити більш правильний висновок щодо закону розподілу випадкової величини, оскільки така характеристика однозначно визначає цей закон.

3. Знайдено теоретичні й емпіричні числові характеристики часу роботи композиційних гальмових колодок до повної їх відмови, які показали, що в середньому час роботи колодок із виконаною модернізацією ГВП збільшився на 64,3 %.

4. Отримана за результатами досліджень оцінка порогового значення ресурсу композиційних гальмових колодок вантажних вагонів показала, що він збільшився у модернізованих ГВП на 65,8 % порівняно з типовими.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Аналіз стану безпеки руху в структурі АТ «Укрзалізниця» у 2019 році*. Акціонерне товариство «Українська залізниця» Департамент безпеки руху. Київ, 2019. 198 с.
2. Бакарджієв Р. О., Комаров А. О. Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2015. № 28. С. 255–260.
3. Гмурман В. Е. *Теория вероятностей и математическая статистика* : учебное пособие для вузов. Москва : Высшая школа, 2003. 479 с.
4. Гребенникова И. В. *Методы математической обработки экспериментальных данных*: учебно-метод. пособие. Екатеринбург : Уральский университет, 2015. 124 с.
5. Жаров И. А., Макас А. А. Методы статистической обработки результатов измерения тормозных путей при оценке эффективности тормозных средств подвижного состава. *Вестник ВНИИЖТ*. 2009. № 5. С. 29–33.
6. *Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України: ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015*. [Чинний від 1997-10-28 № 264-Ц]. Київ : ТОВ НВП «Поліграфсервіс», 2004. 146 с.
7. Коптовец А. Н. Идентификация состояния тормоза шахтных локомотивов в условиях структурной неопределенности. *Геотехническая механика*. 2014. № 119. С. 241–246.
8. Коропещ П. А., Черніков В. Д., Костюкевич А. І. Про нерівномірний знос рухомих фрикційних пар. *Вісник СХУ ім. Даля*. 2010. № 5 (147). С. 41–45.
9. Ламнауэр Н. Ю. Метод сборки деталей машин, обеспечивающий точность соединения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Вып. 6. № 7 (72). С. 45–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29321>
10. Ламнауэр Н. Ю. Про оцінку точності технологій виготовлення деталей за параметром лінійного розміру. *Машинобудування*. 2020. Вип. 25. С. 114–120. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2020-25-114-120>
11. Ламнауэр Н. Ю., Пташний О. Д. Градації якості технологій виготовлення деталей машин на основі оцінки виправленої дисперсії. *Машинобудування*. 2021. Вип. 27. С. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2021-27-22-28>
12. Павлюков А. Э., Черепов О. В., Шалупина И. П. Тормозные колодки грузовых вагонов: анализ повреждаемости и факторов, влияющих на создание тормозной силы. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2017. № 4 (36). DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-4-11>
13. *Підсилюючий пристрій до паралельного відведення колодок від коліс у гальмівній системі візків вантажних вагонів* : пат. 121889 Україна : МПК51 В60Т 1/02 (2006.01), В61Н 15/00, В61Н 13/00; заявл. 24.04.17; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. 12 с.
14. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). С. 111–126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

15. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Кириченко І. К. Статистичне опрацювання параметрів зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 2 (86). С. 74–91.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203103>
16. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Кириченко І. К., Ламнауер Н. Ю., Мельничук А. К. Імовірнісно-статистична модель зносу гальмових колодок вантажних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 5 (89). С. 116–133. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/217633>
17. *Розробка конструкторсько-технологічної документації на проведення модернізації гальмових важільних передач візків вантажних вагонів* : Звіт про НДР (заключ.) : Укр. держ. акад. залізнич. трансп. Харків, 2012. 53 с.
18. Тулузин С. В., Горский Д. В. Оценка работоспособности тормозной рычажной передачи тележки грузового вагона на различных стадиях износа колодок и колес. *Вестник ВНИИЖТа*. 2015. № 2. С. 38–44.
19. Gorobchenko O., Tkachenko V. Statistical analysis of locomotive traction motors performance. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 287. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002>
20. Lamnauer N., Kupriyanov O., Skorkin A., Kondratyuk O. A Probabilistic-Statistical Model of Durability of Parts Under Cyclic Loading. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 285–294.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_28
21. Leng L., Zhu W. Compound Regression and Constrained Regression : Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician*. 2019. Vol. 74. Iss. 3. P. 226–232.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734>
22. Ravlyuk V., Elyazov I., Afanasenko I., Ravliuk M. Determination of forces in the elements of the brake rigging of bogies of freight cars. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 166. P. 1–7.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607003>
23. Sarma K. V. S., Vardhan R. V. *Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York, 2018. 258 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185>
24. Sharma B. Processing of data and analysis. *Biostatistics and Epidemiology International Journal*. 2018. Vol. 1. Iss. 1. P. 3–5. DOI: <https://doi.org/10.30881/beij.00003>
25. Sinitsyn V. V., Kobishchanov V. V. Braking system for bogie successive braking of freight cars. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2020. Vol. 2020. Iss. 3. P. 21–28.
DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-3-21-28>
26. Thrane C. *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London, 2019. 202 p.
DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756>
27. Vakkalagadda M. R. K., Srivastava D. K., Mishra A., Racherla V. Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*. 2015. Vol. 328–329. P. 64–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044>
28. Vineesh K. P., Vakkalagadda M. R. K., Tripathi A. K., Mishra A., Racherla V. Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 59. P. 493–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.023>
29. Zhang Y., Zhang M. The application status of unit brakes on metro vehicles in China. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 2018. Vol. 3 (15). P. 17–23.

V. G. RAVLYUK^{1*}, N. Y. LAMNAUER², I. Sh. oglu ELYAZOV³, I. K. KYRYCHENKO⁴,
N. M. SKUBAK⁵

^{1*}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 ravg@ukr.net, ORCID 0000-0003-4818-9482

²Dep. «Occupational Safety, Standardization and Certification», Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Universitetska St., 16, Kharkiv, Ukraine, 61003, tel. + 38 (093) 149 39 17, e-mail lamnaouernatali@gmail.com, ORCID 0000-0002-6779-8761

³Dep. «Transport Engineering and Management Technology», Azerbaijan Technical University, Savid Hussein Av., 25, Baku, Azerbaijan, AZ 1148, tel. +994 (050) 664 42 71, e-mail iselyazov@beu.edu.az, ORCID 0000-0002-7690-9996

⁴Dep. «Higher mathematics», Kharkiv National Automobile and Road University, Yaroslava Mudroho St., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (095) 487 02 38, e-mail ikir238@gmail.com, ORCID 0000-0001-7375-8275

⁵Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail nata.7skubak@gmail.com, ORCID 0000-0002-6923-8370

Resource Estimation of Freight Car's Brake Pads in Operating Conditions

Purpose. This research is aimed at substantiation and development of the correct for practical use model of service life exhaustion of brake pads of freight cars based on mass inspections of their wear using the elements of the statistical conclusions' theory. **Methodology.** Production research conducted in several stages, allowed identifying and accumulating sufficient statistics on the malfunctions, failures or defects of the elements of the brake rigging. Statistics on determining the service life of composite brake pads before their complete failure were carried out for a typical and modernized design of the brake rigging of freight cars. The well-known provisions of the theory of statistical conclusions, which are applied to technical brake systems of units and elements of freight cars, were used as research methods. **Findings.** Empirical characteristics are obtained as a result of current inspections of wear of composite brake pads of brake rigging. This made it possible to achieve more reliable results from the law of random variables distribution concerning the wear of composite brake pads – to limit the service life of pads on the run under conditions of their safe operation. The proposed model of the density distribution function of random variables for composite brake pads allows high accuracy estimating such an important characteristic as the resource threshold. This make it possible to predict the brake pads performance and determine the efficiency of brake rigging of freight car bogies. **Originality.** For the first time, a correct statistical wear model of composite brake pads of freight cars has been proposed. Based on the developed model the occurrence chronology of clinodual wear of composite brake pads and its influence on a resource of their work in operating conditions is investigated. Field research on experimental bogies of freight cars confirmed that the service life of composite pads has increased by an average of 64,3% for upgraded brake rigging compared to typical ones. **Practical value.** The obtained positive results will be taken into account in the future to solve problematic technical issues related to non-standard wear of composite brake pads in the freight cars' bogies of Ukrzaliznytsia JSC, which will allow extending the interrepair periods.

Keywords: brake pad; wear; brake rigging; freight car; analysis; model; statistical research; parameter

REFERENCES

1. *Analiz stanu bezpeki rukhu v strukturi AT «Ukrzaliznytsya» u 2019 rotsi.* Akcionerne tovarystvo «Ukrainsjka zaliznycja» Departament bezpeki rukhu. (2019). Kyiv. (in Ukrainian)
2. Bakardzhyiev, R. O., & Komarov, A. O. (2015). Preliminary assessment and data processing in regression analysis. *Collected Works of Kirovohrad National Technical University. Machinery in agricultural production, industry machine building, automation*, 28, 255-260. (in Ukrainian)
3. Gmurman, V. Ye. (2003). *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie dlya vuzov.* Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
4. Grebennikova, I. V. (2015). *Metody matematiches koyobra botkieksper imentalny khdannnykh: uchebno-metodicheskoe posobie.* Yekaterinburg: Uralski yuniversitet. (in Russian)
5. Zharov, A., & Makas, A. (2009). Methods of statistical processing results of brake distance measurement when evaluating efficiency of rolling stock brake systems. *Vestnik VNIIZHT*, 5, 29-33. (in Russian)
6. *Instruktsiia z ekspluatatsi ihalmruk homohos kladun azaliznytsiakh Ukrainy: TsT-TsV-TsL-0015, No. 264-Ts.* (2004). Kyiv. (in Ukrainian)
7. Koptovec, A. N. (2014). Identification of mine locomotive brake state in terms of structural uncertainty. *Geo-Technical Mechanics*, 119, 241-246. (in Russian)
8. Koropets, P. A., Chernikov, V. D., & Kostiukevych, A. I. (2010). Pro neriv nomirnyi znosruk homy khfryktsiinykh par. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 5(147), 41-45. (in Ukrainian)
9. Lamnauer, N. Y. (2014). Machine parts assembly method, which provides connection accuracy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(72)), 45-49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29321> (in Russian)
10. Lamnauer, N. Y. (2020). About assessing the accuracy of manufacturing technology of parts by the parameter of linear size. *Engineering*, 25, 114-120. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2020-25-114-120> (in Ukrainian)
11. Lamnauer, N. Y., & Ptashnyi, O. D. (2021). Grading the quality of manufacturing technologies of machineparts based on the assessment of the corrected variance. *Engineering*, 27, 22-28. (in Ukrainian)
12. Pavlyukov, A. E., Cherepov, O. V., & Shalupina, I. P. (2017). Brake shoe of freight wagon: analysis of damage and factors affecting the brake power. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*, 4(36), 4-11. DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2017-4-4-11> (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

13. Ravlyuk, V. G., & Nechvoloda, S. I. (2017). *UA Patent № 121889 Ukrainskyi instytut intelektual noiv-lasnosti* (Ukrpatent). (in Ukrainian)
14. Ravlyuk, V. G. (2019). Investigation of features of dual wear of pads in brake system of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(80), 111-126. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166114> (in Ukrainian)
15. Ravlyuk, V. G., Ravlyuk, M. G., & Kirichenko, I. K. (2020). Statistical processing of brake pads wear parameters of freight cars. *Science and Transport Progress*, 2(86), 74-91. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203103> (in Ukrainian)
16. Ravliuk, V. H., Ravliuk, M. H., Kyrychenko, I. K., Lamnauer, N. Y., & Melnychuk, A. K. (2020). Probability and statistical model of wearing of brake pads of freight cars. *Science and Transport Progress*, 5(89), 116-133. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/217633>
17. *Rozrobka konstruktors'ko-tehnolohichnoyi dokumentatsiyi na provedennya modernizatsiyi hal'mivnykhvazhil'-nykh peredach vizkiv vantazhnykh vahoniv.* (2012). Zvit pro NDR (zaklyuch.): Ukrainsjka derzhavna akademiya zaliznychogho transportu. Kharkiv. (in Ukrainian)
18. Tuluzin, S. V., & Gorskiy, D. V. (2015). Performance evaluation of bogie brake rigging in a freight car at various stages of brake blocks and wheels wear. *Vestnik VNIIZhTa*, 2, 38-44. (in Russian)
19. Gorobchenko, O., & Tkachenko, V. (2019). Statistical analysis of locomotives traction motors performance. *MATEC Web of Conferences*, 287, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928704002> (in English)
20. Lamnauer, N., Kupriyanov, O., Skorkin, A., & Kondratyuk, O. (2020). A Probabilistic-Statistical Model of Durability of Parts Under Cyclic Loading. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 285-294. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_28 (in English)
21. Leng, L., & Zhu, W. (2019). Compound Regression and Constrained Regression: Nonparametric Regression Frameworks for EIV Models. *The American Statistician*, 74(3), 226-232. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1556734> (in English)
22. Ravlyuk, V., Elyazov, I., Afanasenko, I., & Ravliuk, M. (2020). Determination of parameters of abnormal wear of brake pads of freight cars. *E3S Web of Conferences*, 166, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016607003> (in English)
23. Sarma, K. V. S., & Vardhan, R. V. (2018). *Multivariate Statistics Made Simple. A Practical Approach*. New York. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429465185> (in English)
24. Sharma, B. (2018). Processing of data and analysis. *Biostatistics and Epidemiology International Journal*, 1(1), 3-5. DOI: <https://doi.org/10.30881/beij.00003> (in English)
25. Sinitsyn, V. V., Kobishchanov, V. V. (2020). Braking system for bogie successive braking of freight cars. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*, 2020(3), 21-28. DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-3-21-28> (in Russian)
26. Thrane, C. (2019). *Applied Regression Analysis. Doing, Interpreting and Reporting*. London. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443756> (in English)
27. Vakkalagadda, M. R. K., Srivastava, D. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2015). Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*, 328-329, 64-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044> (in English)
28. Vineesh, K. P., Vakkalagadda, M. R. K., Tripathi, A. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2016). Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes. *Engineering Failure Analysis*, 59, 493-508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.11.023> (in English)
29. Zhang, Y., & Zhang, M. (2018). The application status of unit brakes on metro vehicles in China. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 3(15), 17-23. (in English)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 30.09.2021

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDC 629.463.64:519.87

I. Y. KEBAL¹, O. L. KRASNOSHCHOK^{2*}

¹*Bureau for Technological and Innovative Developments, Launching into Production of Mechanical Engineering Products, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 777 56 16, e-mail ivankebal@i.ua, ORCID 0000-0002-8408-8294

²*Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 706 27 43, e-mail akrasnoshchok1996@gmail.com, ORCID 0000-0002-0140-5179

Modernization of Platform Schnabel Car with a Carrying Capacity of 220 Tons

Purpose. The article is aimed to calculate the strength of the element of the special design of the Schnabel car to increase the carrying capacity up to 250 tons, as well as consider the possibility of using special cars to transport the oversized cargo according to the strength calculation results of the span bolster of the Schnabel car.

Methodology. A special design of the span bolster of the Schnabel car was developed, which allowed increasing the carrying capacity of the platform Schnabel car to 250 tons. SolidWorks CAD allowed testing the span bolster strength of the modernized Schnabel car. **Findings.** A review analysis of railway Schnabel cars has been performed. The possibility of testing the strength of the Schnabel car design details using modern SolidWorks CAD is considered. When loading the span bolster of the modernized Schnabel car with a compressive force of 2.5 MN, the stresses do not exceed the allowable, and the design has no weaknesses. The specialists of Design and Development Technological Bureau for the Design and Modernization of Rolling Stock, Track and Artificial Structures performed research and development for the production of a sixteen-axle platform Schnabel car with a capacity of up to 250 tons.

Originality. The mathematical model of the modernized sixteen-axle platform Schnabel car with a loading capacity up to 250 t was further developed. The implementation of the mathematical model in SolidWorks CAD allowed testing the design for the strength of the Schnabel car. **Practical value.** The results of the work can be useful for the design departments for rolling stock design and relevant specialists. Modern CAD in some way simplifies the process of designing parts and assemblies of mechanisms, allowing one to test certain system parameters with high accuracy.

Keywords: freight transportations; oversized cargo; railway Schnabel car; international transportations; car modernization; finite element method

Introduction

Rail transport is one of the cheapest, most reliable, fast, universal and safe types of land transport. Transportation by rail is divided into two types: passenger and freight ones. Freight transportation is carried out by different types of rolling stock.

There are several types of cars, depending on the cargo characteristics, the methods of loading – unloading, the need to protect the cargo.

The railway network is quite developed, so transportation is carried out in different directions in the minimum time. Rail freight transportation sim-

plifies logistical planning, is convenient for transporting raw materials to industrial enterprises, deliveries to large cities, supplying more goods to remote locations.

The rolling stock variety today allows transporting almost any type of cargo.

Ukrzaliznytsia JSC provides transportation in four main directions: across Ukraine, to the CIS countries, Europe and Asia. A significant share is accounted for by transportation to the CIS countries and Europe. The main issue is the possibility of coordinating traffic according to the track gauge (in Ukraine and the CIS – 1520 mm, in the vast majority of European countries – 1435 mm). In general,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

the share of the track 1435 mm is approximately 60% of the total length of the rails [13]. Therefore, the problem of rearranging cars in the international direction from the track gauge of 1435 and 1520 mm and vice versa is relevant for Ukraine's export-import.

As a result of multiple coupling-uncoupling of cars and the use of changeable bogies, international trains at the station may require up to 3 hours of additional travel time. At the beginning of the twentieth century, attempts began to develop technology for the transition of cars from one track gauge to another. The bogie rearrangement of passenger and freight cars for different track gauge in specially organized track-gauge changeover points at border junctions has become more progressive [8].

One of the important tasks regularly facing industrialists is the transportation of oversized and heavy loads, its solution is always a technical problem that can be overcome with the help of specialized Schnabel cars.

Today there is a problem: the fleet of specialized Schnabel cars and other cars for oversized cargo is not updated, its technical condition is critical. The need for Schnabel cars is constantly growing, as many of them have already been decommissioned, and the number of running Schnabel cars is decreasing every year. Thus, the car fleet is not replenished, and the service life of the existing Schnabel cars is coming to an end.

The constant need to transport heavy cargoes by rail with minimal investment, on the one hand, and limiting the axle loading, on the other, created the preconditions for the development of a new generation of Schnabel cars as the cheapest transport mode for heavy, large and long equipment.

The condition of load-bearing metal structures of the special cars for the transportation of special cargoes is not close to the limit after long operation [14].

According to design and purpose, Schnabel cars include the following main types: platform, well, coupling, articulated. Each type of Schnabel car is distinguished by the number of axles, capacity and other technical characteristics [7].

Platform conveyors are designed for transporting the oversized cargo. As the cargo dimensions are limited [3], its transportation is complicated, the transportation cost is higher or transportation by rail is not possible at all. Therefore, such Schnabel cars

have a lower loading platform due to the curved shape of the main beam, which reduces the cargo oversize index and, accordingly, the transportation cost by rail [13]. Platform Schnabel cars have 4, 8, 12 or 16 axles and a capacity of 55 to 225 tons. Modern upgraded Schnabel cars can have a capacity of up to 250 tons, due to the use of modern materials, the introduction of new design and technological solutions. But platform Schnabel cars also have a significant disadvantage: the platform length is limited, which does not allow transporting long cargoes.

Platform Schnabel cars are a relevant solution when transporting military equipment, as well as oversized and heavy cargo by rail.

In general, the advantages of using rail transport compared to other transport modes are as follows:

- the price in case of long routes, railway transportation will always be cheaper, than air and sea transportation;
- safety, because the transportation of goods by rail – is almost absolute guarantee of its preservation. During the rail transportation of goods, such factors as the quality of the road surface (compared to road transport), weather conditions, human factor, do not affect the conditions of its preservation. It is also possible to protect a certain type of cargo from harmful environment factors;
- speed, as rail transport is one of the fastest and most punctual transport services. Minimal breakage probability, absence of risk factors, etc. less often result in delivery delays;
- versatility – there are different types of cars for different cargoes, which allows rail transportation of oversized cargo, hazardous substances, and the goods requiring special storage conditions;
- the structure reliability of cars is tested using modern calculation methods, in particular, during the design, as well as experimentally.

Purpose

The main purpose of the article is to characterize the existing Schnabel cars, consider the possibility of using them for the transportation of oversized cargo, as well as the development of a modern method to calculate the strength of the Schnabel cars' structural element.

Methodology

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Quite often, the question about the modernization of special types of high-capacity cars arises. The Design and Construction Technological Bureau for Design and Modernization of Rolling Stock, Tracks and Artificial Structures of Dnipro National

University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan has developed a project of a sixteen-axle platform Schnabel car (Fig. 1) with a capacity of up to 250 tons.



Fig. 1. General view of the sixteen-axle platform Schnabel car

The sixteen-axle platform Schnabel car with a capacity of up to 250 tons is designed for the transportation of heavy and oversized cargoes that do not require protection against precipitation. In order to support international transportation, the operation on both 1520 mm and 1435 mm tracks is provided due to the fact that the design of this special car can use bogies for different track gauge.

Modernization of the above Schnabel car was performed, for which the products and components of metallurgical, press-forging, handling, power, electrical, chemical processing equipment, backhoe frames, bridge span structures, etc. were used.

The Schnabel car is assembled in the placement category 1 according to GOST 15150-69 [2]. It has 16 axles, which make up the railway carriage, where the load-bearing frame rests on spherical center plates through two end beams, each of which connects two four-axle bogies.

Auto-coupling and braking equipment are placed on the end beams. The supporting frame is curved in a vertical plane, with a lowered middle part – the platform on which the cargo is transported. The frame consists of four longitudinal components of unequilateral I-beams, the lower and upper flanges of which are 30 and 60 mm thick, and the walls – 14 mm, interconnected by diaphragms, ribs and top covering 14 mm thick.

Brackets and clamps for fastening the cargo are welded to the outer side surfaces of the side I-beams, and a number of holes are provided in the top covering for the same purpose.

The material of the load-bearing structures of the Schnabel car is 09G2SD steel in accordance with GOST 19281–2014 [4].

End beams are welded from the longitudinal I-beam elements covered with sheets; 14-, 30- and

60-mm thick sheet steel is used for metal structures.

The center plates are attached to the lower sheets and the middle end I-beams using insert bolts. The center plates rest on the span bolsters of four-axle bogies. To the upper sheets, center pads are attached (rotary-support nodes of the supporting beam).

Braking of each four-axle bogie is carried out by a separate automatic brake consisting of its standard 483M air distributor, brake cylinder no. 519A and a lever transmission system with autoregulator of brake cylinder rod output no. 574B. The brake is designed for the use of composite brake pads, but also does not preclude the use of cast iron ones.

The lever transmission of the four-axle bogies from each end of the Schnabel car is connected to the hand drive of the parking brake. The Schnabel car is equipped with standard automatic coupling device and absorber, footboards, handrails and brackets for signal lamps. Four-axle bogies that rolled under the car consist of typical two-axle bogies of the 18-100 model and span bolsters.

The Schnabel car is represented by a multilevel structure (Fig. 1). The main load-bearing frame rests on two intermediate beams through spherical center plates, each of which, in turn, rests on two four-axle bogies by means of flat center plates.

The load-bearing frame is made in the form of a curved beam with a lowered loading platform and has a beam structure welded from sheet metal [9]. The load-bearing frame is formed by longitudinal I-beams connected by diaphragms along their entire length. The intermediate frame has a box-shaped section made of sheet metal [10–12].

One of the important design criteria is strength. It can be checked using field experiments or CAD. In this case, under certain loads, the stress values should not exceed the allowable.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Due to computer modeling, it is possible to calculate the strength of the structural elements of transport systems. The paper considers the possibility of testing geometric models for allowable stresses in SolidWorks CAD without field experiments.

Modern conditions for the transportation of multi-ton and oversized cargo require renewal of the Schnabel cars fleet. Therefore, there is a need to modernize existing types of Schnabel cars through the introduction of modern technologies, new design and technological solutions. At the same time, the mechanical properties of the system are tested [5].

Let us consider the calculation of the intermediate beam loading of the upgraded Schnabel car in SolidWorks CAD.

The calculation of material stresses is possible using different CAD. In this case, the yield strength is determined at a given load [15].

According to OST 24.050.37-84 [1], car frames shall provide strength according to allowable stresses. First, a geometric model in SolidWorks CAD is constructed (Fig. 2). Then the material is set. Then the loads affecting the structure are set.

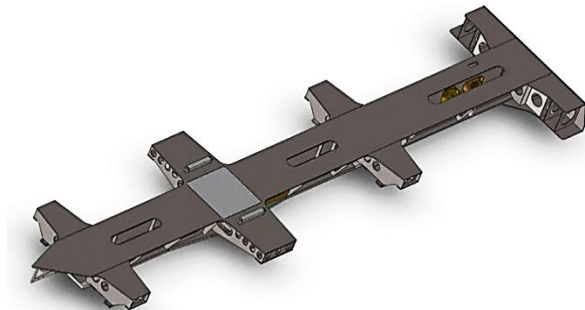


Fig. 2. Geometric model of the intermediate frame of the sixteen-axle Schnabel car

CAD automatically recognizes the model and determines the calculation accuracy: the smaller the grid step of the geometric model, the more reliable is the calculation result (Fig. 3).

SolidWorks CAD calculations show the stress distribution in the structure under the influence of design loads [16].

Then, according to the collection of loads, as well as the elements equal in strength, CAD calculates the allowable stresses using the finite element method (Fig. 4). For example, in the case of a load

in the intermediate beam of 2.5 MN [6] stresses do not exceed the strength of the model material.

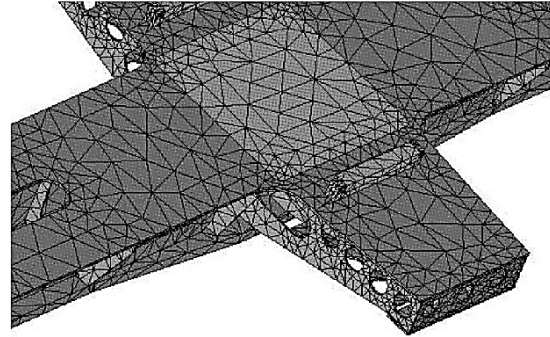


Fig. 3. Dividing the geometric model of the intermediate beam of the Schnabel car into equally strong elements

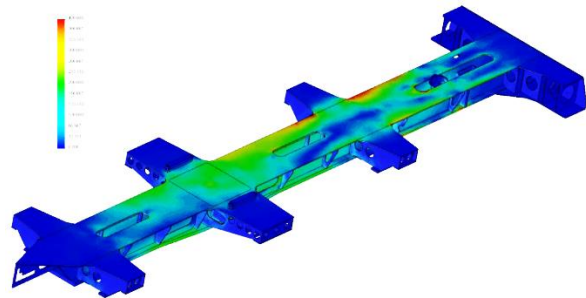


Fig. 4. Stresses in the intermediate beam, MPa (design mode, compressive force 2.5 MN)

Findings

According to the calculation of the intermediate beam loading of the modernized Schnabel car, the stresses do not exceed the allowable ones, so the design has no weaknesses.

Modern logistics capabilities allow organizing the transportation of goods of any complexity by different transport modes, including combination of different transport modes. Rail transport is most often used in cases when the cargo is delivered over long distances, the consignment weighs several tons, to transport oversized or heavy or fragile cargo that cannot be delivered by truck, or in cases where the owner has his own sidings for railway cars.

Originality and practical value

Modernization of a sixteen-axle platform Schnabel car with a capacity of up to 250 tons was further developed. The structure is loaded with a compressive force equivalent to the real load. The imple-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

mentation of the car model in SolidWorks CAD allowed testing the allowable stresses of the loaded material of the structural elements.

The SolidWorks CAD strength calculation can be applied to other parts in transport construction. The results of the work can be useful for the Design Bureau for the Design of Rolling Stock and relevant specialists.

It has become possible to calculate real geometric models of parts or elements of transport systems for the allowable stresses that occur, taking into account the accuracy and external loads acting on the system.

Conclusions

Modern transport engineering is not standing still. The introduction of new CAD allows one to clearly see the weaknesses in the structures without the field experiments.

The wear of railway rolling stock in Ukraine is over 80%. At the same time, the number of services offered by international railways is growing, and the variety of rolling stock allows transporting almost any type of cargo, including oversized one.

The car fleet needs to be updated and modernized through the introduction of new design and technological solutions. Modern CAD can significantly reduce the cost of research experiments.

The conveyor car, modernized by the Design and Development Technological Bureau of DNURT, has a number of advantages in comparison with other existing platform Schnabel cars:

1) load capacity up to 250 tons with a tare weight of 123.5 tons. The maximum load capacity of the platform Schnabel car, which is currently used on the general-purpose main lines, is 225 tons with the same weight of 123.5 tons.

2) the height of the upper sheet of the loading platform from the top of the rail heads in the empty state is 1000 mm. The same parameter for the analogue Schnabel car is, 1146 mm. Lowered loading platform allows reducing the cargo oversize index and, accordingly, the rail transportation cost;

3) when placing the cargo on the loading platform of the Schnabel car, the cargo can rest both along its entire length in the form of evenly distributed load, and through the base sheets in the form of concentrated loads;

4) the conveyor has the size 1-VM according to GOST 9238-83, which makes it possible to operate it on the entire railway network with a track gauge of 1520 (1524) mm, and on the main and a number of other railway lines, the members of the Organization for Cooperation between Rails with a track of 1435 mm, which are used for international transportations.

5) the Schnabel car can be used for transportation on international lines. For this purpose, during the design, it is possible to install buffers, traction coupling, and the brake system is adapted for operation on 1435 mm track gauge. The design of the car meets the requirements of international rules and agreements, the rules of the Organization for Cooperation between Rails (OSJD), the regulations of the International Union of Railways (UIC).

LIST OF REFERENCE LINKS

1. *ГОСТ 24.050.37-84. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества.* Москва, 1995. 101 с.
2. *ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.* [Действующий от 1971-01-01]. Москва : Стандартинформ, 2010. 71 с.
3. *ГОСТ 9238-83-2013. Габариты приближения строений и подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524 мм). Взамен ГОСТ 9238-73.* [Действующий от 1984-07-01]. Москва : Стандартинформ, 2006. 30 с.
4. *ГОСТ 19281-2014. Прокат повышенной прочности. Общие технические условия.* [Действующий от 2015-01-01]. Москва: Стандартинформ, 2021. 66 с.
5. Донченко А. В., Федосов-Никонов Д. В., Орлов О. В., Соляник М. И., Долинский С. В. Экспериментальное исследование конструкции длиннобазной платформы. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. 2013. Вип. 9. С. 71–73.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

6. *Единые технические условия эксплуатации железнодорожных транспортеров ЕТУЭ-Т*. Киев : ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2009. 95 с.
7. *Железнодорожные транспортеры*. URL: https://www.rwto.ru/zheleznodorozhnye_transportery
8. Каспакбаев К. С., Сериккулова А. Т., Карпов А. П., Устемирова Р. С., Асанов А. А. Формирование состава на железнодорожном пути с различной колеей. *Вестник КГУСТА*. 2019. № 3 (65). С. 411–419. DOI: <https://doi.org/10.35803/1694-5298.2019.3.411-419>
9. *Каталог по транспортерам железных дорог СССР колеи 1520 мм №161-ПКБ ЦВ*. МПС СССР, 1986. 320 с.
10. *Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)*. Москва : ГосНИИВ, ВНИИЖТ, 1996. 317 с.
11. *Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)*. Москва : ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. 260 с.
12. *Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых железнодорожных транспортеров общего назначения колеи 1520 мм*. Москва : ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1988. 137 с.
13. Пшинько А. Н., Мямлин С. В., Пшенько В. А., Палий Ю. Ф., Губерная Н. А., Кебал Ю. В., Стегницкий Б. М. Площадочный транспортер нового поколения грузоподъемностью 240 тонн. *Вагонный парк*. 2014. Вып. № 2. С. 1–10.
14. Радкевич М., Сапронова С., Ткаченко В. Дослідження залишкового ресурсу спеціальних вагонів. *Транспортні системи і технології*. 2021. № 37. С. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-6>
15. Рейдемейстер А. Г., Калашник В. А., Книш В. В., Соловей С. О. Опір втомі зварних елементів вантажних вагонів нової конструкції, виготовлених із сталей класу міцності С345 та С390. *Автоматичне зварювання*. 2018. № 8. С. 8–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2018.08.02>
16. Shaposhnyk V., Shykunov O., Reidemeister A., Muradian L., Potapenko O. Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-foot-long containers on an universal platform wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 7 (109). P. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225090>

І. Ю. КЕБАЛ^{1*}, О. Л. КРАСНОЩОК^{2*}

^{1*}Бюро з технологічних та інноваційних розробок, постановки на виробництво продукції машинобудування (БТІ), Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 777 56 16, ел. пошта ivankebal@i.ua, ORCID 0000-0002-8408-8294

^{2*}Каф. «Прикладна механіка і матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (098) 706 27 43, ел. пошта akrasnoshchok1996@gmail.com, ORCID 0000-0002-0140-5179

Модернізація площадкового транспортера вантажопідйомністю до 250 т

Мета. У роботі передбачено провести розрахунок на міцність елемента спеціальної конструкції вагона-транспортера для збільшення вантажопідйомності до 250 т, а також розглянути можливості використання спеціальних вагонів для перевезень негабаритних вантажів за результатами розрахунку на міцність проміжної рами транспортера. **Методика.** Розроблена спеціальна конструкція проміжної рами, що дозволило збільшити вантажопідйомність транспортера площадкового типу до 250 т. За допомогою САПР SolidWorks перевірено на міцність проміжну балку модернізованого транспортера. **Результати.** Виконано оглядовий аналіз залізничних вагонів-транспортерів. Розглянуто можливість перевірки на міцність деталей конструкції вагона-транспортера за допомогою сучасної САПР SolidWorks. У разі навантаження проміжної балки модернізованого транспортера стисною силою у 2,5 МН напруження не виходять за допустимі, тому запропонована конструкція не має слабких місць. Фахівці Проектно-конструкторського технологічного бюро з проектування і модернізації рухомого складу, колії та штучних споруд виконали дослідно-конструкторську розробку на виробництво шістнадцятивісного транспортера площадкового типу вантажопідйомністю до 250 т. **Наукова новизна.** Отримала подальший розвиток модернізація шістнадцятивісного вагона-транспортера площадкового типу вантажопідйомністю до 250 т. Реалізація моделі у САПР SolidWorks дозволила перевірити

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

конструкцію вагона-транспортера на міцність. **Практична значимість.** Результати роботи можуть бути корисні конструкторським бюро з проектування рухомого складу та відповідним спеціалістам. Використання запропонованої методики певним чином спрощує процес проектування деталей та вузлів механізмів і дозволяє з високою точністю перевірити певні параметри системи.

Ключові слова: вантажні перевезення; негабаритні вантажі; залізничний транспортер; міжнародні перевезення; модернізація вагонів; метод кінцевих елементів

REFERENCES

1. *Vagony gruzovye i passazhirskie. Metody ispytaniy na prochnost i khodovye kachestva, 101 GOST 24.050.37-84* (1995). (in Russian)
2. *Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage, and transportation conditions as to environment climatic aspects influence, 71 GOST 15150-69* (2010). (in Russian)
3. *Construction and rolling stock clearance diagrams for the USSR railways of 1520 (1524) mm gauge, 30 GOST9238-83-2013* (2006). (in Russian)
4. *High strength rolled steel. General specification, 66 GOST 19281-2014* (2021). (in Russian)
5. Donchenko, A. V., Fedosov-Nikonov, D. V., Orlov, O. V., Solyanik, M. I., & Dolinsky, S. V. (2013). Experimental study of the design of a long wheelbase platform. *Railbound Rolling Stock*, 9, 71-73. (in Russian)
6. Yedinye tekhnicheskie usloviya ekspluatatsii zheleznodorozhnykh transporterov YeTUE-T. (2009). Kiev: TOV «NVP Polighrafservis». (in Russian)
7. *Zheleznodorozhnye transportery*. Retrieved from https://www.rwto.ru/zheleznodorozhnye_transportery (in Russian)
8. Kaspakbayev, K. S., Serikkulova, A. T., Karpov, A. P., Ustemirova, R. S., & Asanov, A. A. (2019). Formation of the composition on the railway track with a different gauge. *The Herald of KSUCTA*, 3(65), 411-419. DOI: <https://doi.org/10.35803/1694-5298.2019.3.411-419> (in Russian)
9. *Katalog po transporteram zheleznykh dorog SSSR kolei 1520 mm №161-PKB TsV. MPS SSSR*. (1986). (in Russian)
10. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)*. (1996). Moscow: GosNIIV, VNIIZhT. (in Russian)
11. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i moderniziruemykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)*. (1983). Moscow: VNIIV-VNIIZhT. (in Russian)
12. *Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i moderniziruemykh zheleznodorozhnykh transporterov obshchego naznacheniya kolei 1520 mm*. (1988). Moscow: VNIIV-VNIIZhT. (in Russian)
13. Pshinko, A. N., Myamlin, S. V., Pshenko, V. A., Paliy, Yu. F., Gubernaya, N. A., Kebal, Yu., & Stenitsky, B. M. (2014). Ploshchadochnyy transporter novogo pokoleniya gruzopodemnostyu 240 tonn. *Vaghonnyj park*, 2, 1-10.
14. Radkevich, N., Sapronova, S., & Tkachenko, V. (2021). Investigation of residual resource of special railway wagon. *Transport Systems and Technologies*, 37, 50-58. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-37-6> (in Ukrainian)
15. Reidemeister, A. G., Kalashnik, V. A., Knysh, V. V., & Solovej, S. A. (2018). Fatigue resistance of welded elements of freight cars of a new design made from steels of S345 and S390 grade. *Automatic Welding*, 8, 8-14. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2018.08.02> (in Russian)
16. Shaposhnyk, V., Shykunov, O., Reidemeister, A., Muradian, L., & Potapenko, O. (2021). Determining the possibility of using removable equipment for transporting 20- and 40-feet-long containers on an universal platform wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(109)), 14-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225090> (in English)

Received: 28.05.2021

Accepted: 29.09.2021

УДК 625.42:551.242

В. Ю. УЛЬЯНОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Інженерна геологія і геотехніка», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Чернишевського, 24 а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 43, ел. пошта uluanovvu@gmail.com,
ORCID 0000-0002-9028-3408

Застосування радонометрії для виявлення зон тектонічних розломів під час проходження тунелів метрополітену в м. Дніпро

Мета. У цій роботі передбачено огрунтувати вибір найбільш дієвого в межах мегаполісу методу геофізичних досліджень для точного картування розломних зон у вивержених породах під час будівництва 2-ої черги метрополітену в місті Дніпро. **Методика.** Розроблено детально практичні й організаційні заходи щодо застосування радонометрії для цілей сейсмотектоніки під час будівництва 2-ої черги міського метрополітену, що у випадку продовження гірничопрохідницьких робіт в умовах наявності розломних зон сприяє подальшій безпечній експлуатації об'єкта. **Результати.** На підставі аналізу й оцінювання проведених у різні роки профільних досліджень було обрано один з еманацийних методів – радонометрію, запропоновано методику її застосування, яка забезпечує в умовах щільної міської забудови та складної тектоніки регіону (наявність розломних зон) отримання необхідних якісних характеристик ґрунтового розрізу. **Наукова новизна.** У роботі вперше обґрунтовано застосування радонометрії для виявлення розломних зон у вивержених породах та оцінювання їхньої активності в межах міста. **Практична значимість.** Указана методика рекомендована для створення сейсдобезпечних умов проведення буропідливних робіт під час проходження гірничих виробок, які забезпечать максимальну швидкість будівництва. У перспективі зазначені дослідження можуть бути корисні під час створення системи вентиляції підземних споруд 2-ої черги міського метрополітену. Також результати радонометрії можна враховувати під час розміщення елементів систем геотехнічного (деформаційного) моніторингу, причому як у тунелях та інших заглиблених спорудах метрополітену, так і в наземних будівлях і спорудах. Уточнення розташування розломних зон з оцінюванням їхньої активності може прямо вплинути на вибір тих чи інших способів вимірювання деформаційних параметрів досліджуваних об'єктів, сприятиме вибору засобів обробки тунелів за їхніми якісними чи кількісними параметрами.

Ключові слова: геологічна будова; метрополітен; гранітоїди; тунель; радон; тектонічний розлом; радонометрія; об'ємна активність (ОА); еквівалентна рівноважна об'ємна активність (ЕРОА)

Вступ

Геологічна характеристика території міста Дніпро. Правобережна частина території міста є рівниною з пагорбами, прорізаною балками та ярами. Найбільшими є балки Аптекарська, Червоноповстанська (Поліцейська), Рибальська, Тунельна та ін. Лівобережна територія міста є низькою алювіальною піщаною рівниною, яку перетинають численні стариці, штучні та природні озера й канали.

У геоструктурному плані територія Дніпропетровського регіону є частиною Українського кристалічного масиву (переважно це правий берег р. Дніпро), що переходить у Дніпровсько-Донецьку западину (лівий берег р. Дніпро).

У геологічній будові території міста беруть участь кристалічні породи докембрію, осадова

товща кайнозою (палеоген і неоген) та відклади четвертинної системи.

Породи докембрію представлені гранітоїдами дніпровського комплексу архей-протерозойської ери. Нерівна поверхня кристалічного масиву місцями перекрита корою вивітрювання, представленою щебенисто-деревною товщею потужністю до кількох метрів, і первинними каолінами. Потужність шару каолінів у зниженнях рельєфу кристалічних порід фундаменту може досягати 20 м і більше. Такі відклади в межах міста вивчені лише точково, переважно вздовж траси метрополітену або на ділянках максимального наближення покрівлі скельних ґрунтів до денної поверхні.

Відклади кайнозою представлені потужною товщею палеогенової та неогенової систем, які залягають на розмитій поверхні докембрійського фундаменту.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Породи бучацької світи палеогену, відносно поширені в північній частині території, трансгресивно залягають на палеозойських відкладах чи докембрійських породах і навіть на продуктах їхнього вивітрювання. Вони представлені дрібно- та середньозернистими пісками з прошарками глин, вторинних каолінів та бурого вугілля. Загальна потужність відкладів збільшується в північно-східному напрямку від 0 до 50 м. Породи київської світи трансгресивно перекривають відклади бучацької світи, вони представлені тонким блакитно-сірим мергелем, а також вуглистими глинами загальною потужністю від 30 до 40 м.

Відклади харківської світи палеогену поширені повсюдно на північ від р. Дніпро. Вони представлені однорідною товщею морських кварцово-глауконітових пісків сірувато-зеленого кольору, а також глинами та пісковиками. Глини харківського ярусу сірувато-зелені, щільні, слюдісті, подекуди тонкопіщані.

Міоцен (N1) представлений відкладами полтавської світи та середньосарматським під'ярусом. Полтавська світа (N1pl) представлена світло-сірими дрібнозернистими глинистими пісками, що залягають на піщано-глинистих відкладах палеогену. Потужність відкладів зазвичай становить 7...10 м, місцями збільшується до 15 м. Середньосарматський під'ярус (N1s2) поширений на описуваній території тільки локально. Представлений строкатими глинами з прошарками дрібнозернистих пісків. Потужність відкладів становить 6...8 м.

Пліоцен-нижньочетвертинні відклади представлені товщею червоно-бурих глин (N2 – Q1). На території міста вони значно поширені й відсутні лише в заплавах річок. Середня потужність відкладів становить 9...12 м.

Четвертинну систему в межах терас р. Дніпро представлено середнім та верхнім відділами. До середнього відділу належить нижня частина алювіальних пісків, що залягають на відкладах харківської світи, загальною потужністю до 11 м. До верхнього відділу віднесені алювіальні піски другої та першої надзаплавних терас р. Дніпро й суглинки другої надзаплавної тераси. Потужність алювіальних відкладів змінюється від 8 до 30 м. Також верхню частину розрізу верхньочетвертинних відкладів складають ле-

соподібні суглинки жовтувато-бурого кольору, макропористі, часто грудкової структури, що містять стягнення й нальоти карбонатів, у верхньому шарі гумусовані. Переважають легкі та середні різниці, що переходять у супісок. До сучасного відділу належать алювіальні перевідкладені піски та суглинки долин річок, ярів і балок.

Зауважимо, що осадові товщі достатньо вивчено під час бурових робіт, виконаних у ході інженерно-геологічних досліджень у межах міста, також під час гірничопрохідницьких робіт проведених із метою влаштування метрополітену в межах гірського відводу, вивчено кристалічні породи. У ході досліджень по трасі метрополітену було виділено та детально вивчено 24 інженерно-геологічних елементи (ІГЕ). Зокрема встановлено, що в будові кристалічного фундаменту беруть участь численні види магматичних та метаморфічних гірських порід архей-протерозойської ери, а саме: гнейси, амфіболіти, мігматити, плагіограніти, лейкократові й пегматитові граніти, діорити та грандіорити. У зонах дроблення тектонічних розломів було зафіксовано кварцові матеріали. Потужність зон окварцювання становила від 5 до 13 м. Відзначено причетність таких зон до контактів гранітоїдів, а також до зон контактів гранітоїдів із метаморфічними утвореннями.

Особливо слід відзначити, що єдиною (за своєю унікальністю) роботою з вивчення інженерно-геологічних умов території міста, що й досі не втратила свого значення, є «Інженерно-геологічний атлас м. Дніпропетровськ», створений групою вчених Дніпропетровського інженерно-будівельного інституту (ДІБІ, нині Придніпровська державна академія будівництва та архітектури (ПДАБА)) під керівництвом А. І. Кравченка (1976–1980 рр.). Зазначений документ є історичною пам'яткою, що охороняється державою й сьогодні перебуває в музеї ПДАБА. Особливо ретельно тоді вивчили гірські породи осадового комплексу, насамперед лесові.

Тектонічна будова території міста. Основною проблемою, яка існує в наш час в умовах добудовування метрополітену, є практично повна відсутність докладної тектонічної карти міста. Через «закритість» міста в період СРСР масштабні роботи в цьому напрямі не проводи-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ли, за винятком досліджень смуги вздовж траси метрополітену. Після 1991 р. цьому перешкоджала економічна ситуація в новій державі, а також процеси реорганізації наявних профільних наукових інститутів. Усі перелічені нижче дослідження з цієї проблеми мали або локальний, уривчастий, або узагальнений та опосередкований характер. Однак потреба створення такої карти сьогодні стоїть достатньо гостро, особливо після того, як було припущено й виявлено взаємозв'язок геологічних процесів, що відбуваються у верхній частині розрізу, з глибинними процесами в кристалічному фундаменті [9].

Для виправлення ситуації, що склалася, рекомендовано достатньо цікавий, однак непрямий метод виявлення тектонічних особливостей території міста, запропонований фахівцями ДП «Дніпрокосмос» спільно з Інститутом проблем природокористування та екології НАН України. Докладне вивчення рельєфу та особливостей геоморфологічної будови, за результатами аналізу космічних знімків, дозволило припустити наявність тектонічних порушень, що визначають макро- та мікрорельєф більшої частини території міста. Було припущено зв'язок елементів тектоніки архей-протерозойської кристалічної основи з орієнтацією та рисунком яружно-балкової мережі. Як робочі матеріали були використані космічні знімки з роздільною здатністю 1 м (КА Ikonos, США) та 5 м (КА IRS, Індія), а також відповідне програмне забезпечення. На основі аналізу знімків із роздільною здатністю 5 м складено лінеamentну схему правобережної частини міста (рис. 1). Аналіз розташування лінійних елементів на знімках дозволяє дійти невідомого висновку про переважаюння напрямів тектонічних зон, які, імовірно, збігаються з виявленими лінеаментами [10]. Усього, за припущенням, існує 6 основних розломних зон із розташуванням: 0–270°, 17–287°, 35–305°, 45–315°, 62–332°, 77–347°.

Фахівці ДП «Південукргеологія» свого часу запропонували власну тектонічну схему. На цій схемі територію правобережної частини міста перетинає ряд регіональних розломів різного рангу, один із яких навіть має власну назву – Каховсько-Новомосковський. Інші розломи в межах міста не названі.

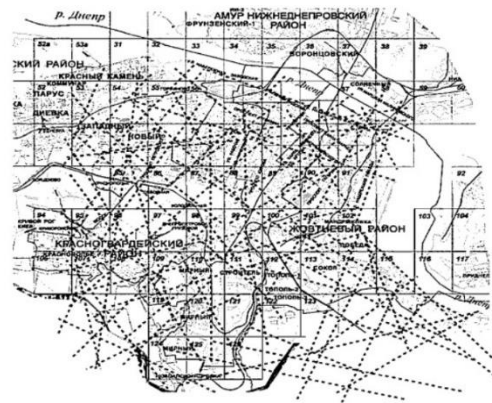


Рис. 1. Схема осевих ліній імовірних тектонічних порушень у межах правобережної частини міста за даними аналізу космічних знімків (за Волошиным та ін., 2005)

Fig. 1. Diagram of the axial lines of the assumed tectonic disturbances of the right-bank part of the city according to the analysis of satellite images (according to Voloshin et al., 2005).

Згідно з сучасними даними та базою даних активних розломів Євразії, що належить Лабораторії неотектоніки та сучасної геодинаміки РАН, центральний район міста перебуває в межах чітко вираженої неоген-четвертинної розломної зони (див. карту на рис. 2). Як видно на зазначеній карті, передбачувана розломна зона перетинає трасу метрополітену, який будують, у районі перехрестя проспекту Яворницького (колишній К. Маркса) та вул. Воскресенської (колишня Леніна).

Укладачі бази даних характеризують активність розломних зон за низкою параметрів, щодо міста заслуговують на увагу такі:

RATE – ранг швидкості молодих тектонічних рухів у межах структури;

CONF – ранг достовірності оцінювання порушення як активної структури.

Ранг швидкості руху RATE. Оскільки наявність пізньочетвертинних рухів обумовлює введення самої структури до сформованої бази даних, ранг RATE є обов'язковим. Його значення формують не лише на підставі конкретних даних про швидкість переміщення по розломах, а й ураховують усі ознаки, що відображають інтенсивність деформацій. Значення рангу RATE характеризує швидкість переміщення крил активних структур, що розділена на три категорії: <1 мм/р., 1...5 мм/р. та

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

>5 мм/р., котрі у виносці на карті позначені індексами 3, 2 та 1 відповідно. Таким чином, ранг RATE відображає як швидкість взаємного переміщення крил розлому, так і ступінь концентрації деформацій у межах об'єкта як елемента зони порушень.

Критерії оцінки CONF. За ступенем достовірності ознак активності об'єкти бази даних поділені на чотири категорії:

- *категорія А* – у матеріалах джерела наявні точні польові дані про зсуви та деформації пізньоплейстоцен-голоценових відкладів, форм рельєфу та антропогенних утворень;
- *категорія В* – характер і ступінь виразності об'єкта на детальних моделях рельєфу, космічних зображеннях та аерофотознімках;
- *категорії С і D* є непрямыми, однак їх ураховують, особливо в оцінці передбачуваної активності об'єктів. Об'єкти вводять до категорії С, коли наявні перелічені вище ознаки активності або хоча б одна з них, але всі вони виражені нечітко, виявлені не цілком переконливо, визначені неточно або можуть мати різну інтерпретацію, тоді як пліоцен-четвертинні зміщення по розлому безсумнівні.

Таким чином, розломна зона, що, імовірно, перетинає трасу метрополітену, яку будують у районі перехрестя проспекту Яворницького та вулиці Воскресенської (ПК 145–146), за рангом CONF віднесена до категорії С. А за атрибутом RATE – до категорії 2, тобто з переміщенням крил розломної зони зі швидкістю 1...5 мм/р. Також слід зазначити, що розтягування розломної зони на рис. 2 цілком узгоджується з простяганням окремих фрагментів тектонічних порушень, наведених на рис. 1, і, що цілком можливо, має лінеamentний характер.

Найбільш ґрунтовний матеріал для аналізу тектонічної будови було отримано в ході досліджень під будівництво метрополітену. За даними бурових і гірничопрохідницьких робіт, поверхня фундаменту складається із субгоризонтальних майданчиків-блоків невеликої площі, що розрізняються за висотою на 20–30 м. Ступінчастий профіль поверхні фундаменту майже повторює профіль сучасного рельєфу.

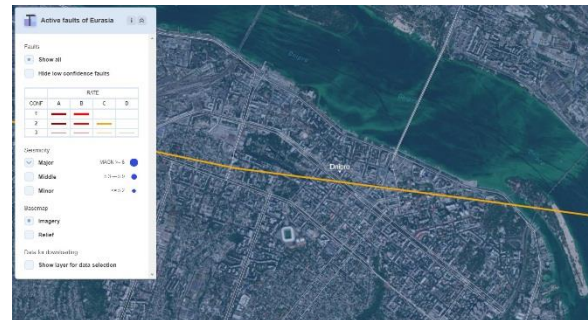


Рис. 2. Активна неоген-четвертинна розломна зона в центральній частині міста (за даними Лабораторії неотектоніки та сучасної геодинаміки РАН)

Fig. 2. Active Neogene-Quaternary fault zone in the central part of the city (according to the Laboratory of Neotectonics and Contemporary Geodynamics of the Russian Academy of Sciences)

Блоки відокремлені один від одного достатньо молодими тектонічними швами, представленими зонами дроблення, мілонітизації, каолінізації. Гірські породи на таких ділянках тріщинуваті й часто обводнені. Потужність тектонічних порушень становить від одного до декількох десятків метрів, падіння схилів у переважній більшості випадків достатньо круте (70...90°). Зони каолінізації були закладені, імовірно, в мезозої, але частина їх, мабуть, була успадкована від докембрійських структур, оскільки на деяких ділянках (свердл. 417, 426–428, 445, 446, 454–456) відзначені зони окварцювання. Наймолодшими вважають зони дроблення кристалічних порід з інтенсивною тріщинуватістю (свердл. 469, 473, 479, 478). Зони окварцювання найяскравіше виражені у свердловинах 432, 453, 460, 471.

Відповідно до схем на рис. 1, 2 трасу метрополітену, який будують, у центральній частині міста перетинають кілька розломів різного рангу, зокрема й регіональний Каховсько-Новомосковський розлом. Саме його, імовірно, було розкрито під час буріння на ділянці між зупинками «Вокзальна» та «Театральна» (колишня «Парк Чкалова»). Передбачувані розломні зони розташовані на ділянках між свердловинами 446–456, 467–473 та 477–479. Передбачувана зона тектонічного порушення розташована між свердловинами 458 і 462. Але точне місце розташування розломних зон, як і взагалі їхня

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

наявність, буде встановлена тільки за умови проходження всіх тунелів 2-ої черги метрополітену, який будують. Окрім картування точного розташування розломних зон по трасі 2-ої лінії метрополітену, не меншу значимість має визначення їхньої активності, причому встановленої не опосередковано, а достовірними прямими методами.

Мета

Основною метою роботи є обґрунтувати застосування радонометрії для точного картування розломних зон у вивержених породах Українського кристалічного масиву (УКМ), що сприяє створенню сейсмобезпечних умов проведення буропідривних робіт під час проходження гірничих виробок та підвищенню швидкості будівництва 2-ої черги метрополітену в місті Дніпро, а також оцінити методами радонометрії ступінь активності виявлених зон тектонічних розломів, щоб звести до мінімуму вплив вибухових робіт на фундаменти історичних будівель по трасі метрополітену в центральній частині міста. При цьому необхідно уточнити екологічні параметри території над виявленими розломними зонами, урахувавши щільну житлову та громадську забудову цієї частини міста.

Методика

Як уже вказано вище, усі перелічені методи досліджень є непрямими й не дають точного уявлення про напружений стан масиву гірських порід. Відзначимо, що вони взагалі мало пристосовані для практичних цілей, особливо не придатні у випадку проходження гірничих виробок під час будівництва метрополітену, зокрема в центральній частині міста. Для геотехнічного контролю потрібні відносно точні та вичерпні дані, без яких у разі ускладнених ґрунтових умов проведення будівельних робіт створює значні труднощі [21, 25].

Однак, якщо в умовах міської забудови, де через численні перешкоди застосування традиційних геофізичних методів ускладнене й досить затратне, то, можливо, має сенс застосувати інші, у т. ч. й еманаційні методи досліджень, зокрема радонометрію [20, 23].

Радон як фактор зміни напруженого стану масиву гірських порід. У складі потоку газів, що вільно розвантажуються в атмосферу Землі в зонах тектонічних розломів земної кори, поряд із метаном, вуглекислим газом, воднем і гелієм, є також інертний газ – радон (^{222}Rn). Його фізичні та радіометричні властивості – інертність, малий період напіврозпаду (3,82 діб), наявність дочірніх продуктів розпаду – послужили основою для вивчення та використання його як одного з індикаторів під час установлення ступеня активності таких зон. Постійне спостереження за зонами розломів особливо важливе, оскільки в них часто спостерігаються деформації земної поверхні, що призводять до порушень цілісності будівель, споруд, доріг, трубопроводів, зокрема й особливо важливих об'єктів, таких як міський метрополітен [12].

Формування аномалій радіоактивного газу радону в покривних відкладах над зонами розломів свого часу послужило теоретичною основою застосування еманаційної (радонової) зйомки для картування розривних порушень на закритих площинах. У 70-і роки минулого століття був установлений прямий зв'язок між інтенсивністю радонових аномалій та геодинамічними процесами в зонах розломів. Це стало основою нового напрямку досліджень у геології – так званого структурно-геодинамічного картування. Із вищесказаного випливає, що особливості поведінки ^{222}Rn в геологічному просторі створюють умови для безперервного моніторингу за ним як за індикатором напруженого стану літосфери. Це, зокрема, підтверджено й аномально високими концентраціями ^{222}Rn в періоди, що передують землетрусам.

Радіаційні вимірювання (у т. ч. й радонові) на поверхневих та підземних об'єктах під час будівництва й експлуатації метрополітенів проводяться, однак, не часто, причому здебільшого виключно з екологічною метою [2]. У зв'язку з цим заслуговує на особливу увагу досвід вимірювання радону в метрополітені м. Ташкент, траси якого рясніють аномальними тектонічними зонами у вигляді розломів, руйнувань, тріщин тощо [7]. Вибір споруд метрополітену для подібних досліджень пояснюється тим, що дозволяє досить коректно виявити зв'язок між атмосферним радоном у тектонічних аномаліях,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

грунтовым радоном та радоном у воді. У ході виконаних у метрополітені м. Ташкент досліджень зокрема було встановлено залежність об'ємної активності радону в повітрі від геофізичних та геотектонічних характеристик ділянок розташування станцій. А також було показано, що може відбуватися істотне підживлення радоном порожнин зон тектонічних розломів та розривних порушень унаслідок конвекційно-дифузійних процесів [1]. Тектонічні аномалії земної кори, відіграючи роль своєрідних колекторів радону, можуть істотно впливати на формування та варіації радонових полів в атмосфері підземних споруд, підвальних приміщень та перших поверхів житлових і громадських будівель. Однак на тлі досліджень у сейсмічно активних регіонах, до яких, зокрема, відносять і територію Узбекистану, аномальну поведінку радону в зонах тектонічних розломів та в інших порушеннях земної кори в умовах відносної сейсмостабільності та відсутності поштовхів дослідники практично не розглядали. Закономірності таких процесів не вивчені, їх вважають неактуальними. Відомо, що, окрім досліджень, проведених у метрополітені Ташкента, радонову зйомку проводили й на об'єктах метрополітену в Санкт-Петербурзі, проте найчастіше в комплексі з іншими геофізичними роботами, зокрема спектрально-сейсмічним профілюванням (ССП).

Слід зазначити, що відомості про вимірювання радону в спорудах першої черги міського метрополітену Дніпра, на відміну, наприклад, від Києва, відсутні [22]. Відомо, що під час спорудження 2-ої черги міського метрополітену вимірювання радону також не проводять і навіть не розглядають питання про проведення таких досліджень. Вимірювання радону з екологічною метою в місті якщо і проводили, то тільки в житлових будинках і дуже обмежено, а карт радононебезпеки (на відміну від м. Кропивницького – колишнього Кіровограда, Жовтих Вод та Кам'янського – колишнього Дніпродзержинська) просто немає або вони обмежені та недосконалі. На наявних картах розташування розломних зон зазначено лише приблизно, чого зовсім недостатньо як для виконання гірничопрхідницьких робіт, так і інших робіт будівельного циклу, у тому числі

тих, які проводять із боку денної поверхні, зокрема сторонні організації з розвитку міста.

Але навіть вибіркові виміри радону показали достатньо високі значення (порівняно з вимірами по місту) в районі перетинання трасою метрополітену колишньої вул. Дзержинського (нині вул. Вернадського), якраз на стику нагірного та центральної частини міста. У цій же ділянці наявні й вузли перетинання різнорангових розломних зон.

Порядок проведення робіт. Приблизний план проведення досліджень у центральній частині міста наведено нижче. За потреби, його можна видозмінити або доповнити. Слід зазначити, що виконання робіт за цим планом можливе і після завершення будівництва 2-ої черги метрополітену.

Зауважимо, що до проведення польових та лабораторних робіт допускають лише сертифіковані організації, що мають у своєму розпорядженні відповідне обладнання та висококваліфікований персонал і за умови проходження метрологічної перевірки. Як відомо, перелік необхідного обладнання, так само як і стандартних методик проведення вимірювань у конкретних точках, досить широкий, і в цій роботі ми його не розглядаємо.

Для точного картування зон тектонічних розломів пропонуємо комплекс радонометричних досліджень, що містить, як основну складову вимірювання ґрунтового радону в шпурах по трасі будівництва метрополітену, і як додаткову – вимірювання еквівалентної рівноважної об'ємної активності (ЕРОА) радону, яке можна здійснювати у вибраних будинках (на проспекті Яворницького, орієнтовно від залізничного вокзалу до монумента Слави). Першочерговою ділянкою робіт може бути відстань між вул. Ю. Словацького (колишня Серова) та вул. Мономаха (колишня Московська). Наступними за значимістю є такі ділянки: від вул. Барикадна до вул. С. Єфремова, від вул. Кн. Ольги (колишня Горького) до вул. Столярова.

Розташовати профіль вимірювання об'ємної активності (ОА) ґрунтового радону потрібно вздовж алеї центрального проспекту міста паралельно до лінії міського трамвая № 1, орієнтовно між осями тунелів метрополітену, який споруджують. Крок вимірювання – 100 м. Точ-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ки вимірювання повинні збігатися з пікетами, наміченими під час проведення інженерних вишукувань. За наявності за профілем протяжних заасфальтованих ділянок допускають зміщення точок до найближчих ділянок зелених насаджень (газонів), де можливе проходження шпурів. Допускають згущення точок вимірювання ОА ґрунтового радону на ділянках імовірних тектонічно активних розломних зон до кроку 50 м. Розміщення точок буріння шпурів для реєстрації ґрунтового радону потрібно узгоджувати з відповідними міськими службами на предмет відсутності комунікацій. Для уточнення зон виявлених аномалій радону за додатковим обґрунтуванням можливе проведення вимірювань щільності потоку радону за обраними профілями на основі спеціально розробленої програми робіт.

Також додатково, за необхідності, проводять і одноразове вимірювання радону в повітрі тунелів метрополітену, який будують, звичайно, за вимкненої вентиляції, а в тунелях працюючої лінії метрополітену – за додаткового обґрунтування та за окремою програмою. Під час виконання робіт проводять і температурні вимірювання.

Паралельно проводять одноразовий відбір шахтних вод на вміст радону в тунелях метрополітену, який будують. Місця відбору проб води повинні збігатися з місцями вимірів радону в повітрі тунелів. У тунелях працюючого метрополітену – лише за додаткового обґрунтування. У разі неможливості з будь-яких причин здійснити відбір проб води безпосередньо в тунелях метрополітену допускають відбір із режимних або технологічних свердловин по трасі, якщо такі наявні й перебуватимуть у робочому стані. Потрібно також забезпечити доступ до заглиблених об'єктів метрополітену, який будують, із метою відбору проб і проведення вимірювань. Під час виконання робіт вимірюють і температуру води.

Роботам із вимірювання ЕРОА радону в будівлях має передувати інженерно-технічне обстеження обраних будівель із метою вибору місць установлення реєстру вальної апаратури й забезпечення її охорони на період проведення досліджень. Перелік будівель, що підлягають обстеженню, повинен бути визначений на основі геологічних і тектонічних умов району та

ділянок робіт, а також за графіком робіт будівельного циклу зі спорудження об'єктів метрополітену.

Перед вимірюванням ЕРОА радону в будівлях обов'язково проводять первинне замірювання ОА ґрунтового радону за профілем лінії метрополітену, який будують. Роботи бажано виконувати лише в теплий період року.

Моніторинг радону обраним способом проводять у будинках «червоної лінії» по обидва боки від проспекту, бажано одночасно. Освітні, медичні та дитячі установи другої лінії в обов'язковому порядку також повинні бути внесені до переліку обстежуваних будівель. Обстеження інших будівель другої лінії на цьому етапі робіт проводять за додатковим обґрунтуванням. Первинний моніторинг радону проводять у всіх доступних будинках у нижніх житлових поверхах та заселених підвалах. Надалі – лише у вибраних будинках (з ЕРОА радону вищою за нормативні значення) за спеціальною програмою, яка передбачає інтегральні вимірювання за допомогою пасивних трекових радонometrів, вимірювання потужності експозиційної дози, миттєві експрес-виміри радону, гаммаспектрометричний аналіз ґрунту на вміст радіонуклідів та ін.

Замірювання ЕРОА радону в будівлях потрібно проводити упродовж усього періоду будівництва метрополітену (особливо ретельно проведення вибухових робіт під час проходження тунелів, що вимагає ув'язування з графіком робіт на об'єктах) із періодичністю 2 рази на рік (на ділянках проходження тунелів під час проведення вибухових робіт – 1 раз на квартал). У період експлуатації новозбудованої лінії – за результатами проведення намічених робіт і додаткового обґрунтування.

Для полегшення доступу до приватних будинків і міських установ та офісів (крім закритих банківських та інших установ), розташованих на ділянці робіт, відповідні міські служби оформляють дозвіл, який не може бути оскаржений власниками в судовому чи іншому (адміністративному) порядку.

Дані вимірювань ув'язують із результатами бурових і гірничо-прохідницьких робіт у тунелях метрополітену, який будують, і подають у вигляді карти активності радону, на якій мають бути відзначені всі радонові аномалії, за-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

безпечена їх прив'язка до виявлених або припустимих розломних зон із зазначенням ступеня активності розломів, інтенсивності радоновиділення з надр. Виявлені флюїдопровідні канали можуть бути відображені у вигляді радіально-азимутальних еманційних (радонових) проєкцій. Також на карті повинні бути відзначені ділянки денної поверхні по трасі будованого метрополітену, із зазначенням величин осідань (у мм) міських будель і споруд та з відображенням їхньої динаміки за період проведення будівельних робіт. Так само складають карту температурних аномалій повітряного середовища в тунелях (за вимкненої вентиляції) та підземних вод у прямках тунелів і геотехнічних свердловин.

Таким чином, у цілому ідея використання радонометрії для точного картування зон тектонічних порушень по трасі метрополітену, який будують, не нова, а її базові наукові положення досить добре опрацьовані й випробувані на практиці, причому в різних регіонах і різних геологічних умовах [5, 6, 15, 23, 24].

Результати

Проведений комплексний аналіз наявних фондових та архівних маріалів підтвердив існування ознак неотектонічної активності на території міста. Як відзначав у своїх численних статтях геолог А. А. Кримцов, який одним із перших звернув увагу на проблеми неотектоніки, у місті існують будівлі та споруди, деформації яких не можна пояснити тільки зі звичайних позицій (осіданням лесових ґрунтів, суфозією, зсувами і т. под.) [16–19]. Усі такі споруди з деформаціями добре вписані в систему молодих порушень, визначених на підставі мікроморфоструктурного аналізу, який переважно базується на реконструкції природного рельєфу міста. До реконструйованих форм та елементів рельєфу належать: уступи, яри, улоговини, фрагменти русел. Багато з виділених таким чином неотектонічних структур типу зон дроблення, зсуву, лінійних кір вивітрювання підтверджені даними інженерно-геологічних досліджень й отримані під час проходження тунелів метрополітену.

За сучасними даними, у місті, починаючи з 1983 р., фіксують тектонічну активність. Осо-

бливо це стосується дрібноблокових структур кристалічного фундаменту. Неглибоке залягання скельних порід та широкий фактичний матеріал інженерно-геологічних досліджень, у т. ч. й по трасі метрополітену, надає унікальну можливість визначити особливості, а іноді й ступінь впливу блокових посувань на рельєф. У наш час на території міста виділено 77 неотектонічних блоків, межами між якими є зони з активними проявами в т. ч. і процесів зсувоутворення, а також деформацій будівель і споруд [11].

За А. А. Кримцовим, найновішу активність розломно-блокових структур у межах міста встановлюють за низкою ознак, а саме: різницею у висотах поверхонь скельного фундаменту сусідніх блоків, а також відображенням у породах верхнього структурного поверху (осадового). У сучасному рельєфі зони розломів виражені таким чином:

- у вигляді прямолінійних уступів терас, зокрема й пізньочетвертинних, із простяганням $290\ldots 300^\circ$;

- у вигляді великих ерозійних форм (балок, улоговин) із простяганням на $40\ldots 50^\circ$, рідше $80\ldots 90^\circ$ й $0\ldots 10^\circ$.

У породах осадового чохла до порушень належать різкі зміни генетичних типів, потужностей і фацій четвертинних відкладів.

За матеріалами інженерних досліджень по трасі метрополітену, до зон найновішої активізації тектонічних процесів належать ті, які розмежовують блоки, що помітно відрізняються за висотою поверхні фундаменту (більше ніж на 20 м). Такі уступи розкриті свердловинами 413, 469–471, 478–479. Це Мандриківський, Нагірний і Центральноміський неотектонічні блоки розмірами від 2,5 до 10 км. Великі блоки розділені порушеннями більш низьких порядків на дрібні блоки з розмірами перших сотень метрів. Неотектонічна активність дрібних блоків може бути наслідком перерозподілу напружень як у зонах контактів мегаблоків, так і всередині окремих блоків. Градієнти сучасних підняття у межах міста складають до кількох міліметрів на рік. Це чітко підтверджує і висотне розташування в розрізі морських сарматських відкладів.

Установлення характеру та ступеня впливу дрібноблокових неотектонічних рухів на формування рельєфу й поширення осадових відк-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ладів різноманітного віку дозволяє більш повно оцінювати інженерно-геологічні умови території міста, а також типізувати їх на морфотектонічній основі. Виконані дослідження дозволили зробити практичні висновки, а саме:

- оскільки деякі розломні зони чітко виражені в рельєфі завдяки своїй найновішій активності, то цілком можливі й сучасні посування блоків із повним набором факторів впливу на міцність підземних і наземних споруд;

- наявність активних розломів у рельєфі міста дозволяє виділяти їх геоморфологічними методами, якщо в умовах міської території через численні перешкоди неможливе вживання більшості геофізичних методів.

На жаль, завершити свої дослідження з низки причин А. А. Кримцову так і не вдалося, послідовників у нього також не виявилось, тому про проведення подібних досліджень після 1991 р. відомості не знайдено.

Після завершення будівництва 1-ої лінії метрополітену, відзначеної, до речі, низкою аварій, найбільш вивченим районом міста, починаючи з 1997 р., стає ж/м Тополя–1. Не вдаючись у подробиці геологічних подій, які сталися на цьому масиві достатньо широко й докладно висвітлених у численних наукових роботах, звернемо увагу на їх передбачувану неотектонічну складову. Із цієї точки зору низка дослідників відзначила:

- чіткі прояви диференційованих сучасних тектонічних рухів земної кори за досліджуванний період із 1960 р. по теперішній час;

- сучасну активність блокових будов осадового чохла в просторі та часі, тісно пов'язану з характером коливально-інверсійних розломно-блокових рухів докембрійського кристалічного фундаменту;

- істотну просторово-часову та інверсійну активність розломів, яка вплинула на «оформлювання» морфоструктур осадового чохла та віддержало динаміку геоблоків кристалічного фундаменту на етапі сучасного рельєфоутворення, формування яружно-балкової сітки й деструкції плато;

- переважання вертикальних тектонічних рухів блокових будов фундаменту й осадового чохла, які, безсумнівно, корелюються з активними зсувними процесами в балках Зустрічна, Тунельна, Єпаторійська та ін. [4, 28, 29].

Таким чином, подібні процеси, здається, притаманні й останній частині міської території на правобережжі. На погляд автора цього дослідження, найбільш активно деформаційні процеси можуть спостерігатися у вузлах перетинання неотектонічних розломів, котрі мають місце і по трасі будованого метрополітену. Дослідження стійкості тунелів метрополітену в зонах розломів за різних кутів нахилу їхніх площин відомі, однак здебільшого вони стосуються пухких ґрунтів [13, 34]. Безсумнівно, що спостереження в тунелях будованого міського метрополітену за замірами тріщинуватості скельних порід в міру заглиблення гірничих виробок поповнять базу даних щодо їхньої азимутальної орієнтації. Однак слід ураховувати, що через застосування виключно вибухових робіт під час проходження тунелів частина цієї інформації може виявитися непоказною.

Зокрема, за результатами картування розломних зон еманційним (радоновим) методом (на прикладі вимірювань у кристалічних породах деяких регіонів, у т. ч. й Тіманського краю), були зроблені досить цікаві висновки, а саме:

- розломні зони чітко відображаються в полі радону підвищеними значеннями його об'ємної активності (ОА);

- максимальні значення активності радону відповідають тектонічним порушенням, які найближче підходять до денної поверхні;

- уздовж лінії розлому значення ОА можуть змінюватися, а також вони змінюються в різний час у межах однієї ділянки розлому;

- ширина зони підвищених значень активності радону завжди більша за саму зону розлому [26].

Як можна уявити, аналогічні або подібні особливості вимірювань, імовірно будуть наявні й під час робіт на території міста.

Крім того, було встановлено, що саме до розломних зон у Північномууйському залізничному тунелі БАМу, що в Забайкаллі, належать усі виявлені наднормативні аномалії вмісту радону в повітрі гірничих виробок, а також надвисокі концентрації радону в субтермальних підземних водах [8]. З усього вищевикладеного випливає, що, крім тектонічної складової, траса метрополітену як об'єкт підвищеної екологіч-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

ної небезпеки, відповідно до вимог нормативних документів, повинна бути обов'язково всебічно досліджена і з цього боку [3]. Тому великої уваги вимагає питання про виділення радону з численних зон тектонічних порушень по трасі метрополітену вже в ході експлуатації його 1-ої черги як наслідок впливу вібрації під час руху поїздів.

Більш широке застосування зазначеного методу для практичних цілей геодинаміки та сейсмотектоніки досі стримується недосконалістю вітчизняної нормативної бази, яка потребує серйозного оновлення. Зокрема, свого часу спеціалісти КП «Кіровогеологія» спільно з НТК «Інститут монокристалів» НАН України вказали на доцільність розробки «Методики виділення небезпечних за радоном територій та окремих населених пунктів». Ця методика включає містить такі положення:

- визначення ексгаляції радону з надр за даними аерогаммаспектрометрії з наземним вимірюванням виявлених аномалій;
- контрольне визначення забруднення повітря будівель радоном та його дослідно-помислової розробки (ДПР);
- аспіраційний метод досліджень із використанням інтегральних та твердотільних детекторів;
- використання геологічної, геофізичної, гідрогеологічної, геоморфологічної та іншої інформації для прогнозування потенційно радонебезпечних зон [14].

Проте роботу над цим нормативним документом, із низки причин, так і не було завершено. Крім цього, украй необхідний нормативний документ із радонометрії для потреб геодинаміки, відсутність якого стримує проведення подібних робіт на майданчиках розміщення особливо важливих об'єктів, до яких, зокрема належать і АЕС.

Маловивченим залишається питання впливу «роїв» землетрусів малої та середньої інтенсивності (максимум 4 бали за шкалою МСК–64 для умов міста) на позаобробний простір у вже збудованих тунелях, розташованих у межах наявних та можливих тектонічних порушень, а також характер прояву геодформаційних процесів у вигляді зсувів за межами гірських блоків активних розломів, якщо такі будуть виявлені в ході припущених досліджень.

Оцінювання активності розломних зон можливе також і за допомогою термометрії, проте це питання, за всієї його актуальності, відносно мало розроблене, незважаючи на те, що термометрію застосовують, хоча й обмежено, під час геотехнічного моніторингу вже збудованих тунелів [24, 30].

Отже, проблематика вимірювання радону в залізничних тунелях, зокрема і в тунелях метрополітену, і досі вкрай актуальна та відображена в численних публікаціях [31, 32, 34, 35].

Наукова новизна та практична значимість

У цій роботі вперше обґрунтовано застосування радонометрії для виявлення розломних зон у вивержених породах Українського кристалічного щита в межах міста Дніпро для створення сейсмобезпечних умов проведення буропідричних робіт під час проходження гірничих виробок, а також для оцінювання активності виявлених тектонічних зон, що створюють загрозу проведенню вибухових робіт, із метою зменшення шкідливого впливу на фундаменти історичних будівель.

У перспективі зазначені дослідження можна проводити під час створення системи вентиляції підземних споруд 2-ої черги міського метрополітену.

Також результати радонометрії можна враховувати у випадку розміщення елементів систем геотехнічного (деформаційного) моніторингу, причому як у тунелях та інших заглиблених спорудах метрополітену, так і в наземних будівлях та спорудах. Зауважимо, що уточнення розташування розломних зон з оцінюванням їхньої активності прямо впливає на вибір тих чи інших способів вимірювання деформаційних параметрів досліджуваних об'єктів, крім того, є підставою вибору засобів обробки тунелів, які визначають їхні якісні чи кількісні параметри.

Як було вказано, більш широке застосування цього методу для практичних цілей геодинаміки та сейсмотектоніки неможливе через недосконалість вітчизняної нормативної бази, яка потребує негайного оновлення.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Висновки

Проаналізовано доступні фондові та архівні матеріали про геологічну будову, інженерно-геологічні умови та тектоніку міста Дніпро, а також матеріали проведених різними науковими та виробничими колективами досліджень по трасі метрополітену 1-ої черги. Належним чином проаналізовано матеріали аналогічних досліджень, проведених під час будівництва метрополітенів в інших країнах.

Незважаючи на те, що на сьогодні повна тектонічна карта міста Дніпро відсутня, за сучасними даними, у місті, починаючи з 1983 р., фіксується тектонічна активність. Особливо це стосується дрібноблокових структур кристалічного фундаменту. Ураховуючи неглибоке залягання скельних порід, у тому числі й по трасі метрополітену, визначено особливості впливу блокових рухів на рельєф, їхній ступінь.

На території міста виділено 77 неотектонічних блоків, межі між якими є зонами активності, у яких проявляються, зокрема, і процеси зсуву, а також деформації будівель і споруд.

Геоморфологічний метод виявлення розломних зон разом із дешифруванням аерофотознімків і знімків із космічних апаратів як непрямий метод не дає точного уявлення про напружений стан масиву гірських порід. Ураховуючи, що такі методи малозастосовні для практичних цілей, особливо в частині проходження гірничих виробок під час будівництва метрополітену в місцях щільної забудови, а стан розломних зон в усіх джерелах зазначено лише приблизно, цього цілком замало для проведення робіт будівельного циклу.

Оскільки застосування традиційних геофізичних методів у місцях щільної забудови

також є ускладненим і затратним, пропонуємо застосовувати еманаційні методи досліджень, зокрема радонометрію.

Для вирішення проблем, пов'язаних із тектонікою центральної частини міста, важливою є належна розробка методичних та організаційних питань застосування радонометрії, що сприятиме правильному проведенню гірничих робіт в умовах щільної міської історичної забудови. Це можна враховувати й під час проектування майбутніх ліній метрополітену.

Розроблені заходи із застосуванням радонометрії передбачають обробку даних вимірювань, що представлені у вигляді карти радонової активності із зазначенням усіх радонових аномалій та їх прив'язкою до виявлених або припущених розломних зон. Карта відображає виявлені флюїдопровідні канали в межах смуги досліджень у вигляді радіально-азимутальних еманаційних (радонових) проєкцій, а також температурні аномалії, ділянки денної поверхні по трасі метрополітену, який будують, із зазначенням величин осідань (у мм) міських будівель і споруд та їх динаміку за період проведення будівельних робіт.

Потребує вивчення проблема впливу землетрусів малої та середньої інтенсивності на позаобробний простір у вже збудованих тунелях, розташованих у зонах наявних та можливих тектонічних порушень, характер прояву геодформаційних процесів за межами гірських блоків активних розломів, а також питання екологічного контролю за виділеннями радону із зон тектонічних порушень в ході експлуатації 2-ої черги метрополітену внаслідок вібрацій від руху потягів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акимов В. А., Яфасов А. Я. Тектонический фактор в формировании радоновых полей в атмосфере Ташкентского метрополитена. *Атомная энергия*. 2001. Т. 90, Вып. 2. С. 115–121.
2. Акимов В. А. *Исследование динамик радонового газа на территории Ташкентского метрополитена* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Институт ядерной физики. Ташкент, 2001. 25 с.
3. Алексеев В. Б., Смирнов В. В. Исследование процессов накопления радона в подземных помещениях метрополитена. *АНРИ*. 1996/97. № 3 (9). С. 85–88.
4. Антонов Ю. Р., Левенко А. С. Опасные геологические процессы в Днепропетровске. *Экополис : Экологический журнал Днепропетровского городского Совета*. 2002–2003. № 1. С. 33–37.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

5. Бугаев Е. Г., Спивак А. А., Соловьев С. П. Перспективы использования геофизических полей при выборе площадки и обосновании стабильности геодинамических и сейсмологических условий при эксплуатации АС. *Ядерная и радиационная безопасность*. 2013. № 4 (70). С. 10–17.
6. Божежа Д. Н., Прилуков В. В., Пидлисн І. С., Петрановская М. А. Применение мобильных геофизических методов для обследования инженерно-геологических условий. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*. 2014. Вип. 11. С. 154–162.
7. Булат А. Ф., Слащев И. Н. Использование продуктов распада радона как информативных параметров для оценки геомеханического состояния горных пород. *Геотехническая механика*. 2017. № 132. С. 3–16.
8. Булнаев С. А., Тарасов С. А., Тарасов И. А., Миromanов И. А., Миromanов М. А. Радон в Северомуйском железнодорожном тоннеле. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАН*. 2007. Т. 31, № 5. С. 101–111.
9. Вольман Ю. К., Новик Н. Н., Останин А. М. Тектонические предпосылки катастрофического развития природных и техноприродных геосистем. *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2005. Т. 1, Вып. 1. С. 47–55.
10. Волошин В. И., Шапарь А. Г., Переметчик Н. Н. Исследование опасных экзогенных процессов на территории города Днепропетровска с использованием спутниковых снимков. *Космічна наука і технологія*. 2005. Т. 11, № 5-6. С. 51–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2005.05.051>
11. Волошин В. И., Переметчик Н. Н., Шапарь А. Г. Прогнозирование проявлений опасных геологических процессов в городе Днепропетровске с использованием методов аэрокосмического дистанционного зондирования Земли. *Космічна наука і технологія*. 2004. Т. 10, № 5-6. С. 194–196. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2004.05.194>
12. Гендлер С. Г., Яковенко А. А. Оценка радиационной обстановки в подземных сооружениях Санкт-Петербургского метрополитена. *Записки Горного института*. 2013. Т. 206. С. 146–149.
13. Гусев В. Н., Лонжид Э. Б. Прогноз зоны влияния от проходки тоннеля существующих наклонных контактов горных пород. *Естественные и технические науки*. Москва. 2018. № 5 (119). С. 90–94.
14. Евдокимов Д. М., Солодовникова Л. Н. Выделение радоноопасных зон по данным аэрогамма-спектрометрии. *Метрoлогія-2012*. 2012. С. 584–591.
15. Иванов Л. А., Иванова Д. Л., Савченко А. В., Туманов В. В., Трифонов А. С. Условия применения геофизических методов для оценки современной активности разрывных нарушений. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2013. № 13, Ч. 2. С. 320–331.
16. Крымцов А., Афанасьев О., Свічкарь К. Ярусність рельєфу міста Дніпропетровська. *Геоморфологія в Україні : новітні напрямки і завдання*. 1999. С. 134–136.
17. Крымцов А. А., Афанасьев О. Е., Шевченко Б. Е. Историко-географическое районирование как один из аспектов урбоэкологических исследований городской среды г. Днепропетровска. *Грані*. 2001. № 3 (17). С. 22–29.
18. Крымцов А. А., Зеленская Л. И. Реконструкция природного рельефа Днепропетровска (экологический аспект). *Физическая география и геоморфология*. 1991. Вип. 32. С. 154–160.
19. Крымцов А. О. Сучасна тектоніка, екзогенні процеси і деформація споруд у місті Дніпропетровську. *Журнал з геології, географії та геоecології*. 2002. С. 1–4.
20. Лебедев М. О., Романевич К. В. Инженерно-геофизические исследования при реконструкции подземных сооружений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 5. С. 97–110. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-05-0-97-110>
21. Маслак В. А., Безродный К. П., Лебедев М. О., Лаптев Н. А. Геотехнический мониторинг при щитовой проходке наклонного тоннеля Санкт-Петербургского метрополитена. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2010. Вып. 2. С. 152–159.
22. Орлюк М., Марченко А., Яцевський П. Зв'язок радонових і магнітних аномалій на території Українського щита та міста Києва. *Геодинаміка*. 2018. № 1 (24). С. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.080>
23. Седин В. Л., Ульянов В. Ю., Бикус Е. М. Шкала оценки активности тектонических разломов земной коры по интенсивности радоновыделения из недр на площадках строящихся и действующих АЭС. *Геориск*. 2015. № 4. С. 48–52.
24. Семинский К. Ж., Семинский А. К. Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации. *Геодинамика и тектонофизика*. 2016. Вып. 7 (3). С. 477–493. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0218>

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

25. Стрилец А. П., Пчёлкин Г. Д. Обоснование сейсмобезопасной масса групп шпуровых зарядов при проведении взрывных работ на строительстве тоннелей метро. *Сборник научных трудов НГУ «Днепро-ская политехника»*. 2019. № 58. С. 119–132. DOI: <http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.119>
26. Удоратин В. В., Езимова Ю. Е., Магомедова А. Ш. Объемная активность радона в пределах разломных зон Кировско-Кажимского и Печоро-Колвинского авлакогенов. *Литосфера*. 2017. Т. 17, № 6. С. 136–152. DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-136-152>
27. Ульянов В. Ю. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асей-смичных регионах. *Проблемы недропользования*. 2015. № 1. С. 103–107.
28. Шаталов Н. Н. Тектонические предпосылки техногенно-природной катастрофы в городе Днепр. *Доповіди НАН України*. 2019. № 2. С. 68–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.02.068>
29. Швецов В. А., Меркин В. Е., Пискунов А. А., Петропавловских О. К., Лашков М. В. Нештатные ситуа-ции при строительстве объектов метрополитена. Причины и ликвидация последствий. *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2014. Вып. 5 (24). С. 1–18.
30. Шумакова Е.М. Геодинамика как одна из возможных причин повышения температуры воздуха в зим-ний период бассейне Волги. *Учёные записки РГГМУ*. 2019. № 55. С. 59–73. DOI: <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-55-59-73>
31. Maestre C. R., Yepes Ch. S., Echarri V. I. The Radon Gas in Underground Constructions. Railway Tunnel of Alicante (Spain). *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4.5. P. 393–395. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.5.20190>
32. Mao H., Zhu M., Wu F., Huang H. Detection and Control of Radon and its Progenies in a Tunnel. *2019 Inter-national Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2019)*. 2019. Vol. 136. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913604005>
33. Ghafari M., Nahazanan H., Md Yusoff Z., Nik Daud N. N. A novel experimental study on the effects of soil and faults' properties on tunnels induced by normal and reverse faults. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Iss. 11. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10113969>
34. Purnell C. J., Frommer G., Chan K., Auch A. A. Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects. *Radiation Protection Dosimetry*. 2004. Vol. 108. Iss. 4. P. 353–364. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch035>
35. Tan B., Yang G., Fu S., Xu, C. Study on radon concentration variation during subway construction. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020. Vol. 191. Iss. 4. P. 409–422. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa168>

V. Y. ULYANOV^{1*}

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

Rationale for the Use of Radonometry to Identify the Areas of Tectonic Faults During the Passage of Subway Tunnels in Dnipro

Purpose. The article is aimed to substantiate the choice of the most effective method of geophysical research within the metropolis for more accurate mapping of fault zones in erupted rocks for the purposes of 2nd stage sub-way construction in the city of Dnipro. **Methodology.** Practical and organizational measures for radonometry for seismotectonics during the 2nd stage construction of the city subway were developed in detail, which in case of continued mining operations in the ravine-beam system contributes to further safe operation of the facility. **Findings.** Based on the analysis and evaluation of all profile studies conducted in the city in different years, one of the emanation methods was chosen – radonometry, and the method for its implementation was proposed, which pro-vides dense urban development and complex tectonic structure of the region (fault zones) to obtain the necessary quality characteristics of soil incision. **Originality.** This paper for the first time provides a rationale for radonometry to identify fault zones in erupted rocks and assess their activity within the city. **Practical value.** The given technique is recommended for ensuring seismically safe conditions of drilling and blasting works during the passage of mine workings, which will ensure the maximum construction speed. In the future, these studies may be required when creating a ventilation system for underground structures of the 2nd stage of the city subway. Also, the radonometry results can be taken into account when placing elements of geotechnical (deformation) monitoring systems, both in

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

tunnels and other deep-seated subway structures, and in buildings and structures. Clarification of the position of fault zones with the assessment of their activity can directly affect the choice of certain methods of measuring the deformation parameters of the observed objects, facilitate the choice of means of tunnel processing, highlight their qualitative or quantitative parameters.

Keywords: geological structure; subway; granitoids; tunnel; radon; tectonic fault; radonometry; volumetric activity; equivalent equilibrium volumetric activity

REFERENCES

1. Akimov, V. A., & Yafasov, A. Ya. (2001). Tectonic factor in the formation of radon fields in the atmosphere of the Tashkent metro. *Atomic energy*, 90(2), 115-121. (in Russian)
2. Akimov, V. A. (2001). *Issledovanie dinamik radonovogo gaza na territorii Tashkentskogo metropolitena* (Extended abstract of PhD dissertation). Institute of nuclear physics. Tashkent, Uzbekistan. (in Russian)
3. Alekseev, V. B., & Smirnov, V. V. (1996/97). Issledovanie protsessov nakopleniya radona v podzemnykh pomeshcheniyakh metropolitena. *ANRI*, 3(9), 85-88. (in Russian)
4. Antonov, Yu. R., & Levenko, A. S. (2002-2003). Opasnye geologicheskie protsessy v Dnepropetrovske. *Ekopolis: Ekologicheskii zhurnal Dnepropetrovskogo gorodskogo Soveta*, 1, 33-37. (in Russian)
5. Bugaev, E., Spivak, A., & Soloviev, S. (2013). Prospects of use of geophysical fields at a choice of a site and justification of stability of geodynamic and seismic conditions at pns operation. *Nuclear and Radiation Safety Journal*, 4(70), 10-17. (in Russian)
6. Bozhezha, D. N., Prilukov, V. V., Pidlisna, I. S., & Petranovskaya, M. A. (2014). Mobile geophysical methods application for the engineering-geological conditions examination of problem area in city. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 2, 154-162. (in Ukrainian)
7. Bulat, A. F., & Slashchev, I. N. (2017). The use of radon decay products as informative parameters for evaluation of the rocks geomechanical condition. *Geo-Technical Mechanics Collected of Scientific Papers*, 132, 3-16. (in Russian)
8. Bulnaev, S. A., Miromanov, M. A., & Tarasov, I. A. (2007). Radon v Severo-Muyskom zheleznodorozhnom tonnele. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences*, 5(31), 101-111. (in Russian)
9. Wolfman, Yu. M., Novik, N. N., & Ostanin, A. M. (2005). The tectonic preconditions of natural and technonatural geosystems development. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*, 1(1), 47-55. (in Russian)
10. Voloshin, V. I., Shapar, A. G., & Peremetchik, N. N. (2005). Study of dangerous exogenous processes located on Dnepropetrovsk city territory using satellite images. *Space Science and Technology*, 11(5-6), 51-55. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2005.05.051> (in Russian)
11. Voloshin, V. I., Levenko, A. S., & Peremetchik, N. N. (2004). Forecast of manifestations of dangerous geological processes in Dnipropetrovsk with the use of methods of aerospace remote sensing of the Earth. *Space Science and Technology*, 10(5-6), 194-196. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2004.05.194> (in Russian)
12. Gendler, S. G., & Yakovenko, A. A. (2013). Evaluation of radiation environment in underground construction of Saint Petersburg subway. *Journal of Mining Institute*, 206, 146-149. (in Russian)
13. Gusev, V. N., Longzhid, E. B. Prediction of the zone of influence from the tunneling of existing inclined contacts of rocks. *Natural and technical sciences*, 5(119), 90-94. (in Russian)
14. Evdokimov, D. M., & Solodovnikova, L. N. (2012). Detection of radon-hazardous zones according to aerogamma-spectrometry data. *Metrology-2012*, 584-591. (in Russian)
15. Ivanov, L. A., Ivanova, D. L., Savchenko, A. V., Tumanov, V. V., & Trifonov, A. S. (2013). Conditions of Employing Geophysical Methods to Estimate Present Activity of Faults. *Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine*, 13(II), 320-331. (in Russian)
16. Krymtsov, A., Afanasyev, O., & Svichkar, K. (1999). Jarusnistj reljefu mista Dnipropetrovsjka. *Geomorphology in Ukraine: new directions and tasks*, 134-136. (in Ukrainian)
17. Krymtsov, A. A., Afanasyev, O. E., & Shevchenko, B. E. (2001). Istoriko-geograficheskoe rayonirovanie kak odin iz aspektov urboekologicheskikh issledovaniy gorodskoy sredy g. Dnepropetrovska. *Grani*, 3(17), 22-29. (in Russian)
18. Krymtsov, A. A., & Zelenskaya, L. I. (1991). Rekonstruktsiya prirodnogo relefa Dnepropetrovska (ekologicheskii aspekt). *Physical geography and geomorphology*, 38, 154-160. (in Russian)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

19. Krimtsov, A. A. (2002). Suchasna tektonika, ekzoghenni procesy i deformacija sporud u misti Dnipropetrovsjku. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 1-4. (in Ukrainian)
20. Lebedev, M. O., & Romanevich, K. V. (2019). Engineering and geophysical research in reconstruction of underground structures. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 5, 97-110.
DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-05-0-97-110> (in Russian)
21. Maslak, V., Bezrodny, K., Lebedev, M., & Laptev, N. (2010). Geotechnical monitoring during shield driving of an inclined tunnel in St. Petersburg metro. *Izvestiya TulGU. Sciences of Earth*, 2, 152-159. (in Russian)
22. Orlyuk, M., Marchenko, A., & Yatsevskiy, P. (2018). The link of radon and magnetic anomalies on the territory of Ukrainian shield and Kyiv. *Geodynamics*, 1(24), 80-90.
DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.080> (in Ukrainian)
23. Sedin, V. L., Ulyanov, V. U., & Bicus, K. M. (2015). Scale assessment of active tectonic faults of the crust on the intensity of radon exhalation from the depths to the construction site and the existing energy facilities. *Georisk*, 4, 48-52. (in Russian)
24. Seminsky, K. Z., & Seminsky, A. K. (2016). Radon in groundwaters in the baikal region and transbaikalia: variations in space and time. *Geodynamics & Tectonophysics*, 7(3), 477-493.
DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0218> (in Russian)
25. Strilets, O., & Pchelkin, G. (2019). Substantiation of the seismically safe mass of the group of drill charges during explosive works on the construction of metro tunnels. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 58, 119-130. DOI: <http://doi.org/10.33271/crpnmu/58.119> (in Russian)
26. Udoratin, V. V., Ezimova, Yu. E., & Magomedova, A. S. (2017). Volumetric activity of radon within fault zones of Kirov-Kazhim and Pechora-Kolvin aulacogens. *Lithosphere*, 17(6), 136-152.
DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-136-152> (in Russian)
27. Ulyanov, V. Yu. (2015). Organizatsiya i metodika provedeniia monitoringa radona na ploshchadkakh AES vaseismichnykh regionakh. *Problems of subsoil use*, 1, 103-107. (in Russian)
28. Shatalov, N. N. (2019). Tectonic preconditions of the technological and natural catastrophe in the city of Dnepr. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 68-77.
DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.02.068> (in Russian)
29. Shvetsov, V., Merkin, V., Piskunov, A., Petropavlovskiy, O., & Lashkov, M. (2014). Emergency situations during construction underground facilities. Causes and liquidation of consequences. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 5(24), 1-18. (in Russian)
30. Shumakova, E. M. (2019). Geodynamics as one of the reasons for the increase in winter air temperature in the Volga river basin. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 55, 59-73.
DOI: <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-55-59-73> (in Russian)
31. Maestre, C. R., Yepes, Ch. S., & Echarri, V. I. (2018). The Radon Gas in Underground Constructions. Railway Tunnel of Alicante (Spain). *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.5), 393-395.
DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.5.20190> (in English)
32. Mao, H., Zhu, M., Wu, F., & Huang, H. (2019). Detection and Control of Radon and its Progenies in a Tunnel 2019 International Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2019) (Vol. 136, pp. 1-3).
DOI: <https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913604005> (in English)
33. Ghafari, M., Nahazanan, H., Md Yusoff, Z., & Nik Daud, N. N. (2020). A Novel Experimental Study on the Effects of Soil and Faults' Properties on Tunnels Induced by Normal and Reverse Faults. *Applied Sciences*, 10(11), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10113969> (in English)
34. Purnell, C. J., Frommer, G., Chan, K., & Auch, A. A. (2004). Development and management of a radon assessment strategy suitable for underground railway tunnelling projects. *Radiation Protection Dosimetry*, 108(4), 353-364. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch035> (in English)
35. Tan, B., Yang, G., Fu, S., & Xu, C. (2020). Study on radon concentration variation during subway construction. *Radiation Protection Dosimetry*, 191(4), 409-422. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa168> (in English)

Надійшла до редколегії : 02.06.2021

Прийнята до друку: 02.10.2021

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

О. Л. МАРЕНИЧ, О. О. КАРЗОВА

Збільшення коефіцієнта потужності електроприводів
маневрових залізничних лебідок..... 5

**Д. В. УСТИМЕНКО, АЛЬ САІД АХМАД
МОХАММАД АХМАД ДІАБ**

Удосконалення методу стендових випробувань ковзних
контактів електротранспорту 17

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

**Д. С. АСТАХОВ, Н. О. ЛИСЕНКО,
В. Б. МАЗУРЕНКО, А. І. ФЕДОРОВИЧ**

Аналіз сучасного антивірусного програмного
забезпечення в задачах кібербезпеки..... 27

О. В. ГОРБОВА, О. Д. МЕРЗЛИЙ

Дослідження автомобільних потоків засобами
імітаційного моделювання..... 36

О. В. ГОРБОВА, М. С. МУРКОВИЧ

Дослідження складних процесів на основі поетапного
моделювання..... 51

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**О. І. БАБАЧЕНКО, Т. В. БАЛАХАНОВА,
О. А. САФРОНОВА, Г. А. КОНОНЕНКО,
К. Г. ДЬОМІНА**

Вплив методів гарячого деформування на
пророблюваність металу за перерізом під час виробництва
осьових заготовок..... 60

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**М. А. БАРИБІН, А. П. ФАЛЕНДИШ, О. В. КЛЕЦЬКА,
Д. А. ІВАНЧЕНКО, О. В. КІРІЦЕВА**

Удосконалення тягових розрахунків та режимів ведення
тягового рухомого складу..... 71

**В. Г. РАВЛЮК, Н. Ю. ЛАМНАУЕР,
І. Ш. ОГЛИ ЕЛЯЗОВ, І. К. КИРИЧЕНКО,
Н. М. СКУБАК**

Оцінка ресурсу гальмових колодок вантажних вагонів в
умовах експлуатації 84

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

І. Ю. КЕБАЛ, О. Л. КРАСНОЩОК

Модернізація площадкового транспортера
вантажопідйомністю до 250 т..... 96

В. Ю. УЛЬЯНОВ

Застосування радонометрії для виявлення зон тектонічних
розломів під час проходження тунелів метрополітену
в м. Дніпро 103

CONTENTS

ELECTRIC TRANSPORT, POWER SYSTEMS AND COMPLEXES

O. L. MARENCH, O. O. KARZOVA

Power Factor Increase of Electric Drives of Railway Shunting
Winches 5

D.V. USTYMENKO,

AL SAID AHMAD MOHAMMAD AHMAD DIAB

Improving the Bench Testing Method of Sliding Contacts
of Electric Transport..... 17

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

D. S. ASTAKHOV, N. O. LYSENKO,

V. B. MAZURENKO, A. I. FEDOROVYCH

Analysis of Modern Anti-Virus Software in Cyber Security
Tasks 27

A. V. HORBOVA, O. D. MERZLYI

Research of Automobile Flows by Imitation Simulation..... 36

O. V. HORBOVA, N. S. MURKOVYCH

Research of Complex Processes Based on Step-By-Step
Modeling 51

MATERIAL SCIENCE

O. I. BABACHENKO, T. V. BALAKHANOVA,

O. A. SAFRONOVA, H. A. KONONENKO,

K. H. DOMINA

Impact of Hot Deformation Methods on Metal Workability
along the Section During the Production of Axle Billets..... 60

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

M. A. BARYBIN, A. P. FALENDYSH, O. V. KLETSKA,

D. A. IVANCHENKO, O. V. KIRITSEVA

Improvement of Traction Calculations and Driving Modes of
Traction Rolling Stock 71

V. G. RAVLYUK, N. Y. LAMNAUER,

İ. SH. oğlu ELYAZOV, I. K. KYRYCHENKO,

N. M. SKUBAK

Resource Estimation of Freight Car's Brake Pads in Operating
Conditions 84

TRANSPORT CONSTRUCTION

I. Y. KEBAL, O. L. KRASNOSHCHOK

Modernization of Platform Schnabel Car with a Carrying
Capacity of 220 Tons 96

V. Y. ULYANOV

Rationale for the Use of Radonometry to Identify the Areas of
Tectonic Faults During the Passage of Subway Tunnels in
Dnipro 103

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:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.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.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 5 (95) 2021

(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. 14,18. Тираж 100 пр. Зам. №02/05

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна
Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60
Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 5 (95) 2021

(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 14,18. Circulation 100. Order no. 02/05

Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan
Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine
Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

