



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

3(57)

•• 2015 ••

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 3 (57) 2015

Виходить 6 разів на рік ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Наука та прогрес транспорту
Автоматизовані системи управління на транспорті
Екологія на транспорті
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт
Залізнична колія
Матеріалознавство
Моделювання задач транспорту та економіки
Нетрадиційні види транспорту. Машини та механізми
Промисловий транспорт
Рухомий склад залізниць і тяга поїздів
Транспортне будівництво
Розвиток вищої школи

Дніпропетровськ

2015

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ
ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Пішінько О. М., доктор технічних наук
Мямлін С. В., доктор технічних наук
Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):

Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакуленко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилук В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобець В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейтутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Мухіна Н. А., Настечик М. П., Нетеса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Інститут залізничного транспорту, Варшава, Республіка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенергетики Лодзинської політехніки, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богемії, Чеська Республіка); Зіммер К. (Інститут Електротехніки Варшавської політехніки, Республіка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Республіка Казахстан); Лінгайтис В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Республіка Польща); Стржеелецькі Р. (Гданська морська академія, Республіка Польща); Тітова Т. С. (Петербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща); Шепонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зареєстровано в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat, наукометричних системах Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 15.06.2015, протокол № 10.

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

Адреса засновника вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпропетровськ, Україна, 49010
та редакції тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.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»;
- з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА)

ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)

Научный журнал

№ 3 (57) 2015

Выходит 6 раз в год ♦ ♦ ♦ ♦ Основан в августе 2003 г.

Наука и прогресс транспорта
Автоматизированные системы управления на транспорте
Экология на транспорте
Экономика и управление
Эксплуатация и ремонт средств транспорта
Электрический транспорт
Железнодорожный путь
Материаловедение
Моделирование задач транспорта и экономики
Нетрадиционные виды транспорта. Машины и механизмы
Промышленный транспорт
Подвижной состав железных дорог и тяга поездов
Транспортное строительство
Развитие высшей школы

Днепропетровск

2015

Учредитель:
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

*ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА*

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Мямлин С. В., доктор технических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук
по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):

Афанасов А. М., Банников Д. О., Бараш Ю. С., Беляев Н. Н., Бобырь Д. В., Бобровский В. И., Боднарь Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Власова Т. И., Волкова В. Е., Габринцев В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Гненний О. Н., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Доценко Е. Н., Дудкина В. В., Жуковицкий И. В., Заблудовский В. А., Казакевич М. И., Капица М. И., Копытко В. И., Костин Н. А., Кравец В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган Н. Б., Муха А. М., Мухина Н. А., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Оковитый С. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Скалосуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Штапенко Э. Ф., Эйтулис Г. Д., Яришкина Л. А.

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Анисимов П. С. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Бялонь А. (Институт железнодорожного транспорта, Варшава, Республика Польша); Вайчунас Г. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Васяк И. (Институт электроэнергетики Лодзинской политехники, Республика Польша); Гусев Б. В. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Долежел И. (Университет Западной Богемии, Чешская Республика); Зиммер К. (Институт Электротехники Варшавской политехники, Республика Польша); Куанышев Б. М. (Казахская академия транспорта и коммуникаций, Республика Казахстан); Лингайтис В. Л. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Манашкин Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковски А. (Силезская политехника, Республика Польша); Стржелецки Р. (Гданьская морская академия, Республика Польша); Титова Т. С. (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация); Худзикевиц А. (Варшавский политехнический университет, Республика Польша); Шепонг Адам (Варшавский политехнический университет, Республика Польша).

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.

Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).

Журнал зарегистрирован в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat, наукометрических системах Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI и др.

Печатается по решению ученого совета университета от 15.06.2015, протокол № 10.

Издатель

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна (г. Днепропетровск)
Свидетельство субъекта издательского дела ДК № 1315 от 31.03.2003 г.

Адрес
учредителя

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; сайт журнала: <http://stp.diit.edu.ua/>

Издание публикуется с 1936 г.:

- 1936–1993 гг. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 гг. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 гг. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»;
- с 2013 г. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Dnipropetrovsk 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
BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)

Scientific journal

No. 3 (57) 2015

Bi-Monthly ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Science and Transport Progress
Transport Automated Control Systems
Transport Ecology
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport
Railway Track
Material Science
Transport and Economic Tasks Modeling
Non-Traditional Transport Modes. Machines and Mechanisms
Industrial Transport
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction
High School Development

Dnipropetrovsk

2015

Founder:
 DNIPROPETROVSK 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
 Myamlin S. V., Doctor of Technical Sciences
 Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
 Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):

Afanasov A. M., Bannikov D. O., Barash Yu. S., Biliaiev M. M., Bobrovskiy V. I., Bobyr D. V., Bodnar B. J., Bosov A. A., Crivchick G. G., Dotsenko O. M., Dudkina V. V., Eitutis H. D., Gabrync V. A., Gavrilyuk V. I., Getman G. K., Glavatskiy K. Ts., Hnennyi O. M., Golovkova L. S., Goncharov K. V., Gorobets V. L., Kapitsa M. I., Kazakevich M. I., Kopytko V. I., Kostin M. O., Krasnyuk A. V., Kravets V. V., Kurgan M. B., Kuznetsov V. G., Mukha A. M., Mukhina N. A., Nastechik N. P., Netesa N. I., Ochkasov O. B., Okovytyy S. I., Petrenko V. D., Pichugov S. O., Pichurin V. V., Polishko T. V., Radchenko N. A., Radkevych A. V., Raksha S. V., Shtapenko E. P., Skalozub V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Vlasova T. I., Volkova V. Ye., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovytsky I. V.

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Bialon A. (Railway Institute, Warszawa, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Dolezel I. (The University of West Bohemia, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kuanyshov B. M. (Kazakh Academy of Transport and Communications, Republic of Kazakhstan); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», USA); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime Academy, Republic of Poland); Szelag Adam (Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Titova T. S. (Petersburg State Transport University, Russian Federation); Vaiciunas G. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Wasiak I. (Institute of Electrical Power Engineering, Republic of Poland); Zymmer K. (Electrotechnical Institute, Republic of Poland)

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 the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 r. no. 1528 (technical sciences).
 Journal is registered in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat, research and metric systems Google Scholar, Polish Scholarly Bibliography, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.
 Published according to the Academic Council decision of the University, Protocol no. 10 from 15.06.2015.

Publisher Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipropetrovsk)
 Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003

Address of Founder St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;
 e-mail: lib@b.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»;
 since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 625.151-047.36

С. Ю. БУРЯК^{1*}, В. І. ГАВРИЛЮК², О. О. ГОЛОЛОБОВА³

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта bsyur@mail.ru, ORCID 0000-0002-8251-785X

²Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта gvi_dp@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

³Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта golobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ

Мета. В дослідженні необхідно: 1) з'ясувати причини появи несправностей стрілочних переводів для того, щоб визначити діагностичні ознаки відмов; 2) розглянути вимоги, устрій, призначення складових частин стрілочних переводів, роботу та технологію їх обслуговування для побудови системи з ведення господарської діяльності, пов'язаної із утриманням стрілочних переводів; 3) обґрунтувати можливість, необхідність та перспективи впровадження системи автоматизованого діагностування стрілочних переводів; 4) розробити дослідний зразок автоматизованого апаратно-програмного комплексу для контролю параметрів стрілочних переводів та виконання їх діагностування. **Методика.** Авторами було наведено можливі несправності стрілочного переводу і розглянуто їх прояви та вплив на роботу. За існуючою технологією виконання робіт проведено аналіз процесу технічного обслуговування стрілочних переводів, визначено основні операції, які виконувались при обстеженні зовнішнього вигляду, перевірці параметрів та ремонті чи заміні деталей та вузлів. На підставі проведеного аналізу причин виникнення несправностей стрілочних переводів та способів їх усунення систематизовано види пошкоджень та способи боротьби з ними, створено інформаційну схему пошуку несправностей, визначено можливості й межі автоматизації процесу діагностування та зроблено порівняння з існуючою методикою виконання робіт із утримання стрілочних переводів. Створено структурну схему системи діагностування, розроблено алгоритм її роботи та закладено основні опорні принципи функціонування. Дослідниками застосовано програмно-апаратний комплекс для визначення стану стрілочних переводів із урахуванням виконання діагностування стрілок, що знаходяться в експлуатації. **Результати.** Завдяки отриманим результатам створено метод автоматизованого діагностування стану стрілочних переводів із електроприводами змінного струму, управління якими здійснюється централізовано. Отримано результати роботи автоматизованого апаратно-програмного комплексу для контролю параметрів стрілочних переводів та виконання їх діагностування. **Наукова новизна.** У ході експерименту авторами розроблено метод визначення стану стрілочного переводу за кривою струму та його спектральним складом у колі стрілочного електродвигуна. Розроблено також апаратно-програмний комплекс діагностування централізованих стрілок. **Практична значимість.** Завдяки отриманим результатам підвищується безпека

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

виконання робіт через зменшення часу перебування працівників у зоні руху потягів та усувається людський фактор під час виконання вимірювань. Приховання та замовчування фактів порушень у роботі стрілочних переводів стає неможливим.

Ключові слова: електропривід; стрілочний перевід; аналіз сигналу; діагностування; часова залежність; спектральний склад; контроль стану; алгоритм роботи; крива струму

Вступ

Залізнична колія з точки зору охорони праці є небезпечною для життя і здоров'я людини діяльною територією, час перебування на якій пов'язано з небезпекою наїзду рухомого складу. Тому, чим менше час перебування співробітників залізничного транспорту в зоні руху поїздів, тим менше ймовірність виникнення нещасного випадку. У зв'язку з цим впровадження системи автоматизованого діагностування має на меті створення умов для роботи працівників, за яких зменшиться час їх перебування в межах руху потягів.

За діючою методикою планово-попереджувальних заходів з усунення та випередження появи несправностей передбачено періодичне обстеження, яке виконується за заздалегідь складеним графіком. До процесу технічного обслуговування входить контроль основних параметрів апаратури та її регулювання в умовах експлуатації або в ремонтно-технологічній дільниці дистанції сигналізації та зв'язку. До недоліків існуючої технології обслуговування стрілочних переводів можна віднести, в першу чергу, значні затрати часу, виконання операцій вручну та великий вплив людського фактора. При цьому відсутність безперервного контролю унеможливорює своєчасне виявлення несправностей. Негативним фактором під час перевірки стану стрілочних переводів є недостатня кількість параметрів, які перевіряються, та візуальне сприйняття працівником показань під час вимірювання робочого струму і струму роботи стрілки на фрикцію.

Удосконалення технології обслуговування стрілочних переводів можливе шляхом автоматизації діагностування їх технічного стану, яке має забезпечити безперервну перевірку і аналіз технічного стану стрілочних переводів, а у разі виявлення несправності – визначати її автоматично і відразу сповіщати про це працівників.

Таким чином, удосконалення технології обслуговування стрілочних переводів шляхом автоматизації діагностування їх стану дозво-

лить підвищити рівень ефективності технічного обслуговування централізованих стрілок.

Мета

Визначити основні несправності та недоліки в роботі елементів стрілки, а також їх вплив на стан стрілочних переводів.

Систематизувати вимоги, устрій, роботу, технологію обслуговування стрілочних переводів та призначення його складових частин, щоб виділити .

З'ясувати основні характеристичні ознаки стану стрілочних переводів та сформулювати принципи, за якими буде виконуватись діагностування.

Розробити інформаційну схему пошуку несправностей стрілочного переводу з п'ятипровідною схемою керування.

Для того щоб здійснювати діагностування поточного стану стрілочних переводів, необхідно постійно виконувати вимірювання і аналіз отриманих результатів, тому необхідно розробити методи та засоби безперервного автоматизованого контролю та діагностування стрілочних переводів та методи автоматичної обробки результатів вимірів параметрів стрілочного переводу, що контролюються.

Розробити дослідний зразок автоматизованого апаратно-програмного комплексу для контролю параметрів стрілочних переводів та виконання діагностування за ними.

Виконати вимірювання із застосуванням розробленого автоматизованого діагностичного комплексу.

Методика

Для того щоб мати уявлення про ознаки несправностей стрілочних електроприводів, розглянемо причини відмов у їх роботі. Найбільш характерними причинами відмов у роботі електропривода є: пошкодження редуктора; порушення роботи фрикційного зчеплення; заклинювання шибера з робочою шестернею; розрегулювання контрольних тяг; підгар або пору-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

шення регулювання контактів автоперемикача; індивіювання або обмерзання контактів автоперемикача; злам контактів автоперемикача; злам шліфта і випадання валика; інші відмови.

Злам контактних колодок і/або порушення контакту автоперемикача відбувається через неправильне регулювання врубання ножів, які розбивають колодки. Неправильне регулювання пружин контактних колодок стає наслідком недотримання відстаней між контактними пружинами колодок і недостатньої глибини врубання ножів.

Неправильне регулювання, що призводить до відмов електроприводів, є наслідком неякісного виконання графіка технологічного процесу обслуговуючим персоналом.

Найбільша кількість відмов припадає на втрату контакту в автоперемикачі взимку і пов'язана з індивіюванням контактів. Для запобігання таких випадків передбачені різні захисні заходи (графітове мастило, змащення гліцерином, обігрів, спеціальні насічки на ножах, закриття оргсклом та ін.).

Якщо контактне натискання автоперемикача більше норми при розмиканні контактів, то це викличе дугоутворення при розриві робочих контактів і їх підгар. Якщо ж контактне натискання менше норми, то можливе порушення електричного кола.

Злам колодочки автоперемикача відбувається зазвичай через неправильне регулювання врубання ножів. Замкнуті кінці контактних пружин повинні знаходитися на одній прямій без перегинів. Злам може відбутися також зважаючи на часте регулювання контактної губки.

Причинами недостатнього врубання ножів автоперемикача можуть бути такі несправності: палець повзуна, на який спирається замикальний важіль, знаходиться нижче поверхні барабана через ослаблення кріплення болтів або порушень його розмірів; кулачок автоперемикача впирається в контрольну лінійку внаслідок неправильного її регулювання, що можна виявити шляхом натиснення на контрольну тягу, що викличе переміщення ножів автоперемикача контрольною лінійкою, що перешко-

джає западанню кулачка.

Кожен вид несправності має власні особливі ознаки, за якими й можна їх визначати. Для прикладу наведемо можливі причини, які можуть призвести до збільшення часу переводу стрілки і які можуть бути визначені як несправності: люфт муфти з'єднання двигуна з редуктором; нещільне притиснення зубців в роботі редуктора та шибера (зношення зубів щеплення шестерні); понаднормовий люфт вузла Гука; люфт в шарнірних з'єднаннях 1-ї зв'язної тяги з робочою тягою та понаднормовий люфт в з'єднаннях 1-ї зв'язної тяги з сергами; довге дотиснення гостряка до рамної рейки (викривлення гостряка); понаднормова кількість прокладок між сергою та гостряком 1-ї зв'язної тяги, що зумовлено встановленням нетипових прокладок без роз'єднання гостряків, що може призвести до втрати контролю та не прилягання гостряка при підвищенні температури.

Централізована стрілка включає в себе власне стрілочний перевід, електропривод і схему управління ним. Несправності стрілочного переводу зазвичай пов'язані з його неякісним обслуговуванням працівниками колії (табл. 1). В першу чергу сюди відноситься брудний стан стрілки, несвоєчасне очищення її від снігу, провисання гостряків стрілки, наявність нахату на рамних рейках, невідповідність розмірів нормам утримання і т.д. Поряд з перерахованими відмовами в роботі електропривода зустрічаються й інші несправності (табл. 2).

Нормальним переводом стрілки у справному стані вважається такий, при якому обертання вхідного вала редуктора рукояткою ручного переводу не має поштовхів і заїдань шестерень і коліс. У зібраному електроприводі при пересуванні шибера з одного крайнього положення в інше пружини автоперемикача повинні забезпечувати одночасне розмикання ножів з пружинами контактних колодок.

Розглянемо вимоги, устрій, роботу, технологію обслуговування стрілочного переводу та призначення його складових частин.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Таблиця 1

Table 1

Найбільш характерні відмови на стрілочному переводі, усунення яких покладено на працівників колії**The most typical turnout's failure, the removal of which is assigned to track workers**

Ознака відмови	Найбільш вірогідна причина відмови
При перевірці стрілки на щільність притиснення гостряків стрілка замикається при шаблоні товщиною 4 мм	1. Розширення колії у гостряків стрілки 2. Викантовка гостряків через ослаблення кореневого кріплення 3. Відбій рамної рейки внаслідок слабкого його кріплення 4. Викривлення гостряка 5. Неправильне регулювання тяг
При переводі стрілки зазор між гостряком і рамною рейкою менше 4 мм, але стрілка переводу не закінчує	1. Звуження колії у гостряків стрілки 2. Накат на гостряку або рамній рейці 3. Регулювання приводу без допуску, в результаті чого при зміні температури відбувається недохід стрілки при нормальному зазорі
При переводі стрілки зазор між гостряком і рамною рейкою більше допустимого, але стрілка переказу не закінчує (працює на фрикцію)	1. Напресування снігу або бруду між гостряком і рамною рейкою або в кореновому кріпленні 2. Викривлення гостряка 3. Надмірно затягнуті кореневі болти 4. Упорні болти упираються в гостряк 5. Забруднені і не змащені башмаки стрілки. Гостряки лежать на малій кількості башмаків
При переводі стрілка не рушає з місця, електродвигун працює на фрикцію, ток фрикції в нормі або ж стрілка переводиться важко, електродвигун споживає підвищений струм	1. Притиснутий гостряк затиснутий накатом рамної рейки 2. Стрілка сильно забруднена 3. Угон гостряка 4. Сильно затягнуті кореневі болти 5. Розгорнулися упорні болти

Таблиця 2

Table 2

Характерні несправності в роботі електропривода**Typical electric drive malfunction**

Несправність	Імовірна причина	Спосіб усунення
Нестабільна робота фрикції	Перекіс тертьових поверхонь один відносно одного дисків й відсутність мастильного матеріалу на поверхнях фрикційних дисків	Усунути перекіс і змазати фрикційні диски

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Закінчення табл. 2

End of Table 2

Несправність	Імовірна причина	Спосіб усунення
Стрілка не переводиться, струм менше номінального струму переводу	Ослабнуло фрикційне зчеплення Відсутність мастильного матеріалу на запірних зубах шибєрної шестірні й шибєру й відсутність зазору між гостряком і рамною рейкою, що дає можливість забезпечити замикаання стрілки при закладці шаблона товщиною 2 мм. Завищена напруга на електродвигуні	Відрегулювати фрикційне зчеплення до номінального струму Шестірня (шестірні) головного вала повинна бути густо змазана мастилом; забезпечити замикаання стрілки при закладці між гостряком і рамною рейкою шаблона товщиною 2 мм. Відрегулювати напругу на електродвигуні
При переводі стрілки відбувається вихід ножів з контактних губок (пружин) із втратою контролю	Сильно затягнуте фрикційне зчеплення й завищена напруга на електродвигуні	Відрегулювати фрикційне зчеплення до номінального струму роботи на фрикцію, але не більше 20–25 % номінального струму переводу
На робочих контактах автоперемикачів відбувається дугоутворення з підгорянням контактів	Наприкінці переводу стрілки відбувається повільне перекидання ножів. Наявність втоми в пружинах кручення автоперемикачів, контактне натискання між губками й ножами вище норми Несиметричне урубвання ножів автоперемикача між контактними пружинами	Замінити пружини кручення, відрегулювати контактне натискання Контактні колодки встановити симетрично відносно врублених у них ножів
Злам текстолітових колодок автоперемикача	Контактне натискання між контактними пружинами (губками) і ножами менше 4–5 Н та врубвання ножів відбувається з великою силою	Відрегулювати контактне натискання підгинанням ресорних пружин
Втрата контролю положення стрілки при проходженні по ній поїзда	Контрольні тяги не відрегульовані по Т-подібній пластині на зазор 1–3 мм між зубом ножового важеля й робочою бічною поверхнею вирізу в контрольній лінійці	Відрегулювати зазор у межах 1–3 мм між зубом ножового важеля й робочою бічною поверхнею вирізу в контрольній лінійці
На затискачі електродвигуна робоча напруга надходить, але якір не обертається	Обрив обмотки якоря або обмотки збудження	Перевірити омметром справність обмотки якоря й обмотки збудження

Врубвання ножів в контактні пружини має бути на глибину не менше 9 мм. При врубванні ножів ресорні пружини контактних колодок повинні віджиматися в межах 0,5–1,4 мм. Віджим пружин повинен бути рівномірним. При взрізі стрілки або зближенні гостряка (внаслідок

деформації тяг від ударів і т.п.) важелі з колодками контактних ножів в електроприводі, спираючись на верхню площину контрольних лінійок, повинні зайняти середнє положення і розімкнути контакти. При цьому зазор з кожного боку між ножами та контактними

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

пружинами повинен бути не менше 2,5 мм.

При повороті заслінки вниз контактні ножі блок-контактів повинні повністю розімкнути блокувальні контакти. При повороті заслінки вгору після натискання на блокувальну собачку контактні ножі повинні врубуватися в блокувальні контакти. Відтиснення контактних пружин при цьому має бути рівномірним.

Відстань між відкритими струмоведами частинами і будь-якою неізолюваною деталлю електропривода не повинна бути менше 6 мм. Електропривод має ущільнення по контуру кришки, в місцях виходу шибер, контрольних лінійок і отворів, що перекриваються заслінкою (під ключ і курбель). Кришка електропривода замикається замком, який при впливі поперечних зусиль не більше 300 Н і вертикальних не більше 400 Н не повинен відпиратися.

Електропривод повинен забезпечувати втрату контролю положення стрілки: при роз'єднанні однієї з контрольних тяг з гостряком і наступному переводі стрілки, а також повернення стрілки у вихідне положення; при витягуванні контрольної лінійки ближнього гостряка з корпусу електропривода на величину 10-210 мм; при вигині контрольної тяги дальнього гостряка і витягуванні при цьому лінійки дальнього гостряка з корпусу електропривода на 25-110 мм незалежно від положення лінійки ближнього гостряка і на величину 25-210 мм, якщо при цьому одночасно витягується лінійка ближнього гостряка з корпусу електропривода на величину 10-210 мм. При переводі в останньому випадку стрілки в інше крайнє положення (шибер висунутий) контроль положення стрілки повинен бути відсутнім, якщо сумарне витягування лінійки дальнього гостряка з корпусу становить 185–360 мм.

Електропривод в положенні «шибер висунутий» повинен забезпечувати втрату контролю положення стрілки при частковому втягуванні (вштовхуванні) лінійки дальнього гостряка в корпус на величину 10 мм і більше – до упору вушка лінійки в направляючу плиту електропривода.

Електропривод повинен забезпечувати втрату контролю положення стрілки при зближенні гостряків (внаслідок деформації тяг від ударів і т.д.). Величина переміщення контрольної лінійки від моменту упору її в задню поверхню

зуба контрольного важеля до розмикання контактів повинна бути не більше 14 мм.

Електропривод СП повинен забезпечувати цілодобову роботу і бути ремонтпридатним при експлуатації до граничного стану, тобто до напруження назначеного ресурсу.

Електричний опір ізоляції між струмоведами частинами, з'єднаними між собою і корпусом електропривода, не повинне бути менше 100 МОм в нормальних кліматичних умовах і 0,5 МОм – при температурі +30 °С і відносній вологості повітря 98 %. Електрична міцність ізоляції електропривода в нормальних кліматичних умовах повинна витримувати протягом (60±5) с дію випробувальної напруги змінного струму частотою 50 Гц від джерела потужністю не менше 0,5 кВА, прикладеного між клемми електродвигуна, контактними колодками, з'єднаними між собою, і корпусом електропривода без пробою і явищ поверхневого перекриття 1 500 В.

З метою забезпечення надійної роботи систем регулювання рухом поїздів, передбачено виконання періодичного контролю параметрів апаратури залізничної автоматики безпосередньо під час її експлуатації [106]. Технологія обслуговування централізованих стрілок включає в себе зовнішню перевірку стану приводів і стрілочних гарнітур централізованих стрілок, яку виконують два рази на тиждень на стрілках, що беруть участь в маршрутах приймання та відправлення, і не рідше одного разу на тиждень на інших стрілках [14, 15, 16].

При цьому перевіряють: щільність притиснення гостряка до рамної рейки без переведення стрілки; надійність і правильність кріплення приводу, гарнітур, контрольних і робочих тяг; відсутність видимих тріщин і вм'ятин на корпусі приводу, фундаментних і кріпильних косинцях, поздовжній зв'язковій смузі, робочих і контрольних тягах; шплінтах і закрутках в болтах і валиках; відсутність перешкоди в шпальному ящику для руху тяг. Особливу увагу звертають на наявність і справність стопорних планок. При огляді необхідно звертати увагу на недоліки стрілочного переводу, які можуть порушити нормальну роботу електропривода.

Щільність притиснення гостряка до рамної рейки, стрілок при закладці шаблону товщиною 4 мм і замикання стрілок при закладці шаблону 2 мм перевіряють один раз на тиждень на стрі-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

лках, що входять у маршрути приймання і відправлення, і один раз в два тижні на інших стрілках. При закладці шаблону товщиною 4 мм між гостриком і рамною рейкою стрілка не повинна замикатися і давати контроль закінчення переводу, тобто електропривод повинен продовжувати працювати на фрикцію; при закладці шаблону товщиною 2 мм стрілка повинна переводитися і давати контроль закінчення переводу, при цьому шибєр не повинен заклинюватися.

Під час внутрішньої перевірки електропривода з переведенням стрілки, виконуваної один раз в чотири тижні, перевіряють: стан і кріплення внутрішніх частин приводу; стан монтажу і його кріплення; правильність регулювання контрольних тяг; рівень масла в редукторі електропривода СП; ущільнення приводу; роботу блокувальної заслінки і дію замка; стан контактів і врубвання ножів автоперемикача; взаємодія частин електропривода і роботу автоперемикача.

Під час внутрішньої перевірки стрілочної коробки і муфти УПМ, виконуваної один раз в три місяці, перевіряють: монтаж; стан і дію контакту місцевого управління, корпусу шланга; ущільнення.

Перевіряючи струми, споживані електродвигуном при нормальному переводі стрілки і роботі електродвигуна на фрикцію, визначають значення струмів, що нормуються залежно від хрестовини стрілочного переводу, рейок, електропривода, електродвигуна і робочої напруги на електродвигуні. Регулювання фрикційного зчеплення електроприводів СП виконують із застосуванням спеціального пристрою, що містить динамометр ДОСМ-3-1, максимальне вимірюване зусилля якого дорівнює 9800 Н. Цей пристрій дозволяє встановлювати і утримувати динамометр між рамною рейкою і гостриком стрілки. Для вимірювання зусилля переведення стрілки необхідно фрикційне зчеплення відпустити до стану, при якому забезпечується вільний проворот фрикційного пристрою двигуном електропривода без переведення стрілки. Потім фрикційне зчеплення потрібно затиснути до стану, при якому стрілка починає переводитися, і виміряти динамометром встановлене зусилля, яке і буде зусиллям переведення стрілки. Зусилля замикавання стріл-

ки може бути більшим порівняно із зусиллям переводу. У цьому випадку фрикційне зчеплення необхідно затягнути до стану, при якому замикається стрілка, і виміряти зусилля замикавання. При регулюванні фрикційне зчеплення затягують з необхідним зусиллям, встановленим для цього типу стрілочного переводу, яке вимірюють динамометром [17, 55].

Недоліком існуючої технології обслуговування пристроїв є значні затрати ручної праці та часу, неможливість своєчасного попередження відмов стрілки. Крім цього виявлення тієї чи іншої відмови обслуговуючий персонал фіксує візуально, що не дає необхідної точності та достовірності. Це зумовлює необхідність розробки систем автоматичного діагностування та контролю пристроїв залізничної автоматики. Навіть в системах нового покоління диспетчерської централізації рішення про відмови приймається оператором [107, 108, 109].

Як видно з наведеної вище технології обслуговування і налаштування стрілочних приводів і комунікацій, які до них відносяться, процес перевірки їх стану і тривалість усунення пошкоджень, включаючи профілактичний огляд, займає багато часу і ґрунтується більшою мірою на навичках працівників служби сигналізації та зв'язку у виконанні різних операцій з метою забезпечення справного, або працездатного стану системи. Під час технічного обслуговування та виконанні ремонтних або відновлювальних робіт співробітник опирається на власні знання, сприйняття і розуміння взаємних залежностей і процесів, що відбуваються. У кожному конкретному випадку визначення несправності того або іншого вузла стрілочного переводу або всієї системи в цілому службовцю доводиться витрачати багато часу на пошук причини відмови, який, як правило, займає половину часу, а іноді й більшу його частину, потрібного на усунення пошкодження [56, 57]. У зв'язку з цим існує гостра необхідність оновлення пристроїв забезпечення руху поїздів, оскільки існуючі системи морально і технічно застаріли, а методика планово-попереджувального ремонту зжила себе, як один з основних видів ведення господарської діяльності, що відноситься до періоду початку розвитку і впровадження технічних засобів вирішення промислових завдань. До того ж по-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

трібно виконувати не тільки перехід на принципово нові технології та системи, але й усунення підходів, закладених в методах планово-попереджувально-го ремонту.

З підвищенням швидкостей руху поїздів у обслуговуючого персоналу залишається значно менше часу на усунення пошкоджень. У зв'язку з тим, що цей час можна розділити на проміжок часу від моменту появи несправності до моменту інформування про нього відповідного співробітника, час прибуття, пошук пошкодження і власне його усунення, то, зменшивши хоч одну з складових, є можливість скоротити загальну його тривалість. Оскільки вплинути на час необхідний для прибуття співробітника на місце пошкодження складно, а повна заміна обладнання потребує значних капіталовкладень, що не завжди відповідає можливостям і є раціональним підходом, то залишається можливість виграти час на етапі встановлення факту появи пошкодження і скоротити час пошуку пошкодження, яке стало причиною відмови. Зробити це можна за допомогою автоматизації системи контролю та діагностування стрілочних переводів. Автоматизована система контролю та діагностування крім того, що дозволить в режимі реального часу збирати дані про стан об'єктів, які знаходяться на віддаленні від поста електричної централізації, і у разі зміни значень відповідних показників видавати повідомлення про відмовний або передвідмовний стан, запобігаючи тим самим затримки поїздів з вини ушкоджень стрілочного переводу, але також і зможе забезпечити усунення часового проміжку від появи несправності до надходження про неї інформації до компетентних співробітників. А закладені в цю систему основні типи відмов і причини їх появи дадуть можливість здійснення ідентифікації. При появі пошкодження така система не тільки зможе його визначити, але й видати рекомендації щодо способу його усунення, інструменту, деталям і вимірювальним приладам, які потрібно взяти з собою, висуваячись на об'єкт з пошкодженням, а також автоматично виконувати запис в електронному журналі про виконання робіт [36].

Автоматизація методу дистанційної діагностики стрілочного переводу зводиться до визначення ознак його справного і несправного ста-

нів для подальшого порівняння в процесі експлуатації даних, одержуваних з працюючих стрілок і показників еталонних сигналів, узятих як зразок і записаних зі справної стрілки. При цьому виконується порівняння значень за кількома показниками струмової кривої робочого кола, обраного як зразок електродвигуна і досліджуваного. Серед таких показників особливе значення мають амплітуда і тривалість переводу, за якими можна встановити наявність перешкод руху гостряків внаслідок потрапляння сторонніх предметів між гостряком і рамною рейкою або підвищений опір руху через забруднення стрілки, ускладнень в механічній передачі зусилля переведення стрілки, а також люфтів в місцях з'єднання і неправильного регулювання вузлів в місцях кріплення. На часових діаграмах можна також чітко виділити такі основні моменти, як: пусковий струм електродвигуна – струм, який протікає в колі електродвигуна на початку руху; момент надання контролю автоперемикачем (іскріння ножів автоперемикача); залишкове обертове магнітне поле на статорі двигуна – за якими також можна виконувати дослідження стану стрілочного переводу.

Незважаючи на відмінності, кожен стрілочний електропривод має одні й ті ж функціональні вузли, серед яких: джерело механічної енергії – електродвигун; підсилювач крутного моменту електродвигуна і перетворювач його обертального руху в поступальний рух перекладних тяг – редуктор; фрикційне зчеплення (фрикціон) – гальмо, яке забезпечує захист електродвигуна від перевантажень і гальмування обертових частин привода в кінці переведення стрілки; блок контролю положення стрілки і підготовки ланцюга реверсування приводу і включення приводу спареної стрілки – автоперемикач. Тому встановлені діагностичні ознаки для одного типу стрілочного переводу, на якому встановлений конкретний тип стрілочного електропривода, будуть справедливими і для інших випадків [100, 101, 102, 103].

Для реалізації методу технічної діагностики стрілочних обирається стрілочний перевід конкретного типу, технічний стан якого відповідає вимогам щодо утримання напільних пристроїв даного типу відповідно до інструкцій з експлуатації. При цьому встановлений на ньому

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

електропривод також не повинен мати будь-яких відхилень від норм всіх технічних показників, що визначаються проектною документацією та інструкціями з утримання. Крім цього ні стрілочний перевід, ні стрілочний електропривод не повинні містити нетипових елементів, пристроїв і пристосувань. Башмаки повинні бути змащені, а основа гостряків щільно прилягати до них по всій довжині, в редукторі залито масло до необхідного рівня, корінь гостряків не повинен мати щільного затиснення, а сам електропривод належним чином розміщений і закріплений на стрілочному переводі, допустима товщина прокладок між сережкою зв'язкової тяги і гостряком стрілочного переводу не перевищувати 7 мм, і містити не більше 3 прокладок, з яких одна ізоляційна, товщиною 4 мм і дві металеві, загальною товщиною не більше 3 мм. Для високої достовірності виконаних вимірювань стан всіх частин, вузлів і устаткування стрілочного переводу повинні в точності відповідати всім вимогам інструкцій, а також правилам виконання всіх умов технічної експлуатації.

Розглянемо можливості діагностування стрілочних переводів. Автоматизація діагностування стрілочного переводу є актуальною задачею [112]. Під час експлуатації для контролю параметрів стрілок використовується вимірювання струму стрілочного електропривода при переведенні стрілки. За результатами вимірювань можна здійснювати контроль визначених нормативною документацією параметрів, таких як робочий струм переводу і час переведення стрілки, а також додаткові параметри, що дозволять провести діагностування стрілочного приводу та прогнозувати його подальший стан.

Для діагностування стану стрілочного переводу використовують часові та частотні залежності струму переводу стрілки. Часова залежність струму переводу стрілки має складну форму, на яку впливає значна кількість як заздалегідь відомих факторів, таких як тип стрілочного переводу та тип електродвигуна, так і випадкових факторів, викликаних погодними умовами, забрудненнями і т.д., а також через можливі дефекти стрілочного переводу.

Визначення характеристичних точок на кривій струму переводу стрілки, параметри яких можна прийняти за діагностичні ознаки, є важливою задачею, вирішення якої дозволить в подальшому автоматизувати процес діагно-

стування стрілочних переводів [110].

Разом з несправностями стрілочного переводу в експлуатації можуть мати місце і відмови в схемі керування стрілкою [82, 85]. На відміну від несправностей самого електропривода і переводу відмови електричної схеми потребують для свого відшукування попереднього аналізу схеми. Такий аналіз зручно виконувати, використовуючи інформаційну схему пошуку несправностей (рис. 1).

За даною схемою і має функціонувати система діагностування стрілочних переводів, що розроблюється. В цьому випадку вона може використовуватись і як порадник для електромеханіка, і як фіксуюча і аналізуюча автоматизована система. Це дозволить сповіщати відповідального співробітника про дійсний поточний стан та своєчасно інформувати його про раптово виникаючі відмови та їх поступове утворення.

При використанні алгоритму роботи наведеної інформаційної схеми, деякі несправності система може знаходити та визначати сама. При виникненні раптової відмови електромеханік не завжди може зорієнтуватися в причинах виходу з ладу стрілки і правильно провести пошук та усунення несправності, що в свою чергу призводить до збільшення тривалості пошуку несправності. Скориставшись порадами системи діагностування, електромеханік зможе набагато швидше відновлювати працездатність системи.

Таким чином, система діагностування стрілочних переводів при використанні її як порадника для електромеханіка та автоматизованого електронного журналу є досить актуальним питанням, оскільки зараз струм переведення стрілки та струм фрикції при переведенні в обидва боки записуються електромеханіком в Журнал технічної перевірки пристроїв сигналізації, централізації та блокування форми ШУ-64 вручну. Впровадження такої системи дозволить вести електронну документацію, куди в автоматичному режимі будуть записуватися дані про всі стрілки конкретного поста електричної централізації. Це дозволить об'єктивно відстежувати дані про роботу стрілочних переводів шляхом централізованого збору, обробки та аналізу інформації з коректними даними про пошкодження, оскільки унеможливить їх приховання співробітниками.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

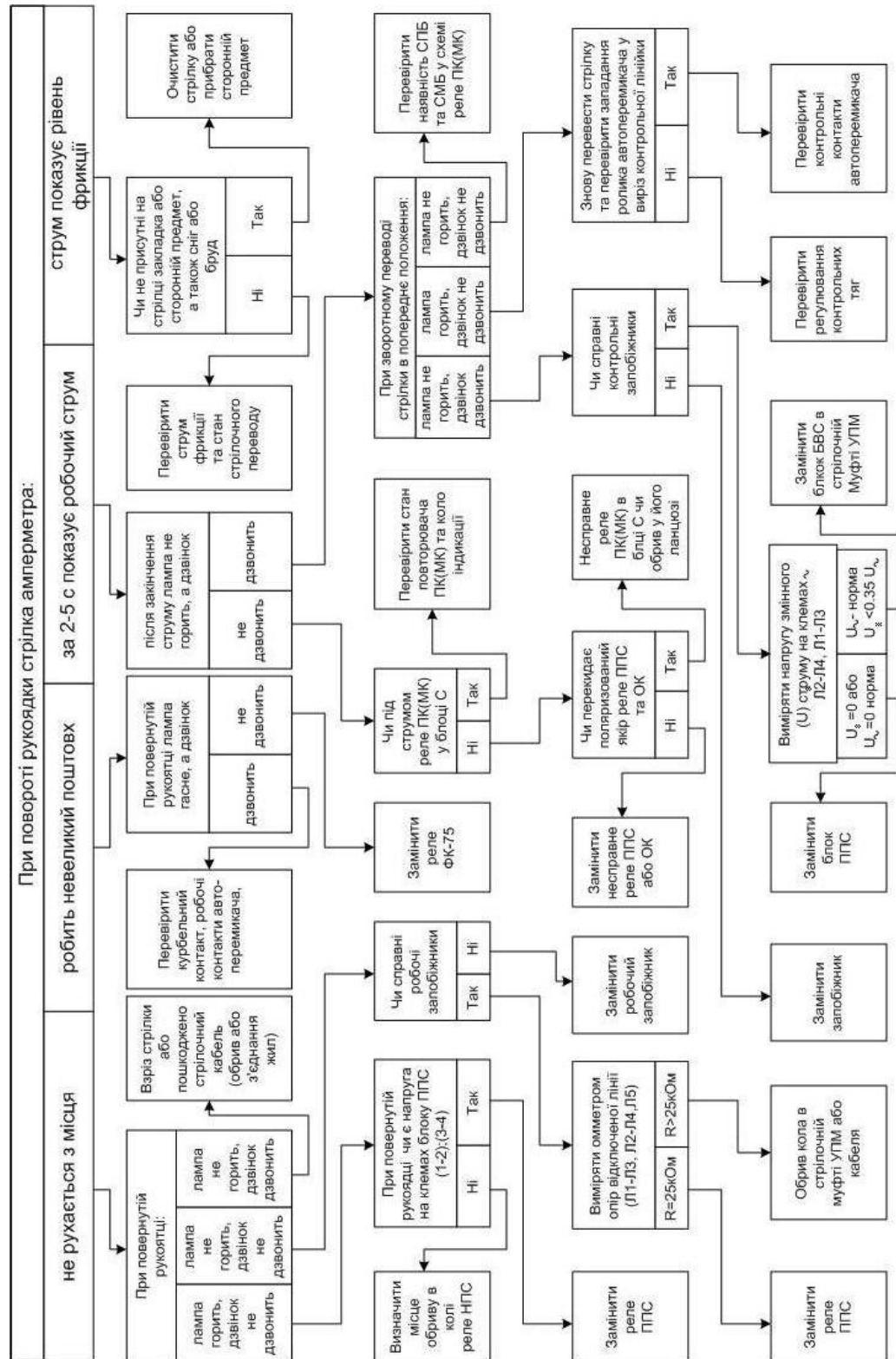


Рис. 1. Інформаційна схема пошуку несправностей в стрілочному переводі з п'ятипроводною схемою керування

Fig. 1. Information scheme of the turnouts fault, fivewire scheme of control

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Система дистанційного діагностування і контролю параметрів стрілочних переводів здатна виконувати вимірювання значень струмів в робочих колах електроприводів за допомогою лише одного під'єднання до вимірювального шунта ТТ в панелі живлення стрілочних приводів (рис. 2).

В ручному режимі керування стрілками на малих станціях перевід стрілки починається з повороту стрілочного комутатора, який під'єднується до системи автоматизованої діагностики стрілочного переводу, що і є керуючим сигналом початку запису кривої струму переведення стрілки. При застосуванні системи в електричній централізації великих станцій, керування на яких відбувається за допомогою системи блочної маршрутно-релейної централізації або іншої системи, яка працює за принципом задавання маршруту за допомогою натиснення двох кнопок, принцип функціонування системи діагностування та контролю стрілочних переводів відрізняється.

При маршрутному наборі, на відміну від ручного, стрілки по встановленому маршруту переводяться автоматично за допомогою керуючих реле плюсового та мінусового положення, і відповідно стрілочні комутатори не використовуються. Для початку запису необхідно зафіксувати натискання поїзних та маневрових кнопок черговим по станції. Після реєстрації натискання кнопок початку та кінця маршруту, ця інформація через блок узгодження та реєстрації потрапляє в обчислювальну машину, де за натиснутими кнопками на підставі таблиці істинності визначають, які саме

стрілки зараз будуть переводитися, в якій послідовності і до яких з них віднести і зберегти виконаний аналіз.

Комутатор підключений до блоку узгодження рівнів сигналів, з виходу якого сигнал подається до блоку реєстрації початку переведення стрілок. За індивідуального переведення кожної окремої стрілки при встановленні маршруту та при перевірці стрілок на щільність прилягання перевід стрілки фіксуватиметься по алгоритму, який використовується для електричної централізації малих станцій.

При переведенні декількох стрілок одночасно фіксується значення загального струму на вимірювальному шунті. Залежно від того, як налаштована на станції система живлення стрілочних електроприводів, запис буде містити або окремі криві струму переведення стрілок при почерговому маршрутному переведенні, або сумарний сигнал, отриманий при одночасному живленні відразу декількох стрілок, що має місце на великих станціях. При цьому за часовою залежністю визначення стану стрілочних переводів буде практично неможливим, через поєднання амплітудних значень струму усіх стрілок, що перевелися одночасно, і перекриття часу переведення всіх стрілок часом найдовшого переведення. За спектральним же аналізом визначення стану стрілочних переводів залишиться можливим лише без прив'язки до конкретної стрілки. У разі появи в спектрі діагностичних ознак порушень справної роботи їх можна буде без ускладнень виявити і віднести за тими стрілками, які переводилися одночасно.



Рис. 2. Структурна схема системи діагностування та контролю стрілочних переводів

Fig. 2. Block diagram of turnout's system diagnostics

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Робота системи виконується таким чином. Після спрацювання поляризованого пускового реле по шунту починає протікати робочий струм, падіння напруги на якому подається на АЦП і в цифровому вигляді потрапляє до персонального комп'ютера. В комп'ютері крива струму порівнюється з зразковою кривою і по результатах цього порівняння виносяться рішення про стан стрілочного переводу на даний момент часу. Криві зберігаються в пам'яті комп'ютера протягом встановленої кількості днів, що дає змогу відстежувати розвиток поступових відмов та на їх підставі робити висновки про працездатність чи непрацездатність, а також прогнозувати час досягнення відмовою критичного значення.

Для кожного типу стрілочного електропривода з конкретним типом електродвигуна, встановленого на стрілці з визначеною маркою хрестовини, існують завчасно визначені технічні показники, відповідність яким підтверджує справність стану [3].

Процес визначення несправностей елементів стрілочних переводів є алгоритмом (рис. 3), в основі якого закладено три основні ознаки кривої струму переведення стрілок: час переведення стрілки, амплітуда та спектральний склад струмової кривої. Розглянемо принцип функціонування системи пошуку несправностей, опираючись на розглянуті раніше ознаки дефектів. Якщо час, за який переводиться стрілка, відповідає нормативним показникам для даного типу стрілочного електропривода з даним електродвигуном, встановленому на ньому, то можна зробити попередній висновок, що умови утримання стрілочного переводу відповідають технічним вимогам [17, 18, 55], він налаштований та відрегульований правильно і знаходиться у справному стані. Відповідно, якщо час переведення стрілки збільшився з будь-яких причин, то це свідчить про наявність недоліків в роботі стрілочного переводу.

Аналіз кривої струму виконується для всієї кривої струму, у разі потреби – окремо для кожної з трьох ділянок. Прийняття рішення про відсутність чи наявність недоліків в роботі стрілочного переводу відбувається на підставі порівняння отриманих даних при переводі стрілки спочатку для усієї часової залежності з нормованим значенням, а потім, у випадку

знаходження розбіжностей, стосовно кожного етапу переведення окремо.

Порядок роботи алгоритму з перевірки стану стрілочних переводів за часом переведення наступний. Якщо загальний час переведення стрілки відповідає встановленим нормативним значенням, тоді немає необхідності перевіряти криву струму по частинам і виконується перехід до наступного блоку аналізу стану стрілочного переводу за струмом. В іншому випадку крива струму розбивається на ділянки і відповідності до робочого ходу і аналізується по частинам. Діагностування проходить у порядку почергового аналізу починаючи з першої пускової ділянки, яка продовжується від моменту подачі живлення на електродвигун на початку переводу і триває до розмикання стрілки. Для цього етапу переводу характерним є зрушення з місця електродвигуном механізму передачі руху до шибера.

На другому етапі перевірки аналізується тривалість переводу стрілки під час переведення гостряків, який починається амплітудним сплеском струму після розмикання стрілки і закінчується різким зменшенням струму наприкінці переводу при розмиканні контактів автоперемикача. В цей проміжок часу електродвигун приводить в рух гостряки з одного крайнього положення в інше, а тому до сигналу кривої струму додаються складові, які вносять вузли кріплення та рух гостряків по башмаках. Для цього інтервалу часу характерна присутність в кінці переводу залишкового обертового електромагнітного поля від збуджених обмоток електродвигуна.

Після проведення перевірки на відповідність часу переведення стрілки нормативному значенню слід перейти до визначення відповідності амплітудних величин кривої струму до нормативних значень еталонного сигналу. Встановлення відповідності нормативним значенням кривої струму буде виконуватись шляхом визначення ступеня наближення досліджуваного сигналу до еталонного і прийняття рішення на підставі значень величин відхилень між ними на кожній з трьох часових ділянок. Перевірка відбувається за тими ж принципами, що і для визначення відповідності часу переводу нормативним значенням. Спочатку аналізується весь сигнал повністю і, якщо в амплітуді

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

струму переведення немає істотних відхилень від еталонних значень, то поетапне діагностування стану стрілочних переводів за струмом не виконується, а відразу за алгоритмом відбувається перехід на спектральний аналіз.

Наступним етапом перевірки стану стрілочного переводу є аналіз спектру струмової кривої, за яким визначення відбувається по всій довжині спектральної характеристики кривої струму переведення стрілки. У випадку відсутності різниці між спектрами зразкової кривої струму і кривої струму переводу стрілки, яка досліджується, алгоритм завершується, а об'єкт перевірки вважається таким, що не має несправностей за спектральним складом.

Стрілочний перевід вважається справним, якщо під час перевірки його стану за алгоритмом діагностування (рис. 3) відбувалися лише переходи по гілках відсутності відхилень від норм та показників еталонного сигналу.

Слід зауважити, що у випадку фіксації часових і амплітудних показників, менших за нормовані значення, застосування діагностичних ознак виконується у тому ж порядку, що і у випадку перевищення їх.

Перейдемо до створення програмного комплексу системи автоматизованого технічного діагностування поточного стану стрілочних переводів з електроприводами змінного струму.

Вікно програмного комплексу технічного діагностування та контролю поточного стану стрілочних переводів (рис. 4) складається з 5 закладок і 6 функціональних кнопок, вікон поточного відображення кривої струму і її спектрального складу, вікон визначення номера стрілки, що переводилася, значення струму переводу при запуску її в хід і в робочому режимі, часу переводу, та складеної за цими показниками інформації визначення поточного стану стрілочного переводу, полів виведення повідомлень про відсутність чи наявність пошкоджень з визначенням його виду та поради щодо усунення знайдених несправностей. В самому низу вікна розташоване інформаційне поле виведення повідомлень в хронологічному порядку їх формування про здійсненні переведення стрілок з результатами діагностування їх стану.

Система технічного діагностування стрілочних переводів обладнана календарем та годинником для формування повідомлень з зазна-

ченням дати та часу виконання вимірювань при переведенні стрілки.

Розглянемо призначення закладок і функціональних кнопок. До закладок відносяться «Файл», «Екран», «Допомога», «Журнал» і «Довідка», які призначені для надання користувачу можливості користуватися усіма функціями системи. Закладка «Файл» призначена для розміщення основного ділового меню користувача і складається з таких операцій, як реєстрація чергового працівника під своїм логіном і паролем, збереження або відкриття раніше збережених файлів запису кривої струму переведення стрілок, друку файлу, меню налаштувань та виходу.

Закладка «Екран» дозволяє працювати безпосередньо з графічним зображенням кривої переводу стрілки. Серед пунктів даного меню знаходиться збільшення і зменшення як окремо по кожній з осей, так і одночасно в усіх вимірах, розгортка на весь екран монітору, вмикання/вимикання міток і маркерів у вікні виведення кривої струму.

Закладка «Допомога» надає користувачу інформацію про алгоритм проведення визначення поточного стану, порядку дій з діагностування та функції, які виконує програма. В закладці «Журнал» зберігаються електронні протоколи виконання робіт на стрілочних переводах з можливістю внесення коментарів користувачем в чітко визначене поле кожного окремого випадку. До закладки «Довідка» входить інформація про рік розробки та версії програмного комплексу діагностування стрілочних переводів, авторів проекту та іншої побічної інформації.

За допомогою кнопки «Форма/Спектр» у вікні «Часова/частотна залежність струму переводу» виконується побудова форми кривої струму переводу стрілки або виводиться її спектральний склад. Кнопку «Архів» призначено для виклику збережених кривих струму переводу, де вони зберігаються за часом та датою створення. Натискання кнопки «Статистика» призведе до появи контекстного меню з можливістю обрати вид сортування накопичених статистичних показників, серед яких кількість переводів за день, кількість порушень справної роботи стрілочних переводів, вид несправностей та частота їх повторення з зазначенням номерів стрілок, за якими вони визначені.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

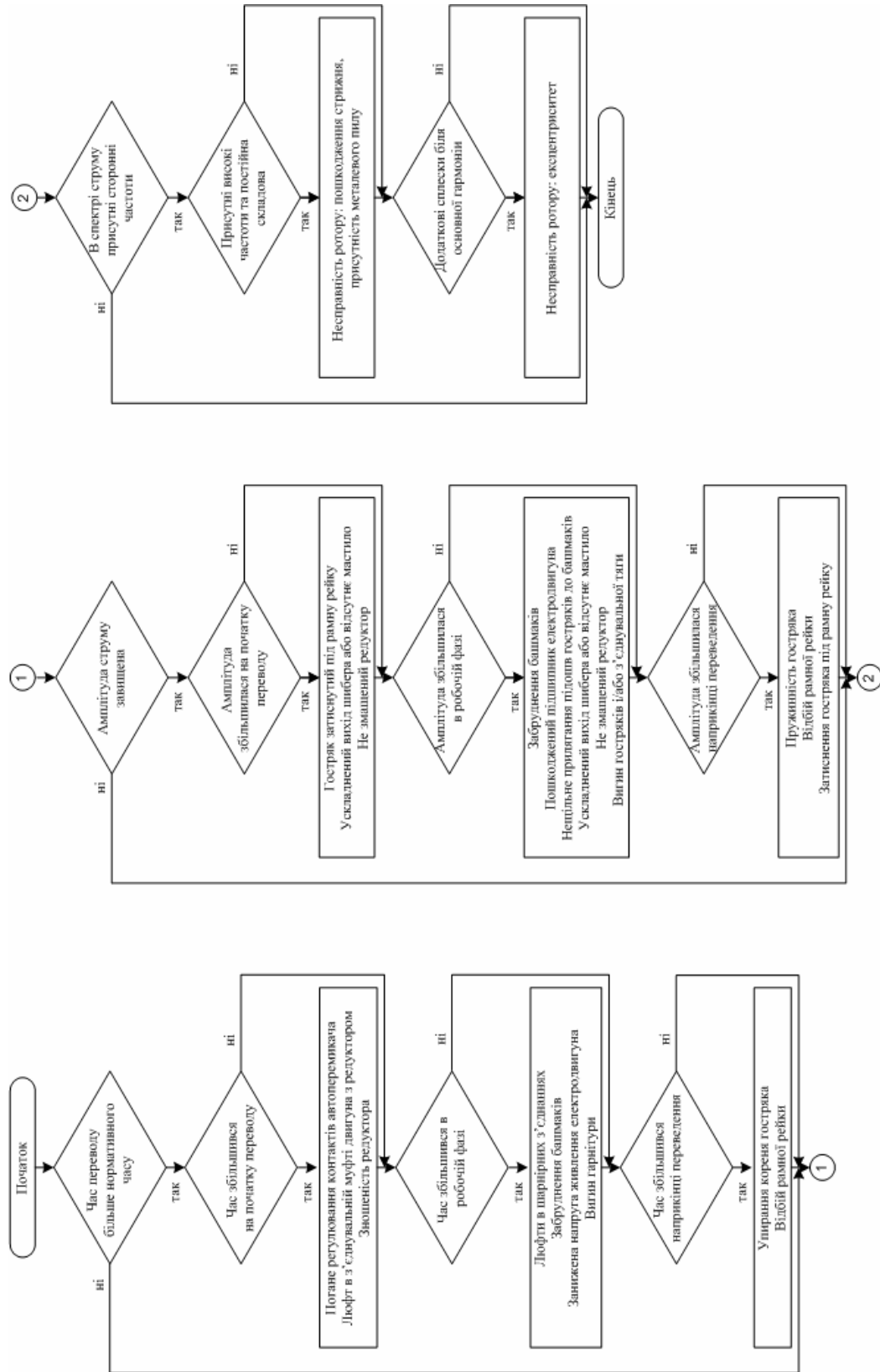


Рис. 3. Послідовність перевірки струмової кривої при пошуку пошкоджень

Fig. 3. The sequence of checking current curve on damages

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

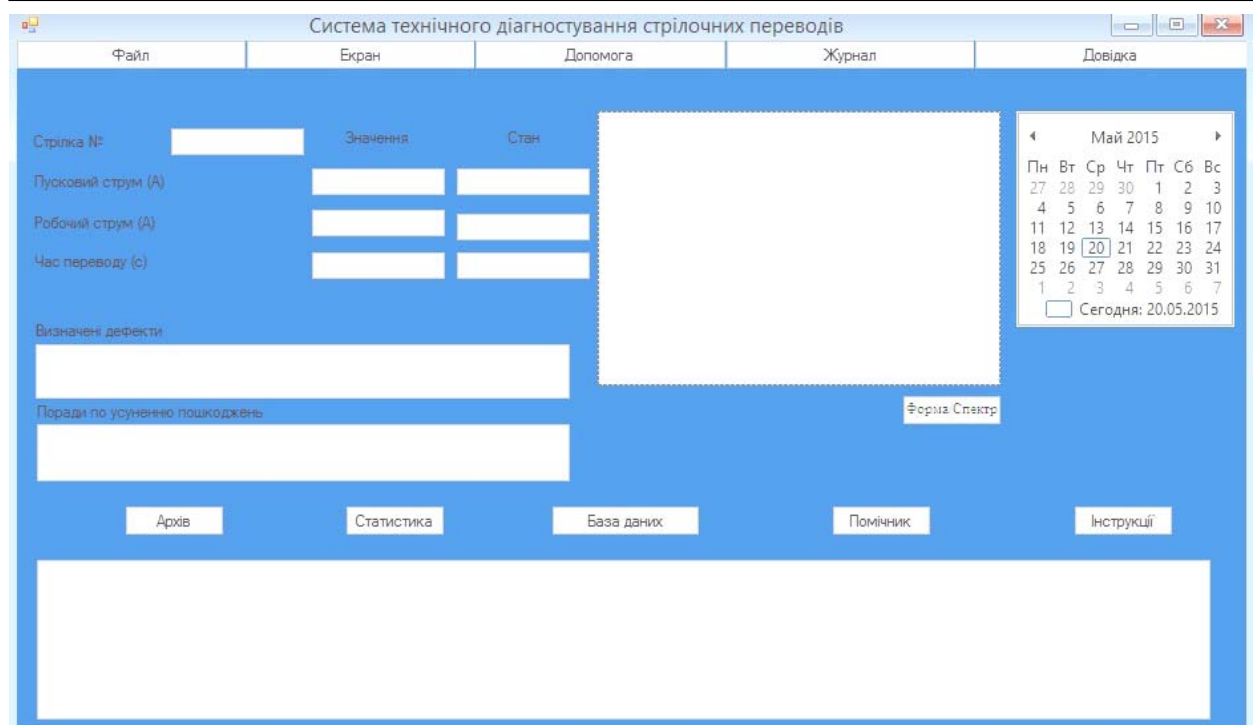


Рис. 4. Вікно системи технічного діагностування стрілочних переводів при роботі стрілки на фракцію

Fig. 4. Window of turnout's technical diagnostics system at switch work on fraction

За кнопкою «База даних» приховано перелік усіх стрілочних переводів із зазначенням їх типів, на яких стрілках вони встановлені, які типи електродвигунів використовуються, дата їх побудови, дата останньої заміни елементів та виконання технічного огляду і обслуговування. Дані до цього меню вносяться працівником самостійно і мають автоматично формовані посилання на записи системи про всі види маніпуляцій зі стрілочним переводом, серед яких відкривання і переведення. Внесена інформація про виконання перевірок редагуванню з даного меню не підлягає і зберігається в архіві кнопки «База даних».

Кнопка «Підказувач» є розширеною версією інформаційних полів «Визначені дефекти» і «Поради по усуненню пошкоджень» програмного вікна. Вона слугує для видачі детальних пояснень у разі визначення несправностей стрілочного переводу щодо місця його виникнення, порядку дій працівника, засобів, необхідних для усунення несправності та посилання на пункти інструкцій з приведенням норм параметрів, які вийшли за межі. У випадку відсутності відмов користувач все одно має можливість ознайомитися з усіма видами не-

справностей і шляху їх подолання, які описані у даному меню.

Кнопка «Інструкції» викликає електронні версії інструкцій з технічними нормами і вимогами з утримання і обслуговування стрілочних переводів.

Також на робоче вікно програми виводиться номер стрілки, значення її пускового струму, робочого струму і часу переводу стрілки з обов'язковою характеристикою стану за всіма трьома показниками, який може бути трьох типів: справний, невідомий, пошкодження.

Окрім інформаційних полів «Визначені дефекти» і «Поради по усуненню пошкоджень», на яких виводяться повідомлення про відсутність дефектів, можливість їх присутності чи вказується вид несправності і поради щодо боротьби з ними, програмне вікно має поле виведення подій з результатами виконаного аналізу у скороченій формі за їх хронологічним настанням.

Система функціонує таким чином. При переведенні стрілки струмова крива знімається з вимірювального шунта в панелі живлення стрілок за допомогою АЦП і записується до пам'яті комп'ютера. Програмне забезпечення

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

в автоматичному режимі виконує аналіз отриманих даних в часовій та частотній площинах і виводить зображення кривої струму у відповідне поле робочого вікна програми. За результатами виконаного аналізу у відповідних полях робочого вікна з'являються числові значення вимірюваних параметрів та смислові підсумкові повідомлення про стан стрілочного переводу. Над цими даними виконується статистична обробка, вони додаються в архів, формується електронний журнал і ставляться відповідні відмітки в полі меню кнопки «База даних».

Результати

Приклад застосування автоматизованої системи технічного діагностування стану стрілочних переводів під час роботи стрілочного двигуна на фрикцію (рис. 5) показав, що при навмисному послабленні стопорного гвинта фрикційного зчеплення програмно-апаратний комплекс вірно визначив пошкодження та надав рекомендації щодо його усунення.

При переведенні стрілки між гостряком і рамною рейкою було закладено шаблон товщиною 4 мм, при якому стрілочний електропривод не має замикатися, оскільки стрілка вважається недоведеною, через що стрілочний електродвигун почав працювати на фрикційний механізм.

Послаблення стопорного гвинта призвело до зменшення натиснення рухомих дисків, жорстко закріплених до корпусу фрикціону, відносно жорстко закріплених сталених дисків до осі вихідного валу-шестерні редуктора. Тому при зупинці руху вихідного валу-шестерні редуктора, коли гостряк дійшов до шаблону, для провертання дисків фрикційної муфти один відносно одного електродвигуну знадобилося розвивати менше зусилля порівняно з нормованим значенням струму в колі живлення при роботі на фрикцію.

Одночасно з цим у спеціально відведених полях вікна програми з'явилося повідомлення з відповідним змістом (див. рис. 5) вимірюваних параметрів та знайденою і визначеною невідповідністю нормальному переводу. Також програма надала рекомендацію зі способу усунення виявленого недоліку в роботі у полі «Поради по усуненню пошкоджень».

В нижньому вікні, інформаційному полі, збережені два попередніх результати дослідів, в яких відображено дату і час виконаних вимірювань, номер стрілочного переводу, основні параметри кривої струму, стан, якому вони відповідають і вид пошкодження, якщо воно присутнє.

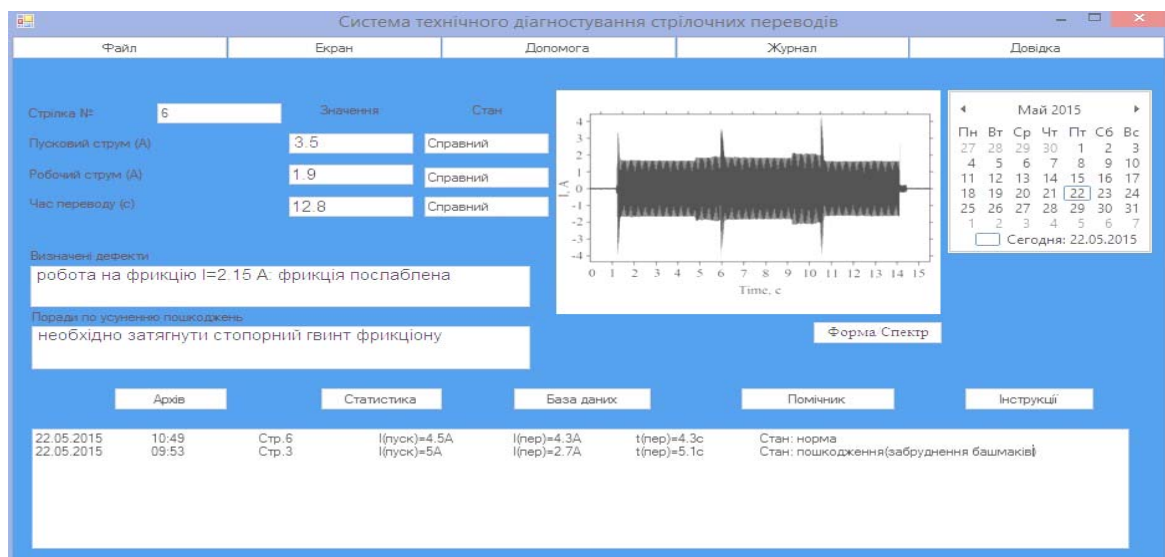


Рис. 5. Програмний комплекс технічного діагностування та контролю поточного стану стрілочних переводів

Fig. 5. Program complex of technical diagnosing and the turnout's current state

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Наукова новизна і практична значимість

Здобуті результати дозволили розробити новий автоматичний метод діагностування технічного стану стрілочних переводів без вимкнення стрілок з експлуатації, який може використовуватись в системах електричної централізації, гіркової централізації, систем диспетчерського керування і контролю.

Вперше:

– виконано наукове обґрунтування розробленого методу автоматизованого діагностування стрілочних переводів, що знаходяться в експлуатації, на основі аналізу функції струму переведення стрілки в часовій та частотній області з використанням запропонованої процедури оцінки абсолютного відхилення струму від граничних значень та апарату штучних нейронних мереж;

– створено програму технічного діагностування стану стрілочного переводу з електроприводом змінного струму, яка в автоматичному режимі виконує функціональне діагностування стану стрілочного переводу і повідомляє значення вимірних параметрів кривої струму з аналізом їх відповідності одному з можливих станів, а також видає рекомендації з усунення недоліків в роботі стрілочного переводу у випадку їх визначення.

Висновки

Створено метод автоматизованого діагностування стану стрілочних переводів з електроприводами змінного струму, управління якими здійснюється централізовано, в основу якого покладено аналіз часової залежності та спектрального складу струмової кривої, що окрім підвищення надійності експлуатації, дозволяє покращити безпеку руху поїздів, оскільки з'являється можливість завчасно приймати міри з усунення поступово виникаючих пошкоджень, а час знаходження обслуговуючого персоналу в зоні руху потягів скорочується.

Розроблена система автоматизованого діагностування стрілочних переводів, яка дозволяє об'єктивно оцінювати їх стан в реальному часі і оперативно реагувати на відмови, що дозволить крім зменшення кількості затриманих поїздів з причини некерованості стрілок, усува-

ти передвімовний стан, встановлений на підставі аналізу змін власних робочих характеристик, а також часових і амплітудних показників струму електродвигуна при переводі стрілки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буряк, С. Ю. Исследование временной зависимости и спектрального состава сигнала в цепи стрелочных электродвигателей переменного тока / С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк, О. А. Гололобова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 6 (54). – С. 7–22. doi: 10.15802/stp-2014/33-035.
2. Дистанционное диагностирование состояния стрелочных переводов по временной характеристике и спектральному составу токовой кривой / С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк, О. А. Гололобова, М. А. Ковригин // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2015. – № 2 (56). – С. 39–57. doi: 10.15802/stp2015/42159.
3. Исследование диагностических признаков стрелочных электроприводов переменного тока / С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк, О. А. Гололобова, А. М. Безнарытний // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 4 (52). – С. 7–22. doi: 10.15802/stp2014/27324.
4. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування. ЦШЕОТ 0012. – Київ : Укрзалізниця, 1998. – 72 с.
5. Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування. ЦШ 0042. – Київ : Укрзалізниця, 2006. – 461 с.
6. Резников, Ю. М. Электроприводы железнодорожной автоматики и телемеханики / Ю. М. Резников. – Москва : Транспорт, 1985. – 288 с.
7. Albahari, J. C# 5.0 in a Nutshell: The Definitive Reference / J. Albahari, B. Albahari. – Highway North : Sebastopol, 2012. – 1049 p.
8. Chaparro, L. F. Signals and Systems Using MATLAB / L. F. Chaparro // Department of Electrical and Computer Engineering University of Pittsburgh. – Oxford : Elsevier, 2011. – 752 p.
9. Leis, J. W. Digital Signal Processing Using MATLAB for Students and Researchers / J. W. Leis // Univ. of Southern Queensland. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2011. – 382 p. doi: 10.1002/9781118033623.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

- | | |
|--|--|
| 10. Lyon, R. H. Machinery Noise and Diagnostics, Butterworth Publishers / R. H. Lyon. – USA, 1987. – 299 p.
11. Tervo, R. J. Practical Signals Theory with MATLAB Applications / R. J. Tervo. – Hoboken, New Jersey : Wiley, 2014. – 486 p. | 12. The C# Programming Language / A. Hejlsberg, M. Torgersen, Sc. Wiltamuth, P. Goide. – Addison Wesley, 2008. – 350 p.
13. Troelsen, A. Pro C# 5.0 and the NET 4.5 Framework / A. Troelsen. – New-York : ApresAugust 21, 2012. – 1560 p. |
|--|--|

С. Ю. БУРЯК^{1*}, В. И. ГАВРИЛЮК², О. А. ГОЛОЛОВА³

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта bsyur@mail.ru, ORCID 0000-0002-8251-785X

²Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта gvi_dp@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

³Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ

Цель. В исследовании необходимо: 1) выяснить причины появления неисправностей стрелочных переводов для того, чтобы определить диагностические признаки отказов; 2) рассмотреть требования, устройство, назначение составных частей стрелочных переводов, работу и технологию их обслуживания для построения системы ведения хозяйственной деятельности, связанной с содержанием стрелочных переводов; 3) обосновать возможность, необходимость и перспективы внедрения системы автоматизированного диагностирования стрелочных переводов; 4) разработать опытный образец автоматизированного аппаратно-программного комплекса для контроля параметров стрелочных переводов и выполнения их диагностирования. **Методика.** В работе были показаны возможные неисправности стрелочного перевода и рассмотрены их проявления и влияние на работу. По существующей технологии выполнения работ был проведен анализ процесса технического обслуживания стрелочных переводов, определены основные операции, которые выполнялись при обследовании внешнего вида, проверки параметров и ремонте или замене деталей и узлов. На основании проведенного анализа причин возникновения неисправностей стрелочных переводов и способов их устранения систематизированы виды повреждений и способы борьбы с ними, создана информационная схема поиска неисправностей, определены возможности и границы автоматизации процесса диагностирования и проведено сравнение с существующей методикой выполнения работ по содержанию стрелочных переводов. Создана структурная схема системы диагностирования, разработан алгоритм ее работы и заложены основные опорные принципы функционирования. Применен программно-аппаратный комплекс для определения состояния стрелочных переводов с учетом выполнения диагностирования стрелок, находящихся в эксплуатации. **Результаты.** В ходе эксперимента создан метод автоматизированного диагностирования состояния стрелочных переводов с электроприводами переменного тока, управление которыми осуществляется централизованно. Получены результаты работы автоматизированного аппаратно-программного комплекса для контроля параметров стрелочных переводов и выполнения диагностики. **Научная новизна.** Авторами разработан метод определения состояния стрелочного перевода по кривой тока и его спектральному составу в цепи стрелочного электродвигателя. Разработан и аппаратно-программный комплекс диагностирования централизованных стрелок. **Практическая значимость.** Благодаря полученным результатам повышается безопасность выполнения работ из-за уменьшения времени пребывания работников в зоне движения поездов, устраняется человеческий фактор при выполнении измерений. Скрытие и замалчивание фактов нарушений в работе стрелочных переводов становится невозможным.

Ключевые слова: электропривод; стрелочный перевод; анализ сигнала; диагностирование; временная зависимость; спектральный состав; контроль состояния; алгоритм работы; кривая тока

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

S. YU. BURIAC^{1*}, V. I. HAVRYLIUK², O. O. HOLOBOVA³^{1*}Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail bsyur@mail.ru, ORCID 0000-0002-8251-785X²Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gvi_dp@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478³Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

IMPLEMENTATION OF TURNOUTS TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEMS

Purpose. In the paper it is necessary to: 1) find out the causes of turnout faults to determine diagnostic features failures; 2) consider the requirements structure, purpose components of turnout, work and technology of their maintenance to determine the construction of the economic activities related to system to the turnout's maintenance; 3) substantiate the possibility, necessity and prospects of automated diagnostics turnout's implementation; 4) elaborate a prototype of an automated hardware and software system for the turnout control parameters and perform diagnostics on them. **Methodology.** In the paper possible turnout faults were presented and manifestations and influence on its work were shown. According to the current technology works the process analyze of turnout's maintenance was conducted, were defined the basic performed operations during the examination of appearance, parameters and check the repair or replacement of parts and assemblies. Based on the analysis of reasons of turnout malfunctioning and their fixes were systematized types of damages and ways to deal with them, an information scheme of troubleshooting were created, opportunities and limits of automating the process of diagnostics were identified and compared with the existing method of turnout maintenance. A diagnostics system block diagram was created, an algorithm of its work was developed and established main basic principles of operation. Software and hardware to determine the turnout's state considering diagnostic performance of points in use were applied. **Findings.** During the experiment was created a method of automated turnout's diagnostics with AC electric drives, managed centrally. The results of automated hardware and software system make it possible to control turnout's parameters and perform diagnostics on them. **Originality.** Authors created the method of turnout's state determination by current curve and its spectral composition in the circle of turnout electric motor. The de hardware and software centralized point's diagnostics complex was developed. **Practical value.** Thanks to the obtained results the operation safety due to a time workers decrease in the area of train's movement is increased. The human factor in the performance of measurements is eliminated. Hiding and concealment the facts of turnout malfunction are not possible.

Keywords: electric switch; turnout; signal analysis; diagnosis; time dependence; spectral composition; condition control; operation algorithm; current curve

REFERENCES

1. Buryak S.Yu., Gavriluk V.I., Gololobova O.A. Issledovaniye vremennoy zavisimosti i spektralnogo sostava signala v tsepi strelochnykh elektrodvigateley peremennogo toka [Study of time dependence and spectral composition of the signal in circuit of AC electric point motors]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 6 (54), pp. 7-22. doi: 10.15802/stp2014/33035.
2. Buryak S.Yu., Gavriluk V.I., Gololobova O.A., Kovrigin M.A. Dstantsionnoye diagnostirovaniye sostoyaniya strelochnykh perevodov po vremennoy kharakteristike i spektralnemu sostavu tokovoy krivoy [Remote diagnostics of turnout state on timing and spectral composition in current curve]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 2 (56), pp. 7-24. doi: 10.15802/stp2015/42159.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

3. Buryak S.Yu., Gavrylyuk V.I., Gololobova O.A., Beznarytnyy A.M. Issledovaniye diagnosticheskikh priznakov strelochnykh elektroprivodov peremennogo toka [Diagnostic features research of AC electric point motors]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 4 (52), pp. 7-22. doi: 10.15802/stp2014/27324.
4. *Instruktsiia z tekhnichnoho obsluhovuvannia prystroiv syhnalizatsii, tsentralizatsii ta blokuvannia. TSSHEOT 0012* [Signaling, centralization and blocking manual maintenance]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 1988. 75 p.
5. *Prystroji syhnalizatsii, tsentralizatsii ta blokuvannia. Tekhnolohiia obsluhovuvannia. TSSH 0042* [Signaling, centralization and blocking devices. Maintenance technology]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2006. 461 p.
6. Reznikov Yu.M. *Elektroprivody zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Electric drives of railway automatics and remote control]. Moscow, Transport Publ., 1985. 288 p.
7. Albahari J., Albahari B. C# 5.0 in a Nutshell: The Definitive Reference. Highway North, Sebastopol Publ., 2012. 1049 p.
8. Chaparro L. F. Signals and Systems Using MATLAB. Department of Electrical and Computer Engineering University of Pittsburgh. Oxford, Elsevier Publ., 2011. 752 p.
9. Leis J.W. Digital Signal Processing Using MATLAB for Students and Researchers. University of Southern Queensland. New Jersey, John Wiley & Sons Publ., 2011. 382 p. doi : 10.1002/9781118033623.
10. Lyon R. H. Machinery Noise and Diagnostics, Butterworth Publishers. USA, 1987. 299 p.
11. Tervo R.J. Practical Signals Theory with MATLAB Applications. Hoboken, New Jersey, Wiley Publ., 2014. 486 p.
12. Hejlsberg A., Torgersen M., Wiltamuth S., Goide P. The C# Programming Language 3rd Edition, Addison Wesley, 2008. 350 p.
13. Troelsen A. Pro C# 5.0 and the NET 4.5 Framework. New-York, ApresAugust 21, 2012, 1560 p.

*Стаття рекомендована до публікації д.фіз.-мат.н., проф. О. В. Коваленком (Україна);
д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Україна); д.т.н., проф. І. В. Жуковицьким (Україна)*

Надійшла до редколегії 12.03.2015

Прийнята до друку 11.06.2015

УДК 656.259.12:621.332.3-026.66

В. І. ЩЕКА^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 647 54 80, ел. пошта shcheka_v@mail.ru, vm.dp.mail@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ВПЛИВУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ НА РЕЙКОВІ КОЛА

Мета. У роботі необхідно дослідити електромагнітні процеси в системі «контактна мережа-рейки-земля» з метою забезпечення електромагнітної сумісності рейкових кіл із системою тягового електропостачання та, як наслідок, підвищення безпеки руху на залізниці. **Методика.** Для досягнення поставленої мети застосовано методи наукового аналізу, математичного моделювання, експериментального дослідження, масштабного моделювання. **Результати.** Проведені теоретичні та експериментальні дослідження свідчать про те, що при вивченні електромагнітних процесів у системі «контактна мережа-рейки-земля» в діапазоні частот до 1 МГц можна вважати, що рейкове коло (РК), як приймач завад, розташоване у ближній зоні. Це дозволяє сприймати електромагнітне поле завади стаціонарним і розглядати його як сукупність двох складових (електричної та магнітної), кожна з яких має свій механізм впливу на приймач. У результаті дослідження отримано теоретичну та експериментальну залежність наведеної у проводі-приймачі електрорушійної сили (ЕРС) від частоти струму завади. Отримана частотна залежність відносної похибки за даними «теорія-експеримент». Доведено адекватність застосованої математичної моделі експериментальним даним за критерієм Вілкоксона. **Наукова новизна.** Результати проведених експериментального та теоретичного досліджень магнітного впливу одного контуру на інший дають збіг у частотному діапазоні до 1 000 Гц із середньою відносною похибкою 2,33 %. При збільшенні частоти струму завади спостерігається впевнене зростання середньої відносної похибки між розрахованими та виміряними значеннями наведеної у проводі-приймачі ЕРС. **Практична значимість.** Підтверджено адекватність математичного апарату отриманим експериментальним даним за критерієм Вілкоксона на рівні значності 5 %, що дозволяє в діапазоні до 1000 Гц використовувати застосований математичний апарат для дослідження електромагнітних процесів у багатопроводних лініях та системі «контактна мережа-рейки-земля» зокрема. Отримані результати можуть бути корисними при проектуванні, дослідженні та забезпеченні електромагнітної сумісності рейкових кіл із системою тягового електропостачання.

Ключові слова: контактна мережа; рейкові кола; кондуктивний вплив; магнітний вплив; наведена ЕРС

Вступ

Доведення електромагнітної сумісності сучасного електрорухомого складу з РК є фундаментом забезпечення безпеки руху на залізниці. Тому дослідження особливостей роботи рейкових (РК) кіл в умовах електромагнітного впливу контактної мережі (КМ) є актуальною проблемою галузі. Вивчення характеру та ступеня впливу КМ на РК в кінцевому результаті дозволить організувати ефективні заходи щодо забезпечення електромагнітної сумісності РК з системою тягового електропостачання.

Мета

Метою роботи є виявлення та дослідження механізмів впливу КМ на РК для наукового обґрунтування методів та засобів забезпечення

електромагнітної сумісності РК з системою тягового електропостачання та, як наслідок, підвищення безпеки руху на залізниці.

Методика

Будь-який провідник зі змінним струмом створює навколо себе електромагнітне поле, яке призводить до виникнення в усіх прилеглих металевих об'єктах електрорушійних сил (ЕРС) індукції, під дією яких, при наявності замкненого контуру, протікають індукційні струми [1, 3, 5]. Це загально відоме явище, що базується на законі електромагнітної індукції, знаходить прояв і в системі КМ-РК-земля. Тут провідник зі струмом виступає контактний провід (КП), що створює потужне електромагнітне поле, яке здатне викликати ЕРС індукції в усіх оточуючих металевих об'єктах: рейках,

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

лініях сигналізації та зв'язку, кабельних мережах, прилеглих спорудах і будівлях. Наведені в такий спосіб ЕРС та струми можуть потрапляти у смугу частот, яка використовується іншими об'єктами як робоча, утворюючи, таким чином перебої в роботі пристроїв.

Модель, що описує електромагнітну взаємодію, повинна містити три обов'язкові складові: джерело завад – об'єкт, що генерує небажані електромагнітні коливання під час свого нормального функціонування; механізм зв'язку – фізичний принцип передачі енергії завади від джерела до приймача; приймач – об'єкт, який опинившись під впливом електромагнітних завад може втратити змогу коректно виконувати свої функції.

Під час розгляду загальної системи джерело – приймач слід враховувати відстань між об'єктами, що мають електромагнітний зв'язок, визначити, знаходиться приймач в ближній чи дальній зоні відносно джерела [1, 6, 14]. Дальня зона визначається відстанню між джерелом та приймачем, а також швидкістю зміни поля, іншими словами якщо час зростання поля менше ніж час проходження електромагнітною хвилею відстані між джерелом та приймачем, то можна вважати, що приймач розташований у дальній зоні. В такому випадку приймач з джерелом завад зв'язаний електромагнітним випроміненням, а електромагнітне поле завади повинно розглядатися як нестационарне, внаслідок чого опис і дослідження таких електромагнітних процесів стає громіздким.

Якщо приймач розташований в безпосередній близькості до джерела, на відстані, яка не перевищує довжини хвилі завади ($d \ll \lambda/2\pi$), то можна вважати, що приймач знаходиться у ближній зоні [1, 6, 12]. Знаходження приймача у ближній зоні дозволяє припустити, що зміни електромагнітного поля, згенерованого джерелом завади, відбуваються одночасно в усіх точках простору. Завдяки такому припущенню поле завади у ближній зоні можна вважати стаціонарним, тоді між джерелом та приймачем може існувати кондуктивний та індуктивний зв'язок. Крім того, в такому випадку єдине електромагнітне поле завади може розглядатися як сукупність двох складових: електричної та магнітної, кожна з яких має свій механізм впливу на приймач.

Ступінь впливу на приймач залежатиме від симетричності впливаючих і схильних до впливу ліній [1, 3, 12–14]. Будь-яка лінія вважається симетричною, якщо її проводи мають однакові первинні (активний опір, індуктивність, ємність між проводами і відносно землі, провідність ізоляції) і вторинні параметри (волновий опір і коефіцієнт розповсюдження хвилі). Більший електромагнітний вплив створюють лінії з більшим ступенем несиметрії. Коло КМ створене КП та рейками, що зв'язані з землею, тому первинні та вторинні параметри проводів такого кола будуть значно відрізнятися. А враховуючи, що струм в рейках та землі повністю дорівнює робочому струму в КП, КМ можна віднести до повністю несиметричних ліній [1,3], внаслідок чого КМ є потужним джерелом електромагнітних завад.

Рейкова лінія розташована поблизу КМ та виступає одним з її проводів, а отже малопотужне РК є потенційним приймачем електромагнітних завад з боку КМ.

Під час дослідження електромагнітного впливу КМ в діапазоні частот до 1 МГц можна вважати, що РК, як приймач завад, розташований у ближній зоні. Це дає можливість розглянути окремо кондуктивний, електричний та магнітний вплив КМ. Рейкова лінія бере участь у каналізації зворотного тягового струму, гармонічні складові якого можуть потрапляти у смугу сигнальних частот РК, створюючи цим заважаючий або небезпечний вплив, таким чином КМ створює гальванічні завади, які можуть суттєво впливати на роботу РК.

Наявність напруги у КП зумовлює утворення електричного поля, під дією якого в рейкових лініях наводяться потенціали відносно землі. Величина наведеного потенціалу в рейкових лініях суттєво залежить від ємності між впливаючим та схильним до впливу проводами, тобто, в нашому випадку, між КП та рейкою. Внаслідок незначних значень цієї ємності наведені в такий спосіб електричні потенціали не будуть мати досить великих рівнів, тому часто для спрощення розрахунків цим видом впливу нехтують.

Під час руху потягу в зоні колії утворюється низькочастотне магнітне поле, що спрямоване перпендикулярно до осі колії та зростає пропорційно збільшенню тягового струму в КМ. Під дією цього поля індукуються заважаючі по-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

вздовжні ЕРС в рейкових лініях, кабелях зв'язку та інших лініях автоматики, прокладених вздовж колії. Повздовжня ЕРС, при розподілі уздовж лінії, створює в ній напругу відносно землі, що змінюється по довжині лінії, а також може викликати в ній струм, який замикається через розподілену ємність лінії відносно землі. У двопровідних лініях поздовжні ЕРС, індуковані в кожному з проводів, створюють в кінці лінії неоднакову напругу кожного проводу відносно землі унаслідок повздовжньої і поперечної асиметрії ліній, а також неоднакової відстані до впливаючого проводу. В результаті чого з'являється деяка різниця потенціалів між проводами лінії, під дією якої, за наявності контура, протікатиме різницевий струм (струм асиметрії). Таким чином індуковані в рейках повздовжні ЕРС викликають протікання в них струмів завад, які можуть бути причиною відмов в роботі РК [1, 7, 8, 13, 15].

Головним параметром магнітного зв'язку між приймачем та лінією, що створює вплив, виступає опір взаємоіндукції $Z_{iv} = \omega \cdot M_{iv}$, де M_{iv} – коефіцієнт взаємоіндукції між двома лініями, що розглядаються [2, 6, 10].

Одним з основних джерел завад на залізницях, як зазначалось вище, виступає повністю несиметрична лінія контактної мережі, іншими словами контур КП – земля. Приймачем завад в свою чергу є рейкові кола, а саме контур рейка – земля. Отже, під час дослідження впливу КМ на РК необхідно розглядати опір взаємоіндукції між КП та рейками, на який суттєвий вплив створює провідність землі. В реальній ситуації земляний шар є неоднорідним, а його провідність залежатиме від геологічної породи та кліматичних умов. Це значною мірою ускладнює процес теоретичного дослідження магнітного впливу КМ, а отримані результати моделювання в свою чергу потребують перевірки експериментом.

В літературі [1–3, 6–11, 13–15] розглядається багато варіантів підрахунку коефіцієнта взаємоіндукції між двома проводами, але всі вони дають лише в тій чи іншій мірі наближення до дійсності. Найбільш розповсюдженим та оптимальним для низьких частот вважається запропонований Поллячеком вираз, який має такий вигляд:

$$M_{iv} = \left[1 + 2 \cdot \ln \frac{12,66}{\sqrt{f_k \sigma \cdot (a_{iv}^2 + (b_i - c_v)^2)}} - j \left(\frac{\pi}{2} + 11,87 \cdot \sqrt{f_k \sigma} \cdot e^{j\frac{3}{4}\pi} \cdot (b_i + c_v) \right) \right] \cdot 10^{-4}, (1)$$

де a_{iv} – відстань між проводами по горизонталі, м; b_i, c_v – висота проводів над землею, м; σ – питома провідність землі, См/м; f_k – частота струму, що впливає, кГц.

Основним недоліком усіх формул в [1–3, 6–11, 13–15] є можливість їх застосування тільки на низьких частотах, зокрема на частоті 50 Гц. Певний науковий інтерес становить дослідження розрахункової формули (1) на більш високих частотах, та особливо в частотному діапазоні тональних РК.

У зв'язку з цим в роботі виконано теоретичне та експериментальне дослідження магнітного впливу однієї лінії на іншу. Ступінь впливу можна оцінити за рівнем наведеної в лінії-приймачі ЕРС [1,3,5]:

$$E_v = -j\omega M_{iv} I_i l, (2)$$

де I_i – струм в проводі, що створює вплив, А; l – довжина ділянки зближення проводів, м.

Для дослідження наведеної ЕРС в проводі-приймачі було виконано експеримент, схема якого зображена на рис. 1. На рисунку зображено провід-джерело завад, який утворює впливаючий контур разом з рейкою (пунктиром вказані лінії на дальньому плані). Від генератора в провід-джерело подається струм завади фіксованого рівня. Провід-приймач знаходиться на відомій відстані від джерела та разом із зворотним проводом утворює приймальний контур, в який увімкнене вимірювальне обладнання. Позначення на рис.1:

a – відстань між проводами по горизонталі;

a_r – відстань між проводом-джерелом та його зворотним проводом по горизонталі;

a_{36} – відстань між проводом-приймачем та його зворотним проводом по горизонталі;

h_1, h_2 – висота проводів над землею;

h_r, h_{36} – висота зворотних проводів над землею.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Задача експерименту полягала у фіксуванні рівнів наведеної в проводі-приймачі ЕРС на різних частотах при відомому струмі в проводі-джерелі.

Відстань між проводами бажано обрати невелику, що забезпечить більший рівень наведеної ЕРС (виходячи з (1) та (2)), та високе значення сигнал/шум на вимірювальній апаратурі. З цих самих причин довжину ділянки зближення між проводами доцільно обрати великою (виходячи з (2)). Оскільки в контурі приймачі, в наведеній схемі, можливо виміряти тільки різницю ЕРС, що наведені в проводі-приймачі та його зворотному проводі, розмір контуру доцільно збільшити, тобто обрати велике $a_{зв}$. Діапазон досліджуваних частот виберемо виходячи з частотного діапазону РК.

Під час виконання експериментального дослідження були обрані наступні параметри схеми: $a = 0,1\text{ м}$, $a_r = 2,9\text{ м}$, $a_{зв} = 10\text{ м}$, $h_1 = h_2 = 1,4\text{ м}$, $h_r = 0,1\text{ м}$, $h_{зв} = 0\text{ м}$, довжина ділянки зближення $l = 25\text{ м}$. Діапазон частот струму завади: 0–6000 Гц. Під час виконання вимірів для кожної частоти окремо фіксувалось значення струму завади.

Для інтерпретації отриманих експериментальних даних було виконано теоретичний розрахунок рівня наведеної ЕРС в колі приймача за параметрами експерименту. Оскільки схема є багатопровідною, при розрахунку необхідно врахувати взаємоіндуктивні зв'язки між: про-

водом джерелом та проводом-приймачем ($M_{дп}$), проводом джерелом та зворотним проводом приймача ($M_{дзв}$), зворотним проводом джерела (рейкою) та проводом-приймачем ($M_{гп}$), рейкою та зворотним проводом приймача ($M_{гзв}$). Розрахунок коефіцієнтів взаємоіндукції виконувався за (1), з урахуванням геометрії схеми вимірювання. Зв'язком між власними проводами контурів знехтуємо, оскільки між ними існує кондуктивний зв'язок, що значно більший. В результаті в контурі приймача наводиться ЕРС від кожного описаного вище зв'язку, яку можна знайти за (2). Тоді, з урахуванням знака, на вимірювальний прилад діятиме результуюча ЕРС:

$$E = E_{дп} - E_{дзв} - E_{гп} + E_{гзв}.$$

Окрім цього, виконаний натурний експеримент був відтворений в лабораторних умовах на модельному стенді в масштабі 7,45:1. Стенд повністю імітує виконаний експеримент та дозволяє отримувати рівні наведеної ЕРС в колі приймача при відомому струмі джерела. Присутність землі в стенді імітується суцільним металевим листом.

Результати виконаних досліджень зображено на рис. 2.

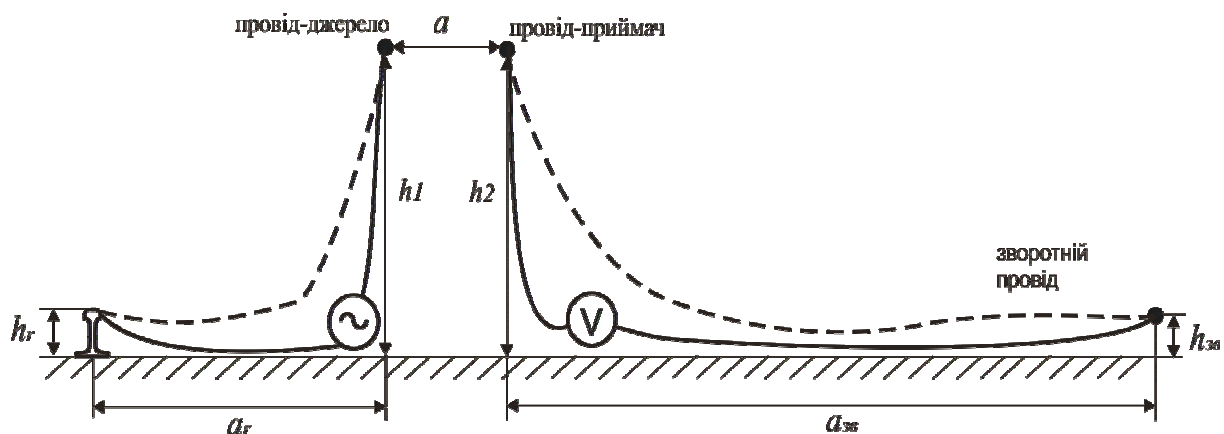


Рис. 1. Структурна схема експерименту

Fig. 1. Structural scheme of the experiment

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

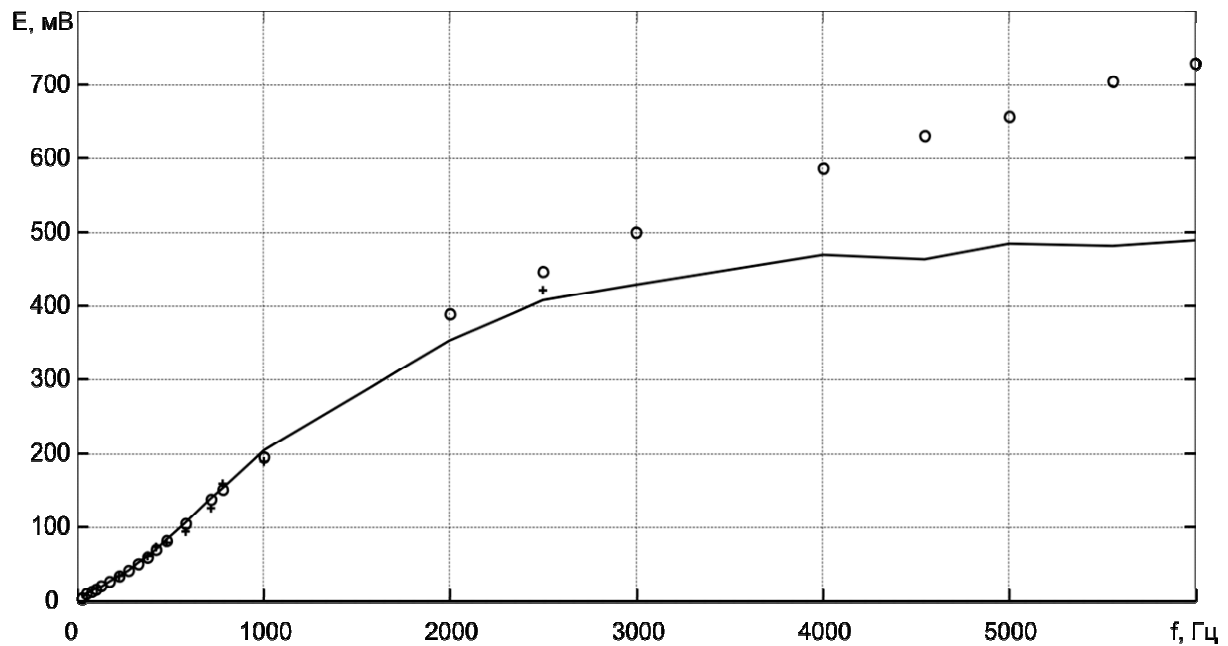


Рис. 2. Порівняльна діаграма результатів дослідження

Fig. 2. Comparative chart of the study results

Результати

На рис.2. зображено залежність наведеної в контурі-приймачі ЕРС від частоти струму завади. Суцільною лінією показано результат теоретичного розрахунку з використанням (1) та (2). Знаком « $\circ$ » відмічені значення ЕРС, що отримані під час виконання натурного експерименту. Знаком « $+$ » позначено ЕРС, що виміряно на модельному стенді з урахуванням масштабу. З рис. 2. видно, що рівні наведеної ЕРС, отримані різними способами, збігаються приблизно до частоти 1 000 Гц, при більш високих частотах значення теоретичної моделі значно нижчі від результатів експериментів. Середня відносна похибка на діапазоні частот до 6 000 Гц складає 11,12 %, причому у діапазоні 2 000–6 000 Гц вона становить 28,69 %, а на частоті 6 000 Гц 49 % [4] (рис. 3).

На рис. 3 спостерігається різке зростання відносної похибки, починаючи з частоти 1000 Гц, тому, з цієї причини, можна зробити впевнений висновок, що застосування наведеного математичного апарату на базі (1) та (2) в частотному діапазоні більше 1000 Гц є неможливим.

Розглянемо детальніше частотний діапазон до 1000 Гц, що наведений на рис. 4. Позначення на рис. 4 ідентичні до рис. 2.

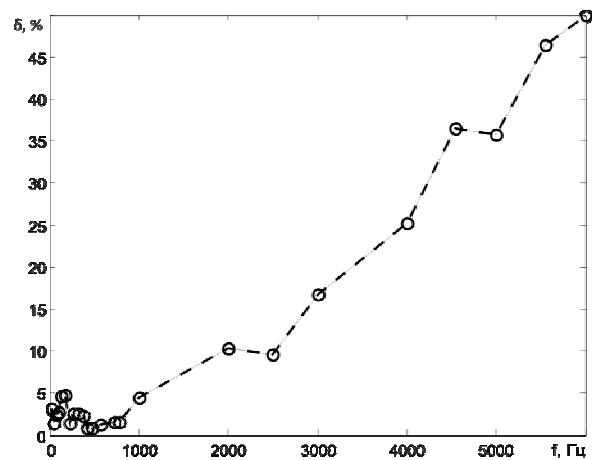


Рис. 3. Залежність відносної похибки (теорія-експеримент) від частоти

Fig. 3. The dependence of the relative error (theory-experiment) from the frequency

З рис. 4 видно досить добрий збіг результатів визначення наведеної ЕРС різними способами. На низьких частотах результати експерименту трохи більші, ніж теоретичні, що пояснюється абсолютною похибкою вимірювання при низьких значеннях сигнал/шум. Це також призводить до отримання збільшеної відносної похибки на низьких частотах (рис. 5).

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

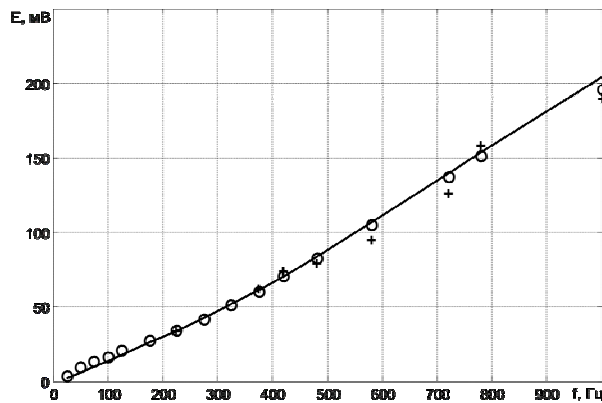


Рис. 4. Порівняльна діаграма результатів дослідження в частотному діапазоні до 1000 Гц

Fig. 4. Comparative chart of the study results in the frequency range up to 1000 Hz

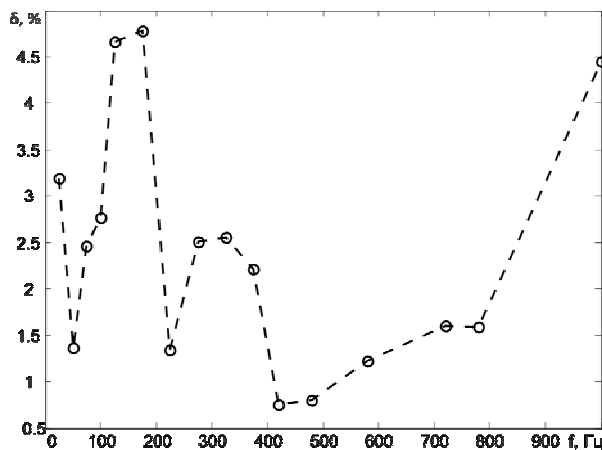


Рис. 5. Залежність відносної похибки (теорія-експеримент) від частоти в діапазоні до 1000 Гц

Fig. 5. The dependence of the relative error (theory-experiment) from the frequency range up to 1000 Hz

Відносна похибка по окремих результатах не перевищує 5 %. Середня відносна похибка на діапазоні частот до 1000 Гц складає 2,33 %, при чому у діапазоні тональних РК 420–780 Гц вона становить 1,19 %. В роботі підтверджено адекватність математичного апарату отриманими експериментальними даними за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності [4]. Це дозволяє зробити висновок про можливість застосування математичного апарату на базі (1) та (2) в частотному діапазоні до 1000 Гц з досить невисокою відносною похибкою.

Наукова новизна та практична значимість

Результати виконаного експериментального та теоретичного дослідження магнітного впливу одного контуру на інший дають збіг у частотному діапазоні до 1000 Гц з середньою відносною похибкою 2,33 %; у діапазоні 2 000–6 000 Гц вона становить 28,69 %.

Підтверджено адекватність математичного апарату отриманими експериментальними даними за критерієм Вілкоксона на 5 % рівні значності, що дозволяє в діапазоні до 1000 Гц застосовувати математичний апарат на базі (1) та (2) для дослідження електромагнітних процесів в багатопровідних лініях та системі КМ-РК-земля зокрема. Отримані результати можуть бути корисними під час проектування, дослідження та забезпечення електромагнітної сумісності рейкових кіл з системою тягового електропостачання.

Висновки

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження свідчать про те, що в системі КМ-РК-земля відстань між проводами системи є дуже малою порівняно з довжиною хвилі завади, тобто контур-приймач, а саме РК, знаходиться у ближній зоні, що дозволяє вважати електромагнітне поле завади стаціонарним та розглядати його як сукупність двох складових: електричної та магнітної, кожна з яких має свій механізм впливу на приймач.

Виконаний порівняльний аналіз результатів дослідження частотної залежності наведеної ЕРС в проводі-приймачі показує достатню для інженерних розрахунків точність даних, отриманих за допомогою математичного апарату на базі (1) та (2) в діапазоні до 1кГц. При збільшенні частоти струму завади спостерігається зростання середньої відносної похибки між розрахованими та вимірними значеннями наведеної у проводі-приймачі ЕРС. Це дозволяє зробити висновок про можливість застосування наведеного математичного апарату в частотному діапазоні до 1кГц з досить невисокою відносною похибкою.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – Москва : УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Завгородний, А. В. Сравнительный анализ методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог / А. В. Завгородний // Информ.-управл. системы на ж.-д. трансп. – 2010. – № 2. – С. 49–53.
3. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. Г. Марквардт. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Романов, В. Н. Теория измерений. Анализ и обработка экспериментальных данных : учеб. пособие / В. Н. Романов, В. В. Комаров. – Санкт-Петербург : СЗТУ, 2002. – 127 с.
5. Справочник по электроснабжению железных дорог : в 2 т. / под ред. К. Г. Марквардта. – Москва : Транспорт, 1980 – 1981. – 238 с.
6. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике : пер. с нем. / И. П. Кужекин ; под ред. Б. К. Максимова. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
7. Щека, В. І. Дослідження впливу зворотного тягового струму на режими роботи тональних рейкових кіл / В. І. Щека, І. О. Романцев, К. І. Яшук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 24–28.
8. Щека, В. І. Дослідження магнітного впливу електрорухомого складу на тональні рейкові кола / В. І. Щека // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті : тези III міжнар. наук.-практ. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 52–53.
9. Щека, В. І. Розробка системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу контактної мережі суміжної колії / В. І. Щека, О. В. Завгородній // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 36. – С. 156–160.
10. Carson, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return / J. R. Carson // Bell Systems Technical J. – 1926. – Vol. 5. – Iss. 4. – P. 539–554. doi: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x.
11. Gavrilyuk, V. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonic / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnij, A. Myrgorodska // Archives of Transport System Telematics. – 2009. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 33–37.
12. Mohamed, F. P. A novel approach in the measurement of high frequency disturbances from very large electrical systems / F. P. Mohamed, W. H. Siew, K. Y. Liu // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. – 2014. – Vol. 3. – Iss. 2. – P. 46–50. doi: 10.1109/MEMC.2014.6849-543.
13. Ogunsola, A. Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management / A. Ogunsola, A. Mariscotti. – Berlin : Springer-Verlag, 2013. – 528 p.
14. Olsen, R. G. Electromagnetic Wave Propagation on a Thin Wire Above Earth / R. G. Olsen, J. L. Young, D. C. Chang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2000. – Vol. 48, № 9. – P. 1413–1419.
15. Rhee, E. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem / E. Rhee, K. Changjae // Intern. J. of Software Engineering & Its Applications. – 2014. – Vol. 8, № 5. – P. 115–126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10.

В. І. ЩЕКА^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (066) 647 54 80, эл. почта shcheka_v@mail.ru, vm.dp.mail@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА РЕЛЬСОВЫЕ ЦЕПИ

Цель. В работе необходимо исследовать электромагнитные процессы в системе «контактная сеть-рельсы-земля» с целью обеспечения электромагнитной совместимости рельсовых цепей с системой тягового электроснабжения и, как следствие, повышения безопасности движения на железнодорожном транспорте. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы научного анализа, математического моделирования, экспериментального исследования, масштабного моделирования. **Результаты.** Проведенные теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что при исследовании элек-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

ромагнитных процессов в системе «контактная сеть-рельсы-земля» в диапазоне частот до 1 МГц можно считать, что рельсовая цепь (РЦ), как приемник помех, расположена в ближней зоне. Это позволяет говорить об электромагнитном поле помех как о стационарном и рассматривать его как совокупность двух составляющих (электрической и магнитной), каждая из которых имеет свой механизм воздействия на приемник. В результате исследования получена теоретическая и экспериментальная зависимость наведенной в проводе-приемнике электродвижущей силы (ЭДС) от частоты тока помехи. Получена частотная зависимость относительной погрешности по данным «теория-эксперимент». Доказана адекватность примененной математической модели экспериментальным данным по критерию Вилкоксона. **Научная новизна.** Результаты проведения экспериментального и теоретического исследований магнитного воздействия одного контура на другой дают совпадение в частотном диапазоне до 1000 Гц со средней относительной погрешностью 2,33 %. При увеличении частоты тока помехи наблюдается уверенный рост средней относительной погрешности между рассчитанными и измеренными значениями наведенной в проводе-приемнике ЭДС. **Практическая значимость.** Подтверждена адекватность математического аппарата полученным экспериментальным данным по критерию Вилкоксона на уровне значимости 5 %, что позволяет в диапазоне до 1000 Гц использовать примененный математический аппарат для исследования электромагнитных процессов в многопроводных линиях и в системе «контактная сеть-рельсы-земля» в частности. Полученные результаты могут быть полезными при проектировании, исследовании и обеспечении электромагнитной совместимости рельсовых цепей с системой тягового электроснабжения.

Ключевые слова: контактная сеть; рельсовые цепи; кондуктивное влияние; магнитное влияние; наведенная ЭДС

V. I. SHCHEKA^{1*}

^{1*}Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 647 54 80, e-mail shcheka_v@mail.ru, vm.dp.mail@gmail.com, ORCID 0000-0002-2184-2827

IMPACT MECHANISMS RESEARCH IN THE CONTACT NETWORK ON RAIL TRACK CIRCUITS

Purpose. Electromagnetic processes in «contact network-rails-earth» system should be researched for the purpose of electromagnetic compatibility rail circuits with traction power supply system providing and improving traffic safety on railway transport. **Methodology.** The methods of scientific analysis, mathematical modeling, experimental investigation, scale modeling have been applied to achieve this goal. **Findings.** Conducted theoretical and experimental investigations, indicate that electromagnetic processes in the «contact network-rails-earth» system in nearest zone in frequency range up to 1 MHz and it give us an opportunity to consider, that electromagnetic field of hindrance consists of two components: electric and magnetic. Each of them has its own mechanism to influence the rail circuits. In consequence of research the theoretical and experimental dependences of electromotive force induced in wire-receiver from the hindrance current frequency have been received. The frequency graph of relative error according to data «theory-experiment» has been received. The adequacy by Wilcoxon criterion of mathematical model to experimental data has been proved. **Originality.** The results of theoretical and experimental investigations of magnetic influence between two contours gives us a concurrence in frequency range up to 1000 Hz with average relative error 2, 33 %. With hindrance current frequency one can observe certain increasing the average relative error between calculated and measured values of electromotive force induced in the wire-receiver. **Practical value.** The adequacy by Wilcoxon criterion of mathematical model to experimental data has been proved on significance level 5 %. It gives an opportunity to use this mathematical apparatus for the investigation of electromagnetic processes in lines with plenty of wires and in «contact network-rails-earth» system in range up to 1000 Hz. The obtained results can be useful in designing, researching and providing electromagnetic compatibility of rail circuits with traction power supply system.

Keywords: contact network; rail circuits; conducted influence; magnetic influence; induced electromotive force

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

REFERENCES

1. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovместimost* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy kompleks Ministerstvo putey i soobshcheniy Publ., 2002. 638 p.
2. Zavgorodniy A.V. Sravnitelnyy analiz metodov rascheta impedansa liniy elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Comparative analysis of calculation methods of the impedance the of electrified railway lines]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy na zhelezno-dorozhnom transporte – Information and Control Systems on Railway Transport*, 2010, issue 2, pp. 49-53.
3. Markvardt K.G. *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [The power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
4. Romanov V.N., Komarov V.V. *Teoriya izmereniy. Analiz i obrabotka eksperimentalnykh dannykh* [Measurement theory. Analysis and processing of experimental data]. Saint-Petersburg, Severo-zapadnyy tekhnicheskii universitet Publ., 2002. 127 p.
5. Markvardt K.G. *Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog* [Handbook of railway power supply]. Moscow, Transport Publ., 1980-1981. 238 p.
6. Khabiger E., Kuzhekin I.P., Maksimova B.K. *Elektromagnitnaya sovместimost. Osnovy yeye obespecheniya v tekhnike* [Electromagnetic compatibility. The basics of it security in the technique]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 304 p.
7. Shcheka V.I., Romantsev I.O., Yashchuk K.I. Doslidzhennia vplyvu zvorotnoho tiahovoho strumu na rezhymy roboty tonalnykh reikovykh kil [The investigation of reverse traction current influence on tone track circuit modes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 24-28.
8. Shcheka V.I. Doslidzhennia mahnitnoho vplyvu elektrorukhomoho skladu na tonalni reikovi kola [Study of the magnetic influence of electric rolling stock on tonal track circuit]. *Tezy III mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Elektromahnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznychnomu transporti»* [Proc. of the III Intern. Sci. and Practical Conf. «Electromagnetic compatibility and safety in railway transport»]. 2010, pp. 52-53.
9. Shcheka V.I., Zavhorodnii O.V. Rozrobka systemy zakhystu reikovykh kil vid elektromahnitnoho vplyvu kontaktnei merezhi sumizhnoi kolii [The development of safety system for track circuits from electromagnetic influence in overhead system of adjacent track]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 156-160.
10. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell Systems Technical Journal*, 1926, vol. 5, issue 4, pp. 539-554. doi: 10.1002/j.1538-7305.1926.tb00122.x.
11. Gavriluk V., Zavgorodnij A., Myrgorodska A. Computer simulation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonic. *Archives of Transport System Telematics*, 2009, vol. 2, issue 1, pp. 33-37.
12. Mohamed F.P., Siew W.H., Liu K.Y. A novel approach in the measurement of high frequency disturbances from very large electrical systems. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2014, vol. 3, issue 2, pp. 46-50. doi: 10.1109/MEMC.2014.6849543.
13. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways: Analysis and Management*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2013. 528 p.
14. Olsen R.G., Young J.L., Chang D.C. Electromagnetic Wave Propagation on a Thin Wire Above Earth. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, vol. 48, no. 9, pp. 1413-1419.
15. Rhee E., Changjae K. Electromagnetic Compatibility Analysis for the Railway Telecommunication Intra-subsystem. *International Journal of Software Engineering & Its Applications*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 115–126. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.5.10.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Україна); д.фіз.-мат.н., проф. О. В. Коваленком (Україна)

Надійшла до редколегії 23.03.2015

Прийнята до друку 14.06.2015

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 656.212.5(23.01)

A. S. DOROSH^{1*}

^{1*}Dep. «Stations and Junctions», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 927 84 62, e-mail dorosh_as@mail.ru, ORCID 0000-0002-5393-0004

DETERMINATION OF BRAKING OPTIMAL MODE OF CONTROLLED CUT OF DESIGN GROUP

Purpose. The application of automation systems of breaking up process on the gravity hump is the efficiency improvement of their operation, absolute provision of trains breaking up safety demands, as well as improvement of hump staff working conditions. One of the main tasks of the indicated systems is the assurance of cuts reliable separation at all elements of their rolling route to the classification track. This task is a sophisticated optimization problem and has not received a final decision. Therefore, the task of determining the cuts braking mode is quite relevant. The purpose of this research is to find the optimal braking mode of control cut of design group. **Methodology.** In order to achieve the purpose is offered to use the direct search methods in the work, namely the Box complex method. This method does not require smoothness of the objective function, takes into account its limitations and does not require calculation of the function derivatives, and uses only its value. **Findings.** Using the Box method was developed iterative procedure for determining the control cut optimal braking mode of design group. The procedure maximizes the smallest controlled time interval in the group. To evaluate the effectiveness of designed procedure the series of simulation experiments of determining the control cut braking mode of design group was performed. The results confirmed the efficiency of the developed optimization procedure. **Originality.** The author formalized the task of optimizing control cut braking mode of design group, taking into account the cuts separation of design group at all elements (switches, retarders) during cuts rolling to the classification track. The problem of determining the optimal control cut braking mode of design group was solved. The developed braking mode ensures cuts reliable separation of the group not only at the switches but at the retarders of brake position. **Practical value.** The developed procedure can be successfully used to determine the optimal braking modes of cuts in automation systems of trains breaking up on the gravity humps.

Keywords: marshalling yard; gravity hump; braking mode; cut; Box method

Introduction

The control of trains breaking up on gravity humps is quite complex mathematical and technical problem, which is characterized by a high degree of responsiveness, the insufficiency or the absence of accurate information about the controlled object, the impossibility of formalizing all random factors and processes.

The main direction of the gravity humps effi-

ciency improvement is automation of trains breaking up process [19]. One of the most important and difficult tasks of trains breaking up process control in automatic mode is to determine the braking modes (BM) of trains cut, which provide the best conditions of separation on separating elements (switches and retarders) and the fulfillment requirements of target regulation of rolling speed of cuts [16-18]. A number of scientific papers were devoted to solve the optimization task; however, as

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

a rule, design basic group is considered as a group of three cuts with controlled medium cut. In work [7] the objective function of optimization problem of controlled cut breaking mode of the design group in the following form

$$\min\{\delta t_{12}, \delta t_{23}\} \rightarrow \max, \quad (1)$$

where $\delta t_{12}, \delta t_{23}$ – intervals on switches, respectively, in the first and second cut pairs of design group.

To solve the problem of optimization for criterion (1) in the work [5] the author proposed to use gradient methods. However, the use of gradient methods for solving the problem (1) requires its transformation into smooth function, which greatly complicates the optimization process. In the work [2] was proposed more universal method to optimize braking modes not only for the design group of cuts, but the train as a whole. But, first of all, this method is quite complicated and unmanageable, and secondly, does not always provide the required accuracy solution, because the objective function in this problem is not smooth. To address these shortcomings in work [4] solving the optimization problem of train cut BM was made with using iterative method. This method allows determining before the trains breaking up such cuts BM at which intervals on the switches in all cut pairs, including non-adjacent, take the maximum value [3].

However, the typical shortcomings of methods [2-5, 7] are optimization problem solving of cuts BM in the determined formulation. Completed researches [11] showed that the influence of random factors and inaccurate information complicate the definition of rational cuts BM at train breaking up. In this regard, in [9, 10] optimization of cuts interval speed control is proposed to do on the base of the criterion of the minimal risk of undivided cuts on switches. This approach allows solving the optimization problem of cuts BM at stochastic rolling conditions, which gives an opportunity to take into account the influence of random factors in the process of trains breaking up on the hump. The problem definition of cut BM in the proposed [9, 10] criterion is solved in [8]; with the resulting profiles ensure minimum value windows on the sorting tracks and minimal risk of undivided cut on the switches at a given level safety sorting process.

The given analysis of scientific papers showed that optimization of cuts BM is done in case of

their reliable separation only on the switches; thus cuts separating on the retarder of hump are not included, or considered as restriction [12], which does not maximize the quality of regulation interval on all separating elements of humps. Moreover, given in [12] method of searching these restrictions is quite complex and requires for its implementation the use of simulation and regression analysis, which in turn complicates the application of the technique in automation trains breaking up systems on the hump.

The authors in work [6] noted that the optimization of the braking cut of the design group should be considered not only at intervals separating switches and in the first retarder of the first (FBP) and second (SBP) brake position. This approach in solving the optimization problem of BM will improve the quality of interval regulation at all separating elements of hump and, therefore, the safety of the trains breaking up process.

Purpose

The aim of this work is to solve the optimization problem of the design group braking cut based on the intervals between switches and retarders of brake positions.

Methodology

The braking mode $U(U', U'')$ of design group controlled cut is characterized by its set speed out of the FBP and SBP respectively U' and U'' .

The task of optimizing braking mode U of controlled cut of the group is to find such a mode, which ensures reliable separation of all group cuts both at the switches, and at the retarders of FBP and SBP. At this regard, the best for controlled cut is the braking mode U , in which the smallest of intervals in the group reaches its maximum:

$$f = \min\{\delta t_{12}(U), \delta t_{23}(U), \delta t_{12}^{VGP}(U), \delta t_{12}^{SGP}(U), \delta t_{23}^{VGP}(U), \delta t_{23}^{SGP}(U)\} \rightarrow \max, \\ \text{At } U \in \Omega \quad (2)$$

where $\delta t^{VGP}, \delta t^{SGP}$ – the interval between adjacent cut on the first retarder of FBP and SBP respectively; Ω – the domain of permissible speeds (DPS) of cuts coming out of FBP and SBP.

It should be noted that the number of variables

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

in (2) depends not only on cut routes of the group, but also the relative position of switches and brake positions scheme at the gravity hump.

In [6] is found that for hump necks with 4 beams of classification tracks exists 9 characteristic destination track combinations and accordingly, separating switches to groups of 3 cuts, which differ in the number and placement of separating elements on FBP and SBP and respectively, the number of intervals of objective function (2).

Thus, according to [6], the number of intervals in the group can vary from 2 to 6, due to the lack of separation cut on FBP and (or) on the SBP under certain combinations of routes of their movement. Moreover, at the same time, conditions may vary and adjustment intervals between cuts – interval can be unregulated, can depend only on the braking on FBP or breaking on both positions – FBP and SBP. These features greatly complicate solving the optimization problem of controlled cut braking mode of the design group.

The objective function (2) is an undifferentiated, plain and nonlinear function, while its derivatives have discontinuities at the points where

$\delta t_i = \delta t_j, i \neq j$. Taking into account these characteristics to solve the optimization problem (2) should be used methods of direct search (zero-order) as they do not require smoothness and derivatives calculation of the objective function, and use only its value. In this paper, to solve the problem (2) was used the complex Box method [15]. The minimum function search is performed with the help of dots set moving to the direction of its minimizing within the restriction region. As the indicated method minimizes the objective function, therefore, the sign of the objective function f was changed to $-f$.

The complex Box method provides a sequential selection of k random points, which form the set. The number of such points is $k = 2n$, where n – the dimension of the problem. As braking mode of cut is presented with speeds U' and U'' , the dimension of the problem is $n = 2$. In general, the optimization procedure of the separate cut braking mode using the Box method can be represented in the form of an iterative scheme, which is shown on Figure 1.

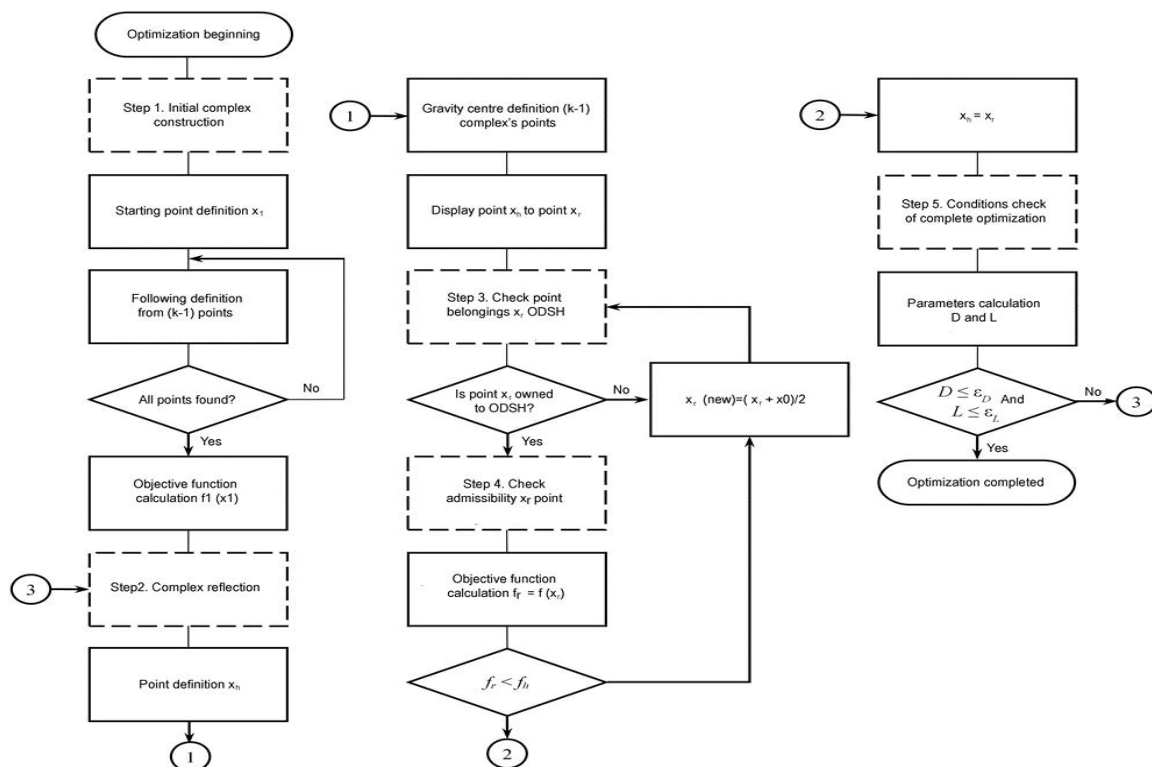


Fig. 1. Optimization procedure of controlled cut braking mode using Box method

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Step 1. In the first step of the optimization procedure it is necessary to obtain the set with k points. In turn each point of the set $\mathbf{x}_i$ is characterized by the following parameters U'_i, U''_i , the value of which is defined by the formulas

$$U'_i = U'_{i,\min} + r_i(U'_{i,\max} - U'_{i,\min}),$$

$$U''_i = f(U'_i) = U''_{i,\min} + r_i(U''_{i,\max} - U''_{i,\min}),$$

where i – point number of the set, $i=1, 2, \dots, k$; r_i – random numbers, uniformly distributed in the interval $[0;1]$; $U'_{i,\min}, U'_{i,\max}$ – the minimum and maximum coming out speed of cut from FBP (SBP), which is determined by its DPS (see Fig. 2).

It is essential to note that all points of initial set are acceptable, as determined within DPS. In each of the k set points is determined by the value of objective function $f_i(\mathbf{x}_i)$.

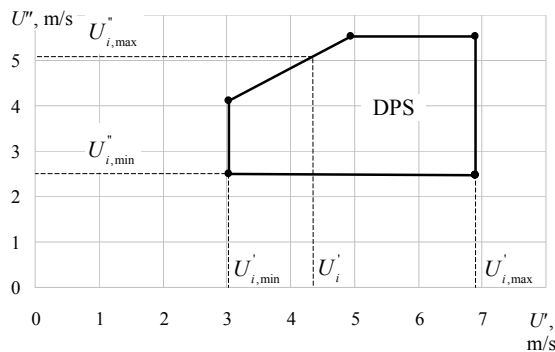


Fig. 2. Determining of U'_i, U''_i in DPS of controlled cut

Step 2. Selected point $\mathbf{x}_h$ with the largest value of the function $f(\mathbf{x})$, that is

$$f_h = f(\mathbf{x}_h) = \max\{f_1, f_2, \dots, f_k\},$$

and it is eliminated.

The new set point $\mathbf{x}_r$ is determined by the point reflection $\mathbf{x}_h$ through the center of gravity $\mathbf{x}_0$ the other $k-1$ points

$$\mathbf{x}_r = (1 + \alpha)\mathbf{x}_0 - \alpha\mathbf{x}_h,$$

where α – the empirical reflection coefficient (according to [14] accepted $\alpha=1,3$).

In turn, the gravity center of $k-1$ set points is

determined by the formula

$$\mathbf{x}_0 = \frac{1}{k-1} \left(\sum_{i=1}^k \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_h \right).$$

Step 3. In this step the point $\mathbf{x}_r$ is checked to the identity to the domain of cuts exit permissible speed from FBP and SBP. To perform this verification the computational geometry method [13] is used, which is based on the position checking of the $\mathbf{x}_r$ in respect of each DPS sides.

If the point $\mathbf{x}_r$ does not belong DPS, it is moved on the half of the distance between $\mathbf{x}_r$ and $\mathbf{x}_0$, that is

$$\mathbf{x}_r(\text{new}) = \frac{(\mathbf{x}_r + \mathbf{x}_0)}{2} \quad (3)$$

After this re-check of the $\mathbf{x}_r$ identity to DPS is done; this step is performed until reception of acceptable point $\mathbf{x}_r$.

Step 4. In this step, the check of the point $\mathbf{x}_r$ validity is performed. The value of the function $f_r = f(\mathbf{x}_r)$ is calculated and compared with f_h . If $f_r < f_h$ (the improvement of the objective function), the point $\mathbf{x}_r$ replaces point $\mathbf{x}_h$ and go to step 5.

In case if $f_r > f_h$, that is “worse” than the largest value, which was obtained earlier, the point $\mathbf{x}_r$ is shifted to the center $\mathbf{x}_0$ on the half of the distance between them by the formula (3), and the calculation process returns to step 3. The above procedure is performed until the condition $f_r < f_h$ is met.

Step 5. This step involves checking the conditions of optimization completion. For this purpose the dispersion D calculation is performed for k values of the objective function and the distance L between the points of the set $\mathbf{x}_i$ and their gravity center $\mathbf{x}_0$:

$$D = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (f(\mathbf{x}_i) - \bar{f})^2,$$

$$L = \sum_{i=1}^k (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0)^2.$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

The optimization process is completed if $D \leq \varepsilon_D$ і $L \leq \varepsilon_L$ ($\varepsilon_D, \varepsilon_L$ – permissible error solution), otherwise, proceed to step 2 and repeat the optimization process.

Findings

To check the developed optimization procedure effectiveness of the braking mode of design group cut was performed series of experiments. In particular, the optimization task of braking mode of the medium cut of design group (hard-rolling cut (HRC₁)-easy-rolling cut (ERC₂)-hard-rolling cut (HRC₃)) at various combinations of rolling routes was solved; while, for comparison, the optimization was performed using two methods.

In the first method, which was developed in this work, search of the best braking mode was performed on the base of criterion (2) and the second method proposed in [12] involves intervals maximization between cuts of the group only on the switches. The results of the optimization using two methods are given in Table. 1.

As the table shows, using the second method set breaking mode provides maximum and equal intervals on the switches, but it leads to a significant reduction some of them (comb. 7). At the same time, the first method allows to increase the intervals value not only on the switches but on retarders of FBP and SBP (comb. 2-4, 7), which, in turn, reduces the fail risk of cuts non-separation under conditions of performance error of their set braking modes [1].

Table 1

The results of optimization the braking mode of the medium cut of group HRC₁-ERC₂-HRC₃

Comb	σ_1	σ_2	Method	U' , m/s	U'' , m/s	δt_{12} , s	δt_{12}^{FBP} , s	δt_{12}^{SBP} , s	δt_{23} , s	δt_{23}^{FBP} , s	δt_{23}^{SBP} , s
1	1	1	1	~	~	2,27	—	—	4,23	—	—
			2	~	~	2,27	—	—	4,23	—	—
2	1	2	1	6,90	3,15	2,27	—	—	8,10	6,37	—
			2	3,43	4,40	2,27	—	—	2,28	5,91	—
3	1	5	1	6,90	5,19	2,27	—	—	9,35	6,37	8,68
			2	4,21	4,99	2,27	—	—	2,27	5,91	2,45
4	2	1	1	3,03	3,79	5,60	2,45	—	4,23	—	—
			2	4,60	2,50	4,23	2,45	—	4,23	—	—
5	2	2	1	4,43	2,86	4,39	2,45	—	4,39	5,91	—
			2	4,44	5,16	4,38	2,45	—	4,39	5,91	—
6	2	5	1	4,72	5,36	4,12	2,45	—	5,38	5,91	4,12
			2	4,53	5,23	4,29	2,45	—	4,30	5,91	3,55
7	5	1	1	3,03	3,79	17,67	2,45	9,77	4,23	—	—
			2	6,90	4,27	4,23	2,45	1,23	4,23	—	—
8	5	2	1	4,79	3,39	14,62	2,45	5,02	5,02	5,91	—
			2	6,90	3,46	8,08	2,45	1,23	8,10	6,37	—
9	5	5	1	4,96	5,36	4,65	2,45	4,65	5,91	5,91	4,65
			2	4,70	5,36	5,27	2,45	5,20	5,28	5,91	4,06

Note:

«~» – unspecified braking mode

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Originality and practical value

The scientific novelty of this work is in the procedures development of the controlled cut braking mode optimization of the design group, which ensures the best conditions of cut separation both on the switches and retarders of hump rolling down part.

Developed procedure can be used to solve the problem of process control of cut rolling on the automated gravity humps.

Conclusions

1. Formalized optimization problem of controlled cut braking mode of the design group taking into account the group cuts separation on the switches and brake position retarders. This approach allows providing reliable group cuts separation on all elements (switches, retarders) during their rolling to the classification tracks.

2. Developed the iterative optimization process of controlled cut braking mode of the group using Box method. The experiments results analysis showed that the method is quite effective and can be successfully used to solve multi-objective problem of cuts braking mode optimization of train, which is broken-up on gravity hump.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бобровский, В. И. Дослідження впливу параметрів керування уповільнювачами на точність гальмування відцепів / В. И. Бобровский, А. С. Дорош // Зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна «Трансп. системи та технології перевезень». – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 6. – С. 10–14.
2. Бобровский, В. И. Многошаговый двухэтапный метод оптимизации режимов роспуска составов на горках / В. И. Бобровский // Информ.-управляющие системы на ж.-д. TRANSP. – 2004. – № 2. – С. 8–14.
3. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов расформирования составов на сортировочных горках / В. И. Бобровский, А. В. Кудряшов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 32. – С. 224–229.
4. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов регулирования скорости отцепов при роспуске составов на горках / В. И. Бобровский, Н. В. Рогов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 4. – С. 174–182.
5. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках / В. И. Бобровский // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2000. – С. 43–47.
6. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов расчетной группы состава / В. И. Бобровский, А. С. Дорош // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 1 (43). – С. 103–112. doi: 10.15802/stp2013/9582.
7. Бобровский, В. И. Поиск оптимальных режимов торможения на проектируемых сортировочных горках / В. И. Бобровский // Информ.-управл. системы на ж.-д. транспорте. – 1999. – № 5. – С. 50–54.
8. Козаченко, Д. М. Ефективні режими гальмування відцепів на сортувальних гірках / Д. М. Козаченко // Зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна «Трансп. системи та технології перевезень». – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 2. – С. 55–59.
9. Козаченко, Д. Н. Исследование условий интервального регулирования скорости скатывания отцепов на автоматизированных горках / Д. Н. Козаченко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 46–50.
10. Козаченко, Д. Н. Критерий оптимизации режимов торможения отцепов расчетной группы в условиях действия случайных факторов / Д. Н. Козаченко // Зб. наук. пр. Донецького ін-ту залізн. трансп. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Донецьк, 2010. – Вип. 23. – С. 14–21.
11. Козаченко, Д. М. Моделювання роботи сортувальної гірки в умовах невизначеності параметрів відцепів та характеристик навколишнього середовища / Д. М. Козаченко, М. І. Березовий, О. І. Таранець // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 16. – С. 73–76.
12. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко [и др.]. – Днепропетровск : Маковецкий, 2010. – 260 с.
13. Препарата, Ф. Вычислительная геометрия: Введение : монография / Ф. Препарата, М. Шеймос. – Москва : Мир, 1989. – 478 с.
14. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике : В двух кн. Кн. 1. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – Москва : Мир, 1986. – 349 с.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

15. Box, M. J. A new method of constrained optimization and a comparison with other methods / M. J. Box // The Computer J. – 1965. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 42–52. doi: 10.1093/comjnl/8.1.42.
16. Ning, H. Discussion on Hump Rolling Vehicle Speed Control Problem / H. Ning, L. Xinghan // Retarders & Speed Control Technology. – 2011. – Iss. 3. – P. 9–16.
17. Shengjun, F. Research on Application of Braking Retarder Speed Control System / F. Shengjun // Retarders & Speed Control Technology. – 2012. – Iss. 4. – P. 11–16.
18. Tian-ming, M. The Research of Hump Retarder Assistant Speed Control System / M. Tian-ming, Z. Lian-xiang // Retarders & Speed Control Technology. – 2011. – Iss. 1. – P. 1–7.
19. Zářecký, S. The newest trends in marshalling yards automation / S. Zářecký, J. Grůň, J. Žilka // Transport problems. – 2008. – T. 3. – Vol. 4. – Part 1. – P. 87–95.

А. С. ДОРОШ^{1*}

^{1*}Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (066) 927 84 62, эл. почта dorosh_as@mail.ru, ORCID – 0000-0002-5393-0004

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ТОРМОЖЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОТЦЕПА РАСЧЕТНОЙ ГРУППЫ

Цель. Внедрение систем автоматизации процесса расформирования составов на сортировочных горках направлено в основном на повышение эффективности их функционирования, безусловное обеспечение требований безопасности роспуска составов, а также улучшение условий труда персонала горки. Одна из основных задач указанных систем – обеспечение надежного разделения отцепов состава на всех элементах по маршруту их скатывания на пути сортировочного парка, которая является достаточно сложной оптимизационной задачей и не получила окончательного решения. Поэтому, задача определения режимов торможения отцепов состава является достаточно актуальной. Целью данной работы является поиск оптимального режима торможения управляемого отцепа расчетной группы. **Методика.** Для достижения поставленной в работе цели предлагается использовать прямые методы поиска, а именно – комплексный метод Бокса. Данный метод не требует гладкости целевой функции, учитывает ее ограничения, а также не требует расчета производных функции, а использует только ее значение. **Результаты.** С использованием метода Бокса была разработана итерационная процедура определения оптимального режима торможения управляемого отцепа расчетной группы, которая позволяет максимизировать наименьший из управляемых интервалов в группе. Для оценки эффективности разработанной процедуры проведен ряд имитационных экспериментов по определению режима торможения управляемого отцепа расчетной группы. Полученные результаты подтвердили эффективность разработанной процедуры оптимизации. **Научная новизна.** Автором была формализована задача оптимизации режима торможения управляемого отцепа расчетной группы с учетом разделения отцепов группы на всех элементах (стрелках, замедлителях) при их скатывании на сортировочные пути. Решена задача поиска оптимального режима торможения управляемого отцепа группы, при котором обеспечивается надежное разделение отцепов группы не только на стрелочных переводах, а и на замедлителях тормозных позиций спускной части горки. **Практическая значимость.** Разработанная процедура может быть успешно использована при поиске оптимальных режимов торможения отцепов в системах автоматизации расформирования составов на сортировочных горках.

Ключевые слова: сортировочная горка; режим торможения; отцеп; комплексный метод Бокса

А. С. ДОРОШ^{1*}

^{1*}Каф. «Станції та вузли», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (066) 927 84 62, ел. пошта dorosh_as@mail.ru, ORCID-0000-0002-5393-0004

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ ГАЛЬМУВАННЯ КЕРОВАНОГО ВІДЧЕПА РОЗРАХУНКОВОЇ ГРУПИ

Мета. Впровадження систем автоматизації процесу розформування составів на сортувальних гірках спрямоване в основному на підвищення ефективності їх функціонування, безумовне забезпечення вимог безпеки розпуску составів, а також покращення умов праці персоналу гірки. Одна із основних задач вказаних систем – забезпечення надійного розділення відцепів состава на всіх елементах маршруту їх скочування на колії сортувального парку, яка є досить складною оптимізаційною задачею і не отримала остаточного вирішення. Тому задача визначення режимів гальмування відцепів состава достатньо актуальна. Метою даної роботи є пошук оптимального режиму гальмування керованого відчепа розрахункової групи. **Методика.** Для досягнення поставленої у роботі мети пропонується використовувати прямі методи пошуку, а саме – комплексний метод Бокса. Даний метод не вимагає гладкості цільової функції, враховує її обмеження, а також не потребує розрахунку похідних функції, а використовує лише її значення. **Результати.** З використанням метода Бокса було розроблено ітераційну процедуру визначення оптимального режиму гальмування керованого відчепа розрахункової групи, яка дозволяє максимізувати найменший із керованих інтервалів у групі. Для оцінки ефективності розробленої процедури проведено ряд імітаційних експериментів із визначення режиму гальмування керованого відчепа розрахункової групи. Отримані результати підтвердили ефективність розробленої процедури оптимізації. **Наукова новизна.** Автором була формалізована задача оптимізації режиму гальмування керованого відчепа розрахункової групи з урахуванням розділення відцепів групи на всіх елементах (стрілках, уповільнювачах) при їх скочуванні на колії сортувального парку. Вирішено задачу пошуку оптимального режиму гальмування керованого відчепа групи, при якому забезпечується надійне розділення відцепів групи не лише на стрілочних переводах, а й на уповільнювачах гальмових позицій спускної частини гірки. **Практична значимість.** Розроблена процедура може бути успішно використана при визначенні оптимальних режимів гальмування відцепів у системах автоматизації розформування составів на сортувальних гірках.

Ключові слова: сортувальна гірка; режим гальмування; відцеп; комплексний метод Бокса

REFERENCES

1. Bobrovskiy V.I., Dorosh A.S. Doslidzhennia vplyvu parametriv keruvannia upovilniuvachamy na tochnist halmuvannia vidchepiv [The impact study of control parameters by retarders on the accuracy of cut braking]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana «Transportni systemy ta tekhnolohii perevezhen»* [Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan «Transport Systems and Transport Technologies»], 2013, issue 6, pp. 10-14.
2. Bobrovskiy V.I. Mnogoshagovyy dvukhetapnyy metod optimizatsii rezhimov rospuska sostavov na gorkakh [Multistage two-stage method of modes optimization of rolling stock dissolution on the humps]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy na zheleznodorozhnom transporte – Information Management Systems on Railway Transport*, 2004, no. 2, pp. 8-14.
3. Bobrovskiy V.I., Kudryashov A.V. Optimizatsiya rezhimov rasformirovaniya sostavov na sortirovochnykh gorkakh [Optimization of modes of dissolution of the compositions on humps]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 32, pp. 224-229.
4. Bobrovskiy V.I., Rogov N.V. Optimizatsiya rezhimov regulirovaniya shkorosti ottsepov pri rospuske sostavov na gorkakh [Regulating methods optimization of the cuts speed at dissolution of the rolling stock on sorting humps]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2004, issue 4, pp. 174-182.
5. Bobrovskiy V.I. Optimizatsiya rezhimov tormozheniya ottsepov na sortirovochnykh gorkakh [Optimization of the cuts braking modes on sorting humps]. *Transport: Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Transport: Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan], 2000, pp. 43-47.
6. Bobrovskiy V.I., Dorosh A.S. Optimizatsiya rezhimov tormozheniya ottsepov raschetnoy gruppy sostava [The optimization of retarding regimes within the particular group of cuts]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk*

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 1 (43), pp. 103-112. doi: 10.15802/stp2013/9582.
7. Bobrovskiy V.I. Poisk optimalnykh rezhimov tormozheniya na proyektiruyemykh sortiurovochnykh gorkakh [The search for optimal braking modes on projected sorting humps]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy na zheleznodorozhnom transporte – Information and Control Systems on Railway Transport*, 1999, no. 5, pp. 50-54.
 8. Kozachenko D.M. Efektyvni rezhimy halmuvannia vidchepiv na sortuvalnykh hirkakh [Effective braking modes of cuts on sorting humps]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana «Transportni systemy ta tekhnologii perevezen»* [Proc. of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan «Transport Systems and Transport Technologies»], 2011, issue 2, pp. 55-59.
 9. Kozachenko D.N. Issledovaniye usloviy intervalnogo regulirovaniya skorosti skatyvaniya ottsepov na avtomatizirovannykh gorkakh [Studies of the conditions of the interval speed control rolling unhook on automated slides]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 46-50.
 10. Kozachenko D.N. Kriteriy optimizatsii rezhimov tormozheniya ottsepov raschetnoy gruppy v usloviyakh deystviya sluchaynykh faktorov [The optimization criterion of cuts braking modes of accounting group in the action conditions of random factors]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu* [Proc. of Donetsk Railway Transport Institute of Ukrainian State Academy of Railway Transport], Donetsk, 2010, issue 23, pp. 14-21.
 11. Kozachenko D.M., Berezovyi M.I., Taranets O.I. Modeliuvannia roboty sortuvalnoi hirkly v umovakh nevyznachenosti parametriv vidchepiv ta kharakterystyk navkolyshnoho seredovyscha [Work modeling of a hump in the uncertainty conditions of the cut parameters and environment characteristics]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 16, pp. 73-76.
 12. Bobrovskiy V.I., Kozachenko D.N., Bozhko N.P. *Optimizatsiya rezhimov tormozheniya ottsepov na sortiurovochnykh gorkakh* [Optimisation of cut braking modes on sorting humps]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2010. 260 p.
 13. Preparata F., Sheymos M. *Vychislitel'naya geometriya: Vvedeniye* [Computational geometry: Introduction]. Moscow, Mir Publ., 1989. 478 p.
 14. Rekleytis G., Reyvindran A., Regsdel K. *Optimizatsiya v tekhnike* [Optimization in techniques]. Moscow, Mir Publ., 1986. Book 1. 349 p.
 15. Box M.J. A new method of constrained optimization and a comparison with other methods. *The Computer Journal*, 1965, vol. 8, issue 1, pp. 42-52. doi: 10.1093/comjnl/8.1.42.
 16. Ning H., Xinghan L. Discussion on Hump Rolling Vehicle Speed Control Problem. *Retarders & Speed Control Technology*, 2011, issue 3, pp. 9-16.
 17. Shengjun F. Research on Application of Braking Retarder Speed Control System. *Retarders & Speed Control Technology*, 2012, issue 4, pp. 11-16.
 18. Tian-ming M., Lian-xiang Z. The Research of Hump Retarder Assistant Speed Control System. *Retarders & Speed Control Technology*, 2011, issue 1, pp. 1-7.
 19. Zářecký S., Grůň J., Žilka J. The newest trends in marshalling yards automation. *Transport problems*, 2008, tom 3, vol. 4, part 1, pp. 87-95.

Prof. D. M. Kozachenko, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. T. V. Butko, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published

Received: March 30, 2015

Accepted: June 13, 2015

УДК 656.225.073

Д. Н. КОЗАЧЕНКО^{1*}, А. И. ВЕРЛАН^{2*}, А. В. ГОРБОВА^{3*}

^{1*}Научно-исследовательская часть, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта kozachenko@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}ООО с ИИ «Трансінвестсервіс», ул. Чапаева, 50, с. Визирка, Одесская обл., Украина, 67543, тел. +38 (0482) 30 07 24, эл. почта averlan@tis.ua, ORCID 0000-0001-7855-8942

^{3*}Научно-исследовательская часть, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 90 59, эл. почта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ОБЪЕМОВ РАБОТ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Цель. Статья направлена на совершенствование методов оценки неравномерности грузовых перевозок и определения расчетных объемов работ для железнодорожных станций и подъездных путей промышленных предприятий. **Методика.** В качестве методов исследования для оценки расчетных объемов грузопотоков и грузенных вагонопотоков использованы методы математической статистики, в частности, методы анализа временных рядов; для оценки расчетных объемов порожних вагонопотоков применялись методы математического моделирования. **Результаты.** Расчетные объемы работы магистральных и промышленных железнодорожных станций определяются с учетом месячной и суточной неравномерности. Месячную неравномерность предлагается оценивать по отношению к тренду показателя за последние 3–5 лет, построенного с использованием метода взвешенной скользящей средней. В качестве расчетного периода для оценки суточной неравномерности предлагается использовать 30-ти дневный период в предыдущем году с наибольшим суммарным объемом работ. Размеры расчетных порожних вагонопотоков предлагается определять на основании грузенных вагонопотоков с матрицей вероятности использования вагонов под двоякие операции. Выполнена проверка предлагаемого метода путем расчета объемов работ для 2014 года по данным предшествующих временных периодов. Результаты проверки показали, что предлагаемый метод, по сравнению с традиционным, обеспечивает более высокую устойчивость результатов при изменении временных периодов, используемых для анализа, а также более точную оценку расчетных объемов работы. **Научная новизна.** Авторами усовершенствованы методы определения расчетных объемов работы для железнодорожных станций за счет использования методов анализа временных рядов. **Практическая значимость.** Предложенная методика позволяет более точно оценить перспективные объемы работы и, за счет этого, снизить величину капитальных расходов, связанных с развитием станций, и эксплуатационных расходов, связанных с их функционированием. Методика также может быть использована при совершенствовании нормативных и методических документов, регламентирующих проектирование и разработку технологических процессов работы магистральных и промышленных железнодорожных станций.

Ключевые слова: железнодорожная станция; неравномерность перевозок; временные ряды; проектирование железнодорожных станций; технологический процесс

Введение

Под воздействием разнообразных факторов в социальной и экономической сфере страны с течением времени происходят изменения направлений, характера и объемов грузопотоков, что отражается на объемах работы магистральных железнодорожных станций и подъездных путей промышленных предприятий. В этой связи возникает необходимость проверки соответ-

ствия технического оснащения железнодорожных станций существующим и прогнозным объемам работы. Для выполнения этой процедуры используются различные методы аналитического, графического, графоаналитического, имитационного моделирования [4, 16]. Необходимым этапом такой проверки является определение расчетных объемов работ. Учитывая, что на условия работы станций влияет значительное число случайных факторов, то их тех-

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ническое оснащение должно иметь резервы мощности для погашения пиковых нагрузок, возникающих из-за неравномерности перевозок.

Процедура определения загрузки основных элементов станций является элементом разработки их технологических процессов. В [9] указано, что данная проверка выполняется на предусмотренные в графике движения размеры перевозок. При этом размеры движения поездов в последнем устанавливаются путем умножения среднесуточного числа грузовых поездов по плану на коэффициент неравномерности и прибавления к полученному произведению планового числа хозяйственных и пассажирских поездов.

В [15] требуемую пропускную способность при построении графиков движения поездов предлагается определять по формуле

$$N_{\Pi} = N_{\text{гр}} k_{\text{н}} + N_{\text{сьема}} + N_{\text{гр}}^{\text{рез}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{гр}}$ – среднесуточное за год число грузовых поездов; $k_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий необходимый резерв для обеспечения сезонных размеров движения; $N_{\text{сьема}}$ – дополнительная пропускная способность, необходимая для пропуска пассажирских, сборных, ускоренных грузовых поездов; $N_{\text{гр}}^{\text{рез}}$ – резерв потребной пропускной способности, учитывающий суточные колебания размеров движения грузовых поездов.

Величина данного резерва определяется по формуле

$$N_{\text{гр}}^{\text{рез}} = \frac{z\sigma}{m}, \quad (2)$$

где z – коэффициент, учитывающий число средних квадратических отклонений; σ – среднее квадратическое отклонение грузового вагонного потока от его среднесуточных за год размеров, ваг; m – состав поезда.

При выполнении проектных работ в соответствии с [10] требуемая пропускная и перерабатывающая способность станций должна устанавливаться по размерам пассажиро- и грузооборота, определяемым на основании экономических изысканий с учетом неравномерности перевозок по месяцам, а также с учетом коэф-

фициента, учитывающего технологические перерывы и необходимый резерв для обеспечения внутрисуточных колебаний размеров движения поездов.

Учет неравномерности перевозок при проектировании железнодорожных станций выполняется с помощью коэффициентов неравномерности.

В [10] указано, что показателем неравномерности перевозок является коэффициент внутригодовой неравномерности, который определяется по формуле

$$\gamma = \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где $M_{\text{н}}$ – наибольший месячный грузопоток, тыс. т; $M_{\text{ср}}$ – среднемесячный грузопоток, тыс. т.

В соответствии с [12] пропускная и провозная способность промышленного транспорта и его стационарных объектов, определяемых на расчетный срок, должна соответствовать расчетному объему перевозок (с учетом их неравномерности по месяцам, а при необходимости – и сезонности) и иметь резерв не менее 15 %. При проектировании промышленного транспорта, непосредственно обеспечивающего функционирование технологических процессов, не допускающих остановки или длительного перерыва, резерв мощности транспортных сооружений допускается принимать до 100 %.

При проектировании подъездных путей электростанций в соответствии с [7] развитие железнодорожных станций должно соответствовать проектной мощности электростанции с учетом коэффициента неравномерности 1,2.

В [8] приведено выражение для определения коэффициента неравномерности немаршрутизированных вагонопотоков по прибытию

$$K_{\text{н}} = 1 + \frac{2(N_{\text{макс}} - N_{\text{мин}})}{3(N_{\text{макс}} + N_{\text{мин}})}, \quad (4)$$

где $N_{\text{макс}}$ – максимальный размер суточной выгрузки за год, вагонов в сутки; $N_{\text{мин}}$ – среднесуточная выгрузка для месяца, в котором она была минимальной, вагонов в сутки.

Коэффициенты неравномерности также используются при проектировании различных

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

транспортных зданий и сооружений.

При проектировании грузовых складов и фронтов погрузочно-выгрузочных работ в [10] рекомендуется устанавливать коэффициенты неравномерности для промежуточных станций в зависимости от суточного вагонооборота 1,2–1,7, а для более крупных станций – 1,1–1,2.

Проектирование зданий пассажирских вокзалов предполагает использование коэффициента неравномерности, учитывающего отношение среднесуточного потока отправления пассажиров за пиковый период к среднесуточному потоку отправления за год [11]. В частности для речных вокзалов коэффициент неравномерности отправления пассажиров определяется как

$$K_1 = K_m K_{\text{сут}}, \quad (5)$$

где K_m – коэффициент месячной неравномерности за летний период (июнь–август); $K_{\text{сут}}$ – коэффициент суточной неравномерности в месяц максимального пассажиропотока, равный отношению среднего количества отправляемых пассажиров за 5–10 суток наибольшего пассажиропотока к среднесуточному отпавлению за данный месяц.

Для морских вокзалов коэффициент неравномерности отправления пассажиров определяется как отношение наибольшего месячного отправления к среднему за период навигации.

Таким образом, в нормативной литературе коэффициент неравномерности рассматривается как отношение значения показателя в пиковый период к среднему значению этого показателя. Данный показатель определяется на основании предшествующего периода, либо принимается в соответствии с нормативной литературой.

Основными нормативными документами, регламентирующими оценку неравномерности в грузовом движении являются [8, 10, 12].

Анализ выражения (4) показывает, что его предельное значение не может превышать 1,67, что не соответствует оценке фактических коэффициентов неравномерности поступления вагонов на подъездные пути промышленных предприятий.

Использование выражения (3) связано с рядом проблем.

Во-первых, ввиду того, что количество дней в разных месяцах отличается, то, даже при одинаковых суточных объемах прибытия вагонов, выражение (4) дает коэффициент неравномерности 0,02. Для оценки влияния этой погрешности использованы данные о помесечном прибытии грузов на станцию Химическая ООО «ТИС» в период с 2001 по 2014 гг. Динамика объемов прибытия грузов представлена на рис. 1.

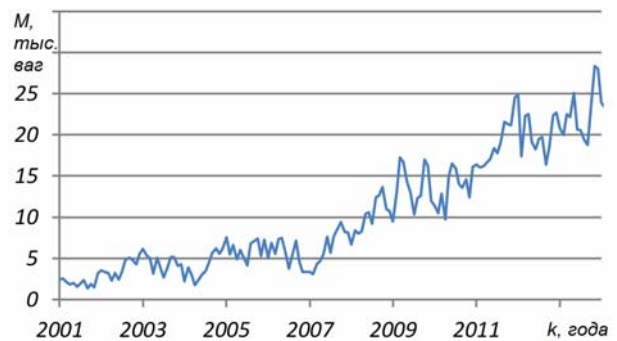


Рис. 1. Динамика прибытия вагонов на подъездной путь ТИС

Fig. 1. The dynamics of cars arrival on driveway of TIS

В ходе сравнения внутригодовая неравномерность определялась по выражению (3), а также по выражению

$$\gamma = \frac{n_e M_n}{n_n M_e}, \quad (6)$$

где n_n , n_r – количество дней в месяц максимальных перевозок и общее количество дней в году соответственно; M_r – годовой объем перевозок.

Сравнение результатов расчета неравномерности по формулам (3) и (6) показывает, что абсолютная величина погрешности для большинства годов составляет 0,02–0,03, однако в 2010 году погрешность составляла 0,06, а в 2001 достигала 0,1.

Во-вторых, как правило, выполнение технико-экономических расчетов по изменению технологии и технического оснащения станций производится после периода роста объемов перевозок. Пример такого процесса изображен на рис. 1. В этих условиях рост (так же как и уменьшение) объемов перевозок выражением (3) интерпретируется как неравномерность, что

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

приводит к завышению внутригодовой неравномерности.

В-третьих, величина размаха объемов перевозок не имеет прямой зависимости от самого значения этого объема. На рис. 2 представлено поле точек, характеризующее связь между коэффициентом внутригодовой неравномерности, рассчитанным по формуле (3), и годовым объемом перевозок.

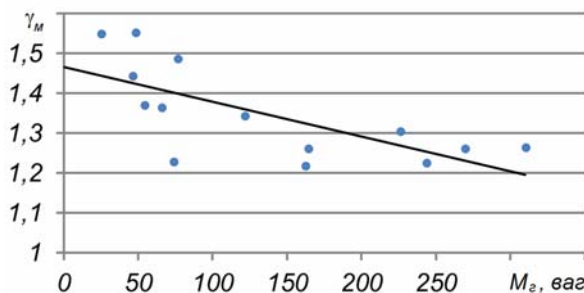


Рис. 2. Связь между коэффициентом внутригодовой неравномерности и годовым объемом перевозок

Fig. 2. The relationship between the coefficient of inter-annual irregularity and the annual volume of transportations

Анализ рис. 2 показывает, что между коэффициентом внутригодовой неравномерности и объемом перевозок существует обратная зависимость, при этом для условий «ТИС» сила связи оценивается как заметная.

В-четвертых, анализ неравномерности перевозок осуществляется на основании годового объема перевозок. При этом, значение коэффициента неравномерности по разным годам существенно отличается. В частности для условий «ТИС» в 2004 году коэффициент неравномерности составлял 1,56, а в 2010 – 1,22. Порядок оценки неравномерности перевозок на основании данных более длительных периодов, чем год в нормативных документах не указан.

В-пятых, на работу магистральных и промышленных железнодорожных станций существенное влияние оказывает суточная неравномерность перевозок. Анализ суточных объемов прибытия вагонов на станцию Химическая показывает, что в период с 2011 по 2014 год наблюдалось превышения среднегодовых объемов работы в 1,83 раза.

Анализ научных работ по проблеме неравномерности перевозок показывает, что данная тема стала актуальной еще в XIX веке на на-

чальных этапах развитии науки об организации движения на железнодорожном транспорте.

Необходимо отметить, что до 50-х годов XX века основное внимание ученых уделялось сезонным колебаниям объемов работы железных дорог, в то же время суточные колебания объемов работы относилось на несовершенство оперативного планирования и управления работой железных дорог. После 50-х годов началось активное исследование неравномерности грузовых перевозок с применением методов теории вероятностей и математической статистики. В частности необходимо отметить работы [1–3,14], в которых комплексно рассмотрены проблемы оценки неравномерности движения на железнодорожном транспорте. Так, в [14] на основании значительного числа наблюдений установлены устойчивость суточных колебаний вагонопотоков, а также соответствие этих отклонений нормальному закону распределения. В [3] выполнено развитие вероятностных методов оценки неравномерности транспортных процессов на железнодорожном транспорте. В частности предложено устанавливать доверительную вероятность для расчетных объемов из такого условия, что в течение года только один показатель выйдет за допустимые пределы. В [1] выделена внутригодовая (месячная), внутримесячная, суточная и внутрисуточная неравномерность грузовых перевозок и описаны причины возникновения разных видов неравномерности и исследована внутрисуточная неравномерность железнодорожных перевозок. В [2] выполнена оценка месячной и суточной неравномерности железнодорожных станций Украины. В настоящее время развиваются методы прогнозирования железнодорожных перевозок, основанные на использовании нейронных сетей [13, 17]. Проблемы анализа временных рядов детально исследуются в области экономики. В частности в [6] представлены методы выделения трендов временных рядов, анализа сезонных колебаний и др.

Однако проблема оценки неравномерности движения и определения расчетных объемов работы магистральных и промышленных железнодорожных станций до конца не решена и требует выполнения дополнительных исследований.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Цель

Целью данной работы является совершенствование методов оценки неравномерности грузовых перевозок и определения расчетных объемов работ для железнодорожных станций и подъездных путей промышленных предприятий на основании методов анализа временных рядов. Предлагаемая методика ориентирована для использования при анализе работы действующих железнодорожных станций.

Методика

Для определения расчетных объемов работы преимущественно используются экстраполяционные методы, когда параметры процессов, происходящих в прошлом, определенным образом распространяются на будущее и методы математического моделирования, когда значения расчетных параметров устанавливаются на основании знания функциональных зависимостей между исходными данными. В статье в качестве методов исследования для оценки расчетных объемов грузопотоков и груженых вагонопотоков использованы экстраполяционные методы, в частности методы анализа временных рядов, а для оценки расчетных объемов порожних вагонопотоков использованы методы математического моделирования.

Плановые годовые объемы работы, как правило, определяются внешними по отношению к железнодорожным станциям факторами, такими как планы развития предприятий, обслуживаемых этими станциями, планы перевозок на направлении и т.п. В этой связи годовые объемы работы в данном исследовании M_r , являются исходными данными для дальнейшего расчета. При этом также должны быть заданы плановые изменения структуры грузо- или вагонопотоков по основным и прочим видам грузов.

Дополнительные данные для расчета получают в результате обследования соответствующей железнодорожной станции [5]. На этапе сбора информации о функционировании станции производится выборка данных из форм первичной учетной документации и оперативно-статистической отчетности. Необходимо отметить, что этап определения расчетных объемов работ железнодорожных станций, как правило, ограничен во времени и не является

отдельным исследованием. При этом информация в формах учета и отчетности представлена в бумажном виде, разрознена по различным источникам и подвергается первичному обобщению. Опыт выполнения научно-исследовательских работ показывает, что наиболее эффективным источником данных для оценки неравномерности перевозок являются данные из электронного архива АСК ГП УЗ или автоматизированных систем управления работой железнодорожного транспорта промышленных предприятий. При возможности получения таких данных информация из бумажных носителей используется на начальном этапе для формирования задач по анализу данных электронного архива и на завершающем этапе для контроля результатов. Для получения объективной оценки месячных изменений показателей перевозок желательно выполнить выборку помесечных данных о динамике показателей за предшествующие 5-10 лет. В случае отсутствия таких данных для анализа могут использоваться данные за последние 2-3 года, которые необходимо дополнять расширенным экспертным анализом. Для оценки суточной неравномерности перевозок целесообразно выполнить анализ посуточных объемов грузо- или вагонопотоков за последние 2–3 года.

Необходимо отметить, что плановые годовые объемы работы для станций носят весьма условный характер. В этой связи определение пиковых нагрузок на железнодорожные станции осуществляется по сравнению со средними объемами работы за определенный расчетный период. Железнодорожная станция и подходы к ней представляют собой систему массового обслуживания (СМО) с ожиданием. Поэтому статистических данных об объемах работы станции не достаточно для того, чтобы точно интерпретировать развитие событий и объяснить, почему максимальные объемы перевозок приняли определенное значение. Это может быть как результатом отсутствия потребности в большем объеме перевозок, так и достижением объемами работы максимума пропускной и перерабатывающей способности станции, что вызывает простои вагонов на подходах к ней. Также необходимо учитывать, что при приближении объемов работы к максимальным значениям, как правило, усложняется диспетчерское управление перевозками. При перегрузке стан-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

цій обычно предпринимаются специальные меры, направленные на снижение неравномерности перевозок. Анализ статистических данных также показывает, что всплески показателей прибытия и отправления грузов на станции достаточно часто наблюдаются после периодов с низкими объемами работы. Это связано с наличием свободных путей и складских емкостей по прибытию, а также грузов на складах по отправлению.

Для того, чтобы учесть месячные изменения и суточные колебания показателей работы их расчетные объемы предлагается определять по формуле

$$M_{\text{пр}} = \overline{M_{\text{р},i}} \gamma_{\text{м}} \gamma_{\text{с}}, \quad (7)$$

где $\overline{M_{\text{р},i}}$ – прогнозные средние суточные объемы работы в течение i -го месяца; $\gamma_{\text{м}}$, $\gamma_{\text{с}}$ – расчетные коэффициенты месячной и суточной неравномерности соответственно.

В случае, если по достижению расчетного года планируется стабилизация объемов перевозок, то

$$\overline{M_{\text{р},i}} = \frac{M_{\text{г}}}{12}. \quad (8)$$

Иначе, если после достижения расчетного года объемы работы будут изменяться, то для оценки расчетных грузо- или вагонопотоков должен быть задан тренд, характеризующий эти изменения.

Месячную неравномерность объемов работы станций вызывают различные причины. В настоящее время эти причины в основном носят экономический характер и связаны с конъюнктурой рынка перевозок и перевозимых грузов. Также месячную неравномерность вызывают сезонность производства и потребления продукции, влияние погодных условий, ограничение пропускной способности подходов к железнодорожной станции в связи с ростом объемов пассажирских перевозок в определенные месяцы и др. Оценка этих колебаний выполняется путем сравнения фактических объемов перевозок в определенный месяц по сравнению со значением, полученным на основании тренда показателя с помощью коэффициента месячной неравномерности.

С этой целью в ходе анализа временных ря-

дов на основании изучения помесечных данных определяются тренды показателей работы станций. При решении данной задачи для каждого месяца необходимо определить среднесуточный объем работы, дополнить данные прогнозом на 6 месяцев и выполнить сглаживание полученной последовательности путем вычисления взвешенной скользящей средней ${}_{12}W_x$ с ${}_{13}W_j = (1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1)$. В результате будет получена последовательность $S_{\text{сн},ij}$, описывающая тренд соответствующего показателя.

Коэффициент месячной неравномерности для отдельного месяца определяется по формуле

$$\gamma_{\text{м},i,j} = \frac{S_{\text{н},ij}}{S_{\text{сн},ij}}, \quad (9)$$

где $S_{\text{н},ij}$, $S_{\text{сн},ij}$ – фактические среднесуточные объемы работы в i -й месяц j -го года и среднесуточные объемы работ в этот же период соответственно, рассчитанные по результатам сглаживания; k – количество лет, используемых для анализа месячной неравномерности.

Величина месячной неравномерности для отдельного года определяется как

$$\gamma_{\text{м},j} = 12 \frac{\max(\gamma_{i,j})}{\sum \gamma_{i,j}}, i = 1..12. \quad (10)$$

Расчетный коэффициент месячной неравномерности определяется в результате сглаживания последовательности установленных неравномерностей для отдельных годов с помощью взвешенной скользящей средней ${}_kW_s$ с весами ${}_kW_j = \{k, k-1, \dots, 1\}$.

Оценка влияния средних объемов работы на величину коэффициента месячной неравномерности требует дополнительных исследований. Соответствующий анализ целесообразно выполнять в случае, если предполагаются значительные изменения объема работы более чем в 1,5 раза.

Суточную неравномерность вызывают следующие причины: вероятностный процесс поездообразования, неритмичность подачи порожних вагонов под погрузку, отказы технических средств, особенности режима работы предприятий, таможенных органов и др. Сгла-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

живание суточной неравномерности выполняется отчасти за счет резерва погрузо-разгрузочных и маневровых средств, отчасти за счет создания дополнительной путевой емкости для простоя на них поездов и вагонов в ожидании обслуживания. Величина суточной неравномерности может достигать значительных размеров, в результате чего объемы работы могут превышать средние годовые более чем в два раза. Создание соответствующих резервов мощностей является, как правило, экономически неоправданным.

В этой связи выполнен анализ условий работы магистральных и промышленных станций в отдельные сутки. В качестве примера в данной статье рассмотрено поступление вагонов на станцию Химическая в течение 2011–2014 годов. На рис. 3 представлено поле точек, характеризующее связь между коэффициентом месячной неравномерности – γ_M и величиной максимального превышения среднемесячных объемов прибытия вагонов в данный месяц – ΔD .

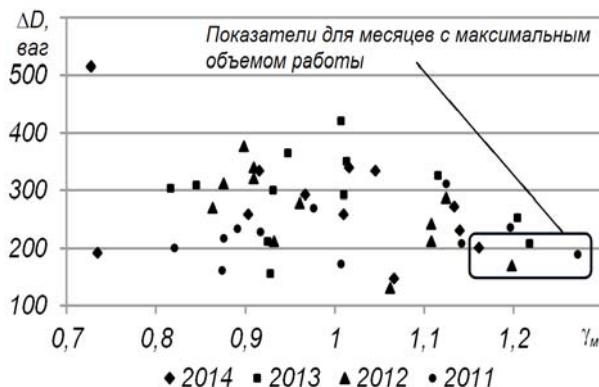


Рис. 3. Связь между коэффициентом месячной неравномерности и величиной максимального превышения среднемесячных объемов прибытия вагонов в данный месяц

Fig. 3. The relationship between the coefficient of monthly irregularity and the magnitude of maximum exceedances of the monthly average volume of cars arrival in a given month

Анализ рис. 3 показывает, что для месяцев с максимальным объемом работы существенная суточная неравномерность нехарактерна. В этой связи в качестве расчетного периода, по аналогии с речными вокзалами [11], целесообразно принять период из 30-ти суток в течении которого наблюдались наибольшие суммарные

объемы перевозок. Однако, если вокзалы можно рассматривать как СМО с отказами, то железнодорожные станции являются СМО с ожиданием. Поэтому при определении пиковой нагрузки, сглаживание выполнять не целесообразно и предлагается использовать непосредственно максимальные суточные объемы работы. Также для того, чтобы исключить условное деление временного ряда на месяцы количество рассматриваемых периодов предлагается установить по количеству дней в году со смещением при расчете на один день.

Коэффициент суточной неравномерности предлагается определять по формуле

$$\gamma_c = \frac{D_{\max}}{\bar{D}}, \quad (11)$$

где $D_{\max}$, $\bar{D}$ – максимальные и средние объемы работы в течение расчетного 30-ти дневного периода соответственно.

Если значение коэффициента суточной неравномерности меньше 1,15 и на станции не предпринимались специальные мероприятия по обеспечению ритмичности подачи вагонов (обслуживание по расписанию), то это указывает на перегрузку технических средств станции в рассматриваемый период. В этом случае необходимо принять коэффициент суточной неравномерности равным 1,15.

Для определения расчетного коэффициента суточной неравномерности обычно используются данные последнего года. Остальные данные используются для контроля результатов. На рис. 4 представлен сглаженный ряд, характеризующий объемы перевозок за периоды в 30 суток в течение 2011–2012 годов. При этом длительным пиковым нагрузкам в ноябре 2011–январе 2012 года, октябре–декабре 2013 года, сентябре–октябре 2014 года соответствовал коэффициент суточной неравномерности 1,17–1,23. За более чем годичный период с февраля 2012 по апрель 2013 года станция Химическая не испытывала пиковых нагрузок. В этой связи коэффициенты суточной неравномерности, рассчитанные на основании данных этого периода, для определения расчетных объемов работы в условиях роста перевозок использовать нецелесообразно.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ



Рис. 4. Анализ суточной неравномерности поступления груженых вагонов на станцию Химическая

Fig. 4. Daily irregularity analysis of loaded cars arrival to the station Khimicheskaya

Результаты

Для проверки предлагаемой методики определены расчетные размеры прибытия груженых вагонов на станцию Химическая «ТИС» для 2014 года и выполнено их сравнение с фактическим поступлением вагонов. Для расчетов использовались данные за 2009–2011, 2010–2012 и 2011–2013 годы. Предполагалось, что в 2014 году будет сохранен рост объемов перевозок. Результаты анализа представлены в табл. 1. В процессе анализа сравнивались максимальные объемы поступления вагонов в отдельные месяцы $D_{\max}$ с расчетными объемами $M_{\text{пр}}$, установленными с помощью предлагаемого метода (Метод I), на основании коэффициента неравномерности (3), когда в качестве пикового периода принимался месяц максимальных перевозок с учетом 15 % резерва на суточную неравномерность (Метод II), и на основании коэффициента неравномерности, когда в качестве пикового периода принимались сутки максимальных перевозок (Метод III). Также для каждого метода установлено количество превышений расчетных объемов работы в отдельные месяцы $n_{\text{пр}}$.

Таблица 1

Анализ методов определения расчетных объемов работы станций

Table 1

Determining methods analysis of the estimated volumes of stations activity

месяц	$D_{\max}$	Метод I		Метод II		Метод III	
		$M_{\text{пр}}$	$n_{\text{пр}}$	$M_{\text{пр}}$	$n_{\text{пр}}$	$M_{\text{пр}}$	$n_{\text{пр}}$
2011-2013							
1	1 109	1 150	0	1 191	0	1 326	0
2	979	1 164	0	1 191	0	1 326	0
3	1 181	1 178	1	1 191	0	1 326	0
4	1 103	1 192	0	1 191	0	1 326	0
5	818	1 206	0	1 191	0	1 326	0
6	1 135	1 220	0	1 191	0	1 326	0
7	1 122	1 234	0	1 191	0	1 326	0
8	1 227	1 248	0	1 191	3	1 326	0
9	1 283	1 262	1	1 191	4	1 326	0
10	1 252	1 276	0	1 191	3	1 326	0
11	1 203	1 290	0	1 191	1	1 326	0
12	1 137	1 304	0	1 191	0	1 326	0
2010-2012							
1	1 109	1 160	0	1 171	0	1 309	0
2	979	1 174	0	1 171	0	1 309	0
3	1 181	1 189	0	1 171	2	1 309	0
4	1 103	1 203	0	1 171	0	1 309	0
5	818	1 217	0	1 171	0	1 309	0
6	1 135	12 31	0	1 171	0	1 309	0
7	1 122	1 245	0	1 171	0	1 309	0
8	1 227	1 259	0	11 71	3	1 309	0
9	1 283	1 273	1	1 171	4	1 309	0
10	1 252	1 287	0	1 171	5	1 309	0
11	1 203	1 302	0	11 71	1	1 309	0
12	1 137	1 316	0	1 171	0	1 309	0
2009-2011							
1	1 109	1 175	0	1 244	0	1 380	0
2	979	1 190	0	1 244	0	1 380	0
3	1 181	1 204	0	1 244	0	1 380	0

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Окончание табл. 1

End of Table 1

месяц	$D_{\max}$	Метод I		Метод II		Метод III	
		$M_{\text{пр}}$	$n_{\text{пр}}$	$M_{\text{пр}}$	$n_{\text{пр}}$	$M_{\text{пр}}$	$n_{\text{пр}}$
2009-2011							
4	1 103	1 218	0	1 244	0	1 380	0
5	818	1 232	0	1 244	0	1 380	0
6	1 135	1 247	0	1 244	0	1 380	0
7	1 122	1 261	0	1 244	0	1 380	0
8	1 227	1 275	0	1 244	0	1 380	0
9	1 283	1 290	0	1 244	2	1 380	0
10	1 252	1 304	0	1 244	1	1 380	0
11	1 203	1 318	0	1 244	0	1 380	0
12	1 137	1 333	0	1 244	0	1 380	0

В результате анализа установлено, что предлагаемая методика позволяет получать достаточно близкие расчетные объемы при изменении временных рядов, используемых для расчета. Так, использование данных за 2009–2011, 2010–2012 и 2011–2013 годы привело к изменению расчетных объемов работы на 39 вагонов (4,5 %). Использование традиционных методик более существенно реагирует на изменение временных рядов. При этом разница в объемах работы достигает 73 и 71 вагонов соответственно при расчетах по Методу II и III.

При определении расчетных объемов прибытия вагонов по Методу I по данным 2011–2013 годов и 2010–2012 годов наблюдались отдельные превышения фактическими объемами работы расчетных, однако они носят локальный характер и следуют после периодов уменьшения объемов работы. При выполнении расчетов по данным 2009–2011 годов расчетные объемы работы превышали фактические для всех месяцев 2014 года. Это связано с ростом объемов перевозок в период с 2011 по 2014 года более чем в 1,5 раза.

В тех случаях, когда расчетные объемы работы определялись на основании коэффициентов месячной неравномерности с помощью Метода II наблюдается устойчивое занижение объемов работы. При этом, когда объемы работы устанавливались на основании данных 2012 года, то в 2014 году наблюдался период из

последовательных 48 дней, когда среднее прибытие вагонов на станцию превышало 90 % от расчетного.

При определении расчетных объемов работы на основании коэффициента суточной неравномерности с помощью Метода III расчетные объемы работы существенно превышают фактические. Так, когда расчет выполнялся на основании данных 2011 года, то даже для наиболее сложного месяца 2014 года (октября) превышение составляло 152 вагона над наибольшим фактическим суточным прибытием.

Размеры порожних вагонопотоков железнодорожных станций традиционно определяются на основании балансовых таблиц. Однако в последнее время в связи с ростом частного парка грузовых вагонов, а также с существенной разницей в их техническом состоянии резко возросли встречные вагонопотоки односторонних порожних вагонов. В этой связи для каждого вагона на основании отчетных данных устанавливается тип груза, с которым данный вагон прибывает на станцию и тип груза, с которым он отправляется со станции. По этим данным для каждого типа вагонов строится матрица. Строки данной матрицы соответствуют типам грузов по прибытию, а столбцы – по отправлению. Элементы матрицы r_{ij} соответствуют вероятности того, что прибывший вагон с i -м грузом будет отправлен с j -м грузом. На основании данной матрицы и плановых грузенных вагонопотоков определяются вагоны, которые используются для двояких операций. Остальные вагоны для обеспечения баланса порожних вагонов подаются на станцию, либо убираются с нее в порожнем виде.

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы состоит в совершенствовании методов определения расчетных объемов работы для железнодорожных станций за счет использования методов анализа временных рядов. Практическая значимость выполненных исследований состоит в том, что предлагаемая методика позволяет более точно оценить перспективные объемы работы и, за счет этого, снизить величину капитальных расходов, связанных с развитием станций, и эксплуатационных расходов, связанных с их функционированием.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. При определении расчетных объемов работы железнодорожных станций, обслуживающих грузовое движение, необходимо учитывать месячную и суточную неравномерность грузо- и вагонопотоков.

2. Месячную неравномерность объемов работы железнодорожных станций целесообразно определять по отношению к тренду соответствующего показателя. Для построения тренда и сглаживания результатов оценки месячной неравномерности по годам предложено использовать метод скользящей средней. Разработанная методика, по сравнению с традиционной, позволяет при анализе учесть тенденции увеличения и уменьшения объемов перевозок, а также обеспечивает возможность использовать для оценки месячной неравномерности периоды более одного года.

3. Оценку суточной неравномерности объемов работы предлагается устанавливать на основании 30-ти суточного периода с максимальными объемами работы в году как отношение максимального объема работы за данный период к среднему.

4. Предложена методика определения расчетных объемом порожних вагонопотоков станций, которые устанавливаются на основании расчетных груженых вагонопотоков и матрицы вероятностей направления вагонов под сдвоенные операции. Такая методика позволяет статистически учесть пригодность вагонов под погрузку в соответствии с техническим состоянием и принадлежностью собственникам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бодюл, В. И. Повышение ритмичности и эффективности транспортного производства на основе снижения внутрисуточной неравномерности перевозок на железных дорогах : дис. ... д-ра техн. наук : 05. 22. 08 / Бодюл Валерий Иванович ; ВНИИЖТ. – Москва, 2006. – 318 с.
- Вернигора, Р. В. Анализ неравномерности грузовых перевозок на магистральном и промышленном железнодорожном транспорте / Р. В. Вернигора, Н. И. Березовый // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2012. – № 2/3 (56). – С. 62–67.
- Захаров, А. Г. Совершенствование планирования и анализа грузовых перевозок на железнодорожном транспорте / А. Г. Захаров. – Москва : Транспорт, 1990. – 239 с.
- Козаченко, Д. Н. Математическая модель для оценки технико-технологических показателей работы железнодорожных станций / Д. Н. Козаченко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 3 (45). – С. 22–28. doi: 10.15802/stp-2013/14540.
- Козаченко, Д. М. Організація передпроектного обстеження залізничних станцій та вузлів / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, О. В. Горбова // Зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна «Трансп. системи та технології перевезень». – Дніпропетровськ, 2014. – Вип 7. – С. 44–48.
- Лаврухін, О. В. Удосконалення оперативного планування роботи вантажної станції в умовах нечіткої вихідної інформації / О. В. Лаврухін, І. О. Левченко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 25 – С. 162–164.
- Мельник, М. Основы прикладной статистики : [пер. с англ.] / М. Мельник. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
- Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций ВНТП 81. – Москва : Изд-во стандартов, 1981. – 46 с.
- Правила перевезень вантажів залізничним транспортом України. Ч. 1. – Київ : САМ, 2004. – 432 с.
- Практичні рекомендації щодо складання технологічного процесу роботи сортувальної станції : ЦД-0081 : затв. наказом Укрзалізниці 22.12.09 р. № 715-Ц. – Київ : НВП Поліграфсервіс, 2010. – 230 с.
- Пособие к СНиП 2.05.07-85. Пособие по проектированию промышленных железнодорожных станций : утв. приказом Союзпромтрансниипроекта 14.10.86 р. № 200. – Москва : Стройиздат, 1986. – 254 с.
- Проектирование железнодорожных станций и узлов : справ. и метод. рук. / под ред. А. М. Козлова, К. Г. Гусевой. – Москва : Транспорт, 1980. – 592 с.
- Рекомендации по проектированию вокзалов / Минстрой России, ЦНИИП градостроительства. – Москва : ГУП ЦПП, 1997. – 78 с.
- Скалозуб, В. В. О применении расширенного логистического отображения для анализа и прогнозирования параметров процессов железнодорожного транспорта / В. В. Скалозуб, И. В. Клименко // Економіка: реалії часу. – 2012. – № 3–4 (4–5). – С. 57–62.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

15. Угрюмов, А. К. Неравномерность движения поездов / А. К. Угрюмов. – Москва : Транспорт, 1968. – 112 с.
16. Ярошевич, В. П. Выбор системы мер увеличения пропускной и провозной способности железнодорожных линий : учеб. пособие / В. П. Ярошевич, М. И. Шкурин. – Гомель : БелИИЖТ, 1989. – 66 с.
17. Bobrovskiy, V. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata / V. Bobrovskiy, D. Kozachenko, R. Vernigora // Transport Problems. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 57–65.
18. Hybrid Temporal-Spatio Forecasting Approach for Passenger Flow Status in Chinese High-Speed Railway Transport Hub / X. Zhengyu, J. Limin, Q. Yong, W. Li // Discrete Dynamics in Nature and Society. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–7. doi:10.1155/2013/239039.

Д. М. КОЗАЧЕНКО^{1*}, А. І. ВЕРЛАН^{2*}, О. В. ГОРБОВА^{3*}

^{1*}Науково-дослідна частина, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта kozachenko@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}ТОВ з П «Трансінвестсервіс», вул. Чапаєва, 50, с. Визірка, Одеська обл., Україна, 67543, тел. + 38 (0482) 30 07 24, ел. пошта averlan@tis.ua, ORCID 0000-0001-7855-8942

^{3*}Науково-дослідна частина, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 90 59, ел. пошта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ОБСЯГІВ РОБОТИ ДЛЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

Мета. Стаття спрямована на вдосконалення методів оцінки нерівномірності вантажних перевезень і визначення розрахункових обсягів робіт для залізничних станцій та під'їзних шляхів промислових підприємств. **Методика.** В якості методів дослідження для оцінки розрахункових обсягів роботи вантажопотоків і завантажених вагонопотоків використані методи математичної статистики, зокрема, методи аналізу часових рядів; для оцінки розрахункових обсягів порожніх вагонопотоків задіяно методи математичного моделювання. **Результати.** Розрахункові обсяги роботи магістральних і промислових залізничних станцій визначаються з урахуванням місячної та добової нерівномірності. Місячну нерівномірність пропонується оцінювати по відношенню до тренду показника за останні 3–5 років, побудованого з використанням методу зваженої ковзної середньої. В якості розрахункового періоду для оцінки добової нерівномірності пропонується використовувати 30-ти денний період у попередньому році з найбільшим сумарним обсягом робіт. Розміри розрахункових порожніх вагонопотоків пропонується визначати на підставі завантажених вагонопотоків із матрицею ймовірності використання вагонів під здвоєні операції. Виконано перевірку запропонованого методу шляхом розрахунку обсягів робіт для 2014 року за даними попередніх тимчасових періодів. Результати перевірки показали, що запропонований метод, у порівнянні з традиційним, забезпечує більш високу стійкість результатів при зміні часових періодів, що використовуються для аналізу, а також більш точну оцінку розрахункових обсягів роботи. **Наукова новизна.** Авторами удосконалено методи визначення розрахункових обсягів роботи для залізничних станцій за рахунок використання методів аналізу часових рядів. **Практична значимість.** Запропонована методика дозволяє більш точно оцінити перспективні обсяги роботи і, за рахунок цього, знизити величину капітальних витрат, пов'язаних із розвитком станцій, та експлуатаційних витрат, пов'язаних із їх функціонуванням. Методика також може бути використана при вдосконаленні нормативних і методичних документів, що регламентують проектування та розробку технологічних процесів роботи магістральних і промислових залізничних станцій.

Ключові слова: залізнична станція; нерівномірність перевезень; часові ряди; проектування залізничних станцій; технологічний процес

D. M. KOZACHENKO^{1*}, A. I. VERLAN^{2*}, O. V. HORBOVA^{3*}

^{1*}Research Department, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail kozachenko@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}LLC with FI «Transinvestservis», Chapaiev St., 50, v. Vyzirka, Odesa region, Ukraine, 67543, tel. + 38 (0482) 30 07 24, e-mail averlan@tis.ua, ORCID 0000-0001-7855-8942

^{3*}Research Department, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 90 59, e-mail alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

CALCULATED VOLUMES DETERMINATION OF WORK FOR MAIN-LINE AND INDUSTRIAL RAILWAY STATIONS

Purpose. This article aims to improve the evaluation of irregularity of freight transport and calculated volumes determination of work for railway stations and sidings of industrial enterprises. **Methodology.** The methods of mathematical statistics are used as research methods for estimation of calculated volumes of traffic and loaded traffic, in particular, the methods of time series analysis; the methods of mathematical modeling are used to evaluate the calculated volumes of empty traffic. **Findings.** Calculated volumes of the main-line and industrial railway stations activity are determined according to the monthly and daily irregularity. Monthly irregularity is proposed to evaluate against the trend of the indicator over the last 3-5 years, constructed using the method of weighted moving average. The 30-day period in the previous year with the largest total amount of work is proposed to use as the calculation period for the assessment of daily irregularity. The computation size of empty traffic volumes is proposed to be determined on the basis of loaded traffic volumes with the probability matrix of cars usage for dual operations. The proposed method is verified by the work volume calculation for the year 2014 according to previous time periods. The test results showed that the proposed method as compared with traditional one provides higher stability of the results when changing time periods, used for analysis, as well as a more accurate assessment of the calculated volumes of work. **Originality.** Authors have improved determination methods for the calculated volumes of work to railway stations through the using time series analysis methods. **Practical value.** The proposed methodology allows assessing more accurately the prospective volumes of work and, through this, reduce the amount of capital expenditures associated with the development of stations and operating costs associated with their operation. The method can be used to improve the governing and methodological documents regulating the design and development of technological processes of the main-line and industrial railway stations.

Keywords: railway station; irregularity of transportation; time-series; design of railway stations; technological process

REFERENCE

1. Bodyul V.I. *Povysheniye ritmichnosti i effektivnosti transportnogo proizvodstva na osnove snizheniya vnutrisutochnoy neravnomernosti perevozok na zheleznykh dorogakh. Dokt. Diss.* [Increasing the efficiency and balance of transport production on the basis of reduction in daily irregularity of traffic on the railways. Doc. Diss.]. Moscow, Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut zheleznodorozhnogo transporta Publ., 2006. 318 p.
2. Vernigora R.V., Berezovyy N.I. Analiz neravnomernosti gruzovykh perevozok na magistralnom i promyshlennom zheleznodorozhnom transporte [Analysis of irregularity of freight transport on main line and industrial railway transport]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy—Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2012, no. 2/3 (56), pp. 62-67.
3. Zakharov A.G. *Sovershenstvovaniye planirovaniya i analiza gruzovykh perevozok na zheleznodorozhnom transporte* [Improving of planning and analysis of freight transportation in railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1990. 239 p.
4. Kozachenko D.N. Matematicheskaya model dlya otsenki tekhniko-tekhnologicheskikh pokazateley raboty zheleznodorozhnykh stantsiy [Mathematical model for estimating of technical and technological indicators of railway stations operation]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 3 (45), pp. 22-28. doi: 10.15802/stp2013/14540.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5. Kozachenko D.M., Vernyhora R.V., Horbova O.V. Orhanizatsiia peredproektnoho obstezhennia zaliznychnykh stantsii ta vuzliv [Organization of pre-project survey of railway stations and junctions]. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana «Transportni systemy ta tekhnolohii perevezennia»* [Proc. of scientific works of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan «Transport systems and transport technologies»], 2014, no. 7, pp. 44-48.
6. Lavrukhin O.V., Levchenko I.O. Udoshkonalennia operatyvnoho planuvannia roboty vantazhnoi stantsii v umovakh nechitkoi vykhidnoi informatsii [Improving of operational planning of freight station in fuzzy initial information]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 25, pp. 162-164.
7. Melnik M. *Osnovy prikladnoy statistiki* [Fundamentals of applied statistics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 416 p.
8. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya teplovykh elektricheskikh stantsiy VNTP 81* [Norms of technological design of thermal power stations VNTP 81]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 46 p.
9. *Pravyla perevezennia vantazhiv zaliznychnym transportom Ukrainy. Ch. 1* [The rules of cargo transportation by railway transport of Ukraine. Part 1]. Kyiv, SAM Publ., 2004. 432 p.
10. *Praktychni rekomendatsii shchodo skladannia tekhnolohichnoho protsesu roboty sortuvanoi stantsii. TsD-0081* [Practical guidelines for the process of marshalling yard. CSD-0081]. Kyiv, NVP Polihrafservis Publ., 2010. 230 p.
11. *Posobiye k SNIp 2.05.07-85. Posobiye po proektirovaniyu promyshlennykh zheleznodorozhnykh stantsiy* [Manual to SNIp 2.05.07-85. Manual for design of industrial railway stations]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 254 p.
12. Kozlova A.M., Guseva K.G. *Proektirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy i uzlov* [The design of railway stations and junctions]. Moscow, Transport Publ., 1980. 592 p.
13. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu vokzalov* [Recommendations for the design of railway stations]. Moscow, State Unitary Enterprise Center of Project Construction Publ., 1997. 78 p.
14. Skalozub V.V., Klimenko I.V. O primenenii rasshirennogo logisticheskogo otobrazheniya dlya analiza i prognozirovaniya parametrov protsessov zheleznodorozhnogo transporta [About the application of the extended logistic map for analysis and prediction the process parameters of railway transport]. *Ekonomika: realii chasu – Economy: Realities of Time*, 2012, no. 3-4 (4-5), pp. 57-62.
15. Ugryumov A.K. *Neravnomernost dvizheniya poyezdov* [Irregularity of trains]. Moscow, Transport Publ., 1968. 112 p.
16. Yaroshevich V.P., Shkurin M.I. *Vybor sistemy mer uvelicheniya propusknoy i provoznoy sposobnosti zheleznodorozhnykh liniy* [The choice of a system of measures to increase capacity and carrying capacity of railway lines]. Homel, Belarusian Institute of Railway Engineers Publ., 1989. 66 p.
17. Bobrovskiy V., Kozachenko D., Vernigora R. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata. *Transport Problems*, 2014, vol. 9, issue 3, pp. 57-65.
18. Zhengyu X., Limin J., Yong Q., Li W. Hybrid Temporal-Spatio Forecasting Approach for Passenger Flow Status in Chinese High-Speed Railway Transport Hub. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013, vol. 2013, pp. 1–7. doi:10.1155/2013/239039.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. В. Лаврухиным (Украина);
д.т.н., проф. Б. Е. Боднарем (Украина)

Поступила в редколлегию 20.02.2015

Принята к печати 16.05.2015

УДК 656.22.05:330.13

Г. Я. МОЗОЛЕВИЧ^{1*}, А. В. ТРОЯН^{2*}

^{1*} Каф. «Станції та вузли», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 12, ел. пошта MrMozG81@mail.ru, ORCID 0000-0002-4715-1645

^{2*} ДП «Придніпровська залізниця», пр. Карла Маркса, 108, Дніпропетровськ, Україна, 49602, тел. +38 (056) 793 27 63, ел. пошта trojan_andrey@rambler.ru, ORCID 0000-0002-5133-5201

ВПЛИВ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЇЗДОПОТОКУ НА ЗАГАЛЬНИЙ ПРИБУТОК ЗАЛІЗНИЦЬ

Мета. Робота спрямована на аналіз впливу таких параметрів, як кількість поїздів на дільниці та довжина вантажного поїзда, на загальний прибуток залізниці та визначення загального прибутку Придніпровської залізниці за основними дільницями пропуску поїздів. Необхідним є також визначення питомої ставки прибутку на 1 кілометр експлуатаційної довжини кожної окремої ланки залізничної мережі. **Методика.** Для досягнення поставленої мети були розроблені імітаційні моделі дільниць залізничного полігону та проведено моделювання пропуску вантажних поїздів. На основі отриманих результатів визначені залежності основних параметрів поїздопотоків та їх вплив на загальний прибуток залізниці. **Результати.** На основі проведених досліджень для визначення оптимальних маршрутів пропуску поїздів та вибору раціональних параметрів поїздопотоків було розроблено функції експлуатаційних витрат по кожній дільниці. За їхньою допомогою розраховані експлуатаційні витрати, дохід, загальний прибуток залізниці та визначений вплив параметрів поїздопотоків на економічні показники роботи залізничного транспорту. Визначено, що оптимальним є пропуск вантажних поїздів довжиною 53–56 умовних вагона, а завантаження дільниці повинно складати 75–85 % від наявної пропускної спроможності. З огляду на отримані результати пріоритетним розвитком залізничного транспорту під час можливого підвищення розмірів руху є електрифікація дільниць із тепловозною тягою (у зв'язку зі значною вартістю дизельного палива). **Наукова новизна.** Авторами була удосконалена технологія визначення загального прибутку залізниць на основі змінних параметрів поїздопотоків. Вперше визначена та запропонована для використання при визначенні інвестиційної привабливості залізниць питома ставка прибутку на 1 кілометр експлуатаційної довжини дільниці у залежності від середньодобових розмірів руху. Розроблені імітаційні моделі окремих дільниць реального залізничного полігону Придніпровської залізниці. **Практична значимість.** Використання розроблених імітаційних моделей дозволить аналітичним шляхом розрахувати економічний ефект від збільшення добового поїздопотоків. Впровадження моделей також допоможе виділити фактори, які впливають на прибуток залізниць по окремим дільницям пропуску поїздів шляхом визначення питомої ставки прибутку.

Ключові слова: залізничний полігон; поїздопотік; імітаційне моделювання; експлуатаційні витрати; загальний прибуток залізниць; питома ставка прибутку

Вступ

Сучасні тенденції та напрями розвитку економіки України на шляху європейської інтеграції передбачають високу динаміку економічних зв'язків, у тому числі і транспортних потоків. Вони, в першу чергу, орієнтовані на гнучкість економічної системи, та можливість оперативної зміни пріоритетних напрямів кооперації залежно від зовнішньоекономічної і політичної ситуації у країні та світі [9].

Результати реформування європейських залізниць 1985–2005 рр. вказують на те, що

в цілому реформи були вигідні в плані ефективності і продуктивності послуг залізничного транспорту [13]. У цьому аспекті залізничний транспорт України, як одна з основних складових економіки потребує реформування відповідно до вимог сучасного ринку транспортних послуг. Залізнична система є складною системою з багатьма взаємодіючими процесами [14]. Сьогоднішні умови функціонування залізничного транспорту України характеризуються зміною структури й обсягів вантажо- та поїздопотоків. Так залізниці України протягом 2014 року перевезли 389,7 млн. т вантажів, що

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

становить 87,8 % до аналогічного періоду 2013 р. У внутрішньому сполученні перевезено 182,6 млн. т, імпорتنі перевезення становлять майже 36,2 млн. т, експорт – понад 141,3 млн. т, транзитні – 29,5 млн. т. При цьому внутрішні перевезення, порівняно з 2013 роком, зменшилися на 20,3 %, експортні – на 2,9 %, транзитні – на 13,3 %. Імпорتنі перевезення зросли на 3,7 %. [3].

У зв'язку з цим змінилась і структура вантажопотоку за родом вантажів. Так у загальних обсягах вантажів збільшилися перевезення зерна і зернових (122,1 %), коксу (119,7 %) та лісових вантажів (102,3 %), обсяги інших вантажів зменшилися: кам'яного вугілля (на 16,8 %), нафти і нафтопродуктів (на 13,7 %), чорних металів (на 9,5 %), руди залізної і марганцевої (на 2 %) [3].

У цей час існує ще одна, досить актуальна, проблема залізничного транспорту. Так у зв'язку з напруженою ситуацією у країні, Укрзалізниця змушена в оперативному порядку виконувати розподіл поїздопотоків через постійні обмеження на дільницях залізничної мережі східної України.

Це викликало необхідність корінних змін на залізничному транспорті, у першу чергу в системі керування його експлуатаційною роботою. Триває активний пошук нових форм і методів роботи, що забезпечують взаємовигідні відносини з регіонами і підприємствами галузі, підвищення прибутковості перевізного процесу в умовах конкуренції з іншими видами транспорту [10].

Основним з пріоритетних напрямків розвитку залізниць є використання сучасних методів організації оперативного розподілу поїздопотоків, які враховують, в першу чергу, економічну ефективність від перевезення вантажів за рахунок зниження собівартості перевезень і підвищення ефективності використання рухомого складу та залізничної інфраструктури. Сучасні транспортні системи повинні відповідати високим вимогам щодо надійності та доступності послуг [15].

Фундаментальною основою підвищення ефективності експлуатаційної роботи залізниць України в сучасних умовах є впровадження нових методів управління перевізним процесом

на базі інформаційних і керуючих технологій з використанням принципів технологіко-економічної моделі перевізного процесу. На сучасному етапі економічних взаємин управлінсько-му апаратові всіх рівнів необхідно вміти приймати попередньо економічно обґрунтовані організаційні й технологічні рішення, які дозволять мінімізувати витрати і збільшити дохідні надходження. Впровадження інформаційних технологій перевізного процесу в межах ідеології технологіко-економічної моделі управління дозволить досягти значного зниження експлуатаційних витрат, пов'язаних з перевезенням вантажів (поліпшення використання рухомого складу, оптимізація регулювання та прискорення обігу вагона) [7]. Також, з огляду на подальшу реструктуризацію залізничного транспорту та пошуку іноземних інвесторів, необхідно презентувати Укрзалізницю, як стабільно прибуткове підприємство з привабливим макро- та мікроекономічним середовищем.

Мета

Мета роботи – визначення загального прибутку Придніпровської залізниці за основними дільницями пропуску поїздів та аналіз впливу таких параметрів, як кількість поїздів на дільниці і довжина вантажного поїзда, на загальний прибуток залізниці; визначення питомої ставки прибутку на кілометр експлуатаційної довжини кожної окремої ланки залізничної мережі.

Постановка задачі: Для виконання наукових досліджень розглядається залізничний полігон, який включає основні вантажонапружені дільниці Придніпровської залізниці:

– одноколіїні: Кривий Ріг – Верхівцеве, Апостолове – Нижньодніпровськ-Вузол (НДВ), Нижньодніпровськ – Вузол – Павлоград, Павлоград – Красноармійськ;

– двоколіїні: Верхівцеве – НДВ, Кривий Ріг – Запоріжжя-Ліве, Нижньодніпровськ-Вузол – Синельникове, Запоріжжя-Ліве – Синельникове, Синельникове – Павлоград, Синельникове – Красноармійськ (рис. 1).

Об'єктом дослідження є реальний залізничний полігон Придніпровської залізниці; предмет дослідження – вантажні поїздопотоки, що пропускаються по заданому полігоні.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Методика

Для визначення оптимальних маршрутів пропуску поїздів та вибору раціональних параметрів поїздопотоків на залізничному напрямку, з метою мінімізації загальних витрат залізниць визначаємо функції експлуатаційних витрат по кожній дільниці окремо. Для цього були розроблені імітаційні моделі кожної дільниці залізничного полігону на основі міністерського графіка руху поїздів та з урахуванням основних їх характеристик: довжина дільниці, кількість головних колій, технічна швидкість вантажних поїздів, керівний ухил, вагові норми, кількість технічних станцій та умовна довжина приймально-відправних колій цих станцій і т.п. Дослідження виконувалось з використанням розробленої моделі [5]. Інформаційна складова моделі пропуску поїздопотоків для кожної окремої дільниці має вигляд графіка руху поїздів (рис 2). Розроблені моделі, на відміну від існуючих, надають можливість системно проаналізувати організацію руху поїздів на залізничних напрямках з урахуванням особливостей роботи кожної дільниці окремо.

Виконуючи апроксимацію експерименталь-

них даних, визначених моделюванням пропуску поїздопотоків по дільницях, отримуємо математичний опис залежності часу ходу вантажного поїзда по перегону від кількості вантажних поїздів і умовної довжини состава. Для дільниці Верхівцеве – Нижньодніпровськ-Вузол функція залежності має вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2, (1)$$

де x_1, x_2 – змінні кількості: вантажних поїздів на дільниці за добу та умовної довжини состава відповідно; $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – сталі коефіцієнти (табл. 1).

Для візуального аналізу характеру залежності тривалості знаходження поїздів на дільниці від зміни кількості вантажних поїздів і умовної довжини состава отримані функції подаємо у графічному вигляді (рис 3). Аналогічні залежності від зміни кількості вантажних поїздів і умовної довжини состава були визначені для середньої швидкості руху вантажних поїздів на дільниці, кількості локомотивів та середньодобового обороту одного локомотива.



Рис. 1. Залізничні шляхи сполучення між основними технічними станціями Придніпровської залізниці

Fig. 1. Railway connections between key technical stations of Prydniprovsk railway

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

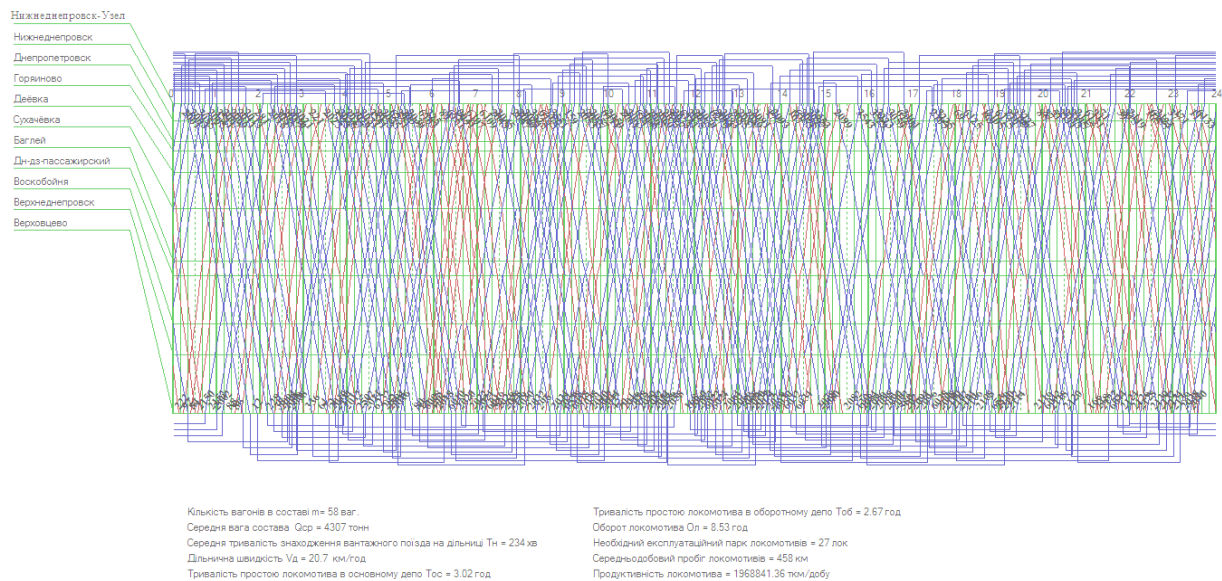


Рис. 2. Результати моделювання руху поїздів на двоколінійній дільниці
Нижньодніпровськ Вузол – Верхівцеве

Fig. 2 Results of simulation for the double-track train station
Nyzhnodniprovsk Vuzol – Verkhivtseve

Таблица 1

**Коефіцієнти функції залежності тривалості
знаходження поїздів на дільниці від зміни
кількості вантажних поїздів і умовної
довжини состава**

Table 1

**The coefficients of functions depending on
the duration of the train on the section from change
the number of freight trains and conditional
length of rolling stock**

b0	1917,7914
b1	−0,0378
b2	−63,5683
b12	−0,0097
b11	0,0074
b22	0,5625

Для перевірки адекватності даної моделі був використаний метод повного факторного експерименту (ПФЕ). Він реалізує всі можливі і неповторювані комбінації незалежних змінних, кожна з яких примусово варіює на двох рівнях. Кількість цих комбінацій при n факто-

рах визначає тип планування [1]. Для того, щоб встановити залежність функції відгуку від двох факторів $t=f(N,m)$ (фактор 1 – кількість вантажних поїздів (N), фактор 2 – умовна довжина поїзда (m)), був розглянутий вплив кожного фактора на двох рівнях.

У результаті перевірки адекватності моделі було визначено, що більший вплив на функцію має саме перший фактор, зважаючи на те, що врахування довірчого інтервалу відхилило врахування окремо другого фактора, залишивши при цьому вплив добутку факторів. Таким чином слід зауважити, що на тривалість знаходження окремого поїзда на дільниці впливає саме його умовна довжина (m), а на середню тривалість знаходження поїзда на дільниці – кількість вантажних поїздів (N).

У результаті виконаних дослідів отримані необхідні дані для розрахунку експлуатаційних витрат: середньодобові розміри руху вантажних поїздів, середня вага брутто та умовна довжина поїзда, загальний час руху по дільниці, кількість зупинок, оборот локомотива. На їхній основі і виконуємо розрахунок експлуатаційних витрат на просування вантажного поїздопотоків по заданому залізничному полігоні Придніп-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ровської залізниці та отриманого загального доходу від здійсненого перевезення вантажів по залізничній мережі.

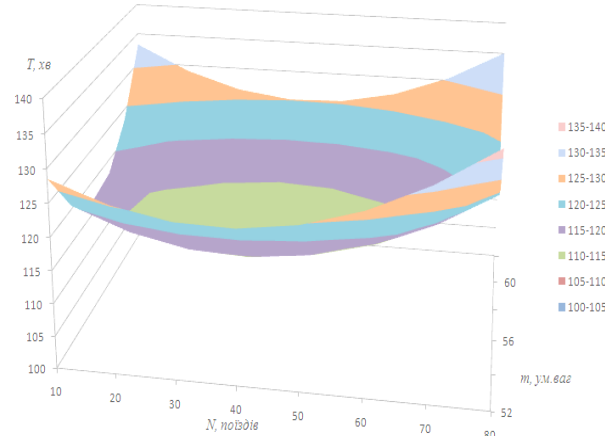


Рис. 3. Залежність часу знаходження поїздів на ділянці від кількості вантажних поїздів та умовної довжини составів, що рухаються на дільниці Верхівцеве – НДВ

Fig. 3. Dependence time of trains on the section from the number of freight trains and conditional length of rolling stock moving at the station Verkhivtseve – NDV

Розглянемо складники експлуатаційних витрат на пропуск поїздопотоків по дільницях залізничного полігону: витрати на електроенергію (дизельне паливо), на утримання локомотивів та локомотивних бригад, на експлуатацію та простій рухомого складу, витрати на зупинки та обслуговування поїздів на технічних станціях. У загальному вигляді функція експлуатаційних витрат має вигляд:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{рух}} + E_{\text{прост}} + E_{\text{ст}}, \quad (2)$$

де $E_{\text{рух}}$ – витрати, пов'язані з рухом поїздів на дільниці, грн; $E_{\text{прост}}$ – витрати, пов'язані з простоєм поїздів на перегонах та станціях з урахуванням витрат на розгін-сповільнення, грн; $E_{\text{ст}}$ – витрати, пов'язані з обслуговуванням поїздів на технічних станціях, грн [6].

Витрати, пов'язані з рухом поїздів, включають в себе:

$$E_{\text{рух}} = E_{\text{пал}} + E_{\text{лок}}^{\text{утр}} + E_{\text{утр}}^{\text{бр}} + E_{\text{утр}}^{\text{ваг}}, \quad (3)$$

де $E_{\text{пал}}$ – витрати на паливо-енергетичні ресурси, необхідні для пропуску поїздів, грн; $E_{\text{лок}}^{\text{утр}}$ – витрати на поточне утримання локомотивів для пропуску заданого вагонопотоку; $E_{\text{утр}}^{\text{бр}}$ – витрати на поточне утримання локомотивних бригад, грн; $E_{\text{утр}}^{\text{ваг}}$ – витрати на поточне утримання вагонного парку, грн.

Витрати на простій поїздів визначаємо:

$$E_{\text{прост}} = E_{\text{прост}}^{\text{ваг}} + E_{\text{прост}}^{\text{лок}} + E_{\text{розг-спов}}, \quad (4)$$

де $E_{\text{прост}}^{\text{ваг}}$ – витрати на простій вагонів на перегонах та станціях, грн; $E_{\text{прост}}^{\text{лок}}$ – витрати на простій магістральних локомотивів з бригадою, грн; $E_{\text{розг-спов}}$ – витрати на розгін – уповільнення вантажного поїзда, грн.

Формула витрат на обслуговування поїздів має вигляд:

$$E_{\text{ст}} = E_{\text{то}} + E_{\text{ст}}^{\text{інфр}} + E_{\text{змін}}^{\text{бр}} + E_{\text{змін}}^{\text{лок}}, \quad (5)$$

де $E_{\text{то}}$ – витрати, пов'язані з технічним оглядом вагонів на технічних станціях дільниці, грн; $E_{\text{ст}}^{\text{інфр}}$ – витрати на використання станційної інфраструктури, грн; $E_{\text{змін}}^{\text{бр}}$ – витрати на зміну локомотивних бригад, грн; $E_{\text{змін}}^{\text{лок}}$ – витрати на зміну локомотива, грн.

Використовуючи одиничні витратні ставки по перевезеннях, витрати залізниці на просування вагонопотоку визначаємо за формулою:

$$E = \left\{ C_{\text{пал}} \cdot P_{\text{пал}}^{\text{год}} \cdot T_{\text{рух}} \cdot N_n + C_{\text{лок}}^{\text{км}} \cdot L_{\text{діл}} \cdot N_n + C_{\text{бр}}^{\text{год}} \cdot T_{\text{рух}} \cdot N_n + C_{\text{ваг}}^{\text{км}} \cdot L_{\text{діл}} \cdot N_n \cdot m_{\text{ум.ваг}} + C_{\text{інфр}}^{\text{пер}} \cdot L_{\text{діл}} \cdot T_{\text{рух}} \cdot N_n + C_{\text{прост}}^{\text{ваг}} \cdot T_{\text{прост}} \cdot N_n \cdot m_{\text{ум.ваг}} + C_{\text{прост}}^{\text{лок}} \cdot T_{\text{прост}} \cdot N_n + n_{\text{зуп}} \cdot (C_{\text{розг}} + C_{\text{зальм}}) \cdot N_n + C_{\text{то}}^{\text{1ваг}} \cdot N_n \cdot m_{\text{ум.ваг}} \cdot K_{\text{то}} + C_{\text{ст}}^{\text{інфр}} \cdot T_{\text{то}} \cdot N_n + C_{\text{змін}}^{\text{бр}} \cdot N_n \cdot K_{\text{бр}} + C_{\text{змін}}^{\text{лок}} \cdot N_n \cdot K_{\text{лок}} \right\}, \quad (6)$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

де $C_{\text{пал}}$ – вартість одиниці енергоресурсу (1 т палива, для тепловозної тяги), грн; $C_{\text{лок}}^{\text{км}}$ – питомі витрати на 1 локомотиво-км вантажного руху, грн; $C_{\text{бр}}^{\text{год}}$ – питомі витрати на 1 бригадо-год у вантажному русі, грн; $C_{\text{ваг}}^{\text{км}}$ – питомі витрати на 1 вагоно-км загального пробігу вагона вантажного парку, грн; $C_{\text{прост}}^{\text{ваг}}$ – питомі витрати на 1 год простою вагона у складі вантажного поїзда, грн; $C_{\text{прост}}^{\text{лок}}$ – питомі витрати на 1 год простою магістрального локомотива з бригадою у вантажному русі, грн; $C_{\text{розг}}$ – вартість розгону поїзда, грн; $C_{\text{гальм}}$ – вартість одного гальмування поїзда, грн; $C_{\text{то}}^{\text{ваг}}$ – питомі витрати на технічний огляд 1 вагона вантажного поїзда, грн; $C_{\text{змін}}^{\text{бр}}$ – питомі витрати на зміну локомотивної бригади на технічній станції, грн; $C_{\text{інфр}}^{\text{ст}}$ – питомі витрати на використання 1 км станційної інфраструктури протягом години, грн; $C_{\text{інфр}}^{\text{пер}}$ – питомі витрати на використання 1 км інфраструктури на перегоні в вантажному русі протягом години, грн; $C_{\text{змін}}^{\text{лок}}$ – питомі витрати на зміну локомотива на технічній станції, грн [11]; $P_{\text{пал}}^{\text{год}}$ – витрати електроенергії (палива) на пропуск поїзда встановленої маси та довжини, кВт/год (т/год); $T_{\text{рух}}$ – час руху на дільниці, год; N_n – розміри руху вантажних поїздів на дільниці, поїздів; $L_{\text{діль}}$ – довжина дільниці, км; $m_{\text{ум.ваг}}$ – умовна довжина поїзда, ум. ваг.; $T_{\text{прост}}$ – загальний час простою поїзда на перегонах та станціях дільниці, год; $n_{\text{зуп}}$ – кількість зупинок на шляху слідування (з врахуванням розгону на початковій та гальмування на кінцевій станціях); $K_{\text{то}}$, $K_{\text{бр}}$, $K_{\text{лок}}$ – кількість технічних оглядів, змін локомотивних бригад та локомотивів відповідно на шляху слідування вантажного поїзда по дільниці.

Під час розрахунку експлуатаційних витрат на просування вагонопотоку слід враховувати те, що дільниці мають різну кількість головних колій та поділяються за видом тяги на електри-

фіковані та із тепловозною тягою [11].

Також у парному та непарному напрямках витрати на електроенергію (паливо) визначаються окремо, залежно від поздовжнього профілю дільниці та маси поїздів, що на ній обертаються. Тому витрати палива визначені тяговими розрахунками на дільницях зі змінними параметрами умовною довжиною та середньою вагою бруто поїзда [8].

Також змінні параметри поїздопотоків мають свої обмеження по кожній дільниці окремо. Система обмежень параметрів функції складається з таких рівнянь та нерівностей.

Обмеження по наявній пропускній спроможності дільниць напрямку:

$$N_{ij} \geq N_{\text{вант } j} + N_{\text{пас } j} \cdot \varepsilon_{\text{пас}} + N_{\text{зб } j} (\varepsilon_{\text{зб}} - 1), \quad (7)$$

де $N_{\text{вант } j}$, $N_{\text{пас } j}$, $N_{\text{зб } j}$ – кількість вантажних, пасажирських та збірних поїздів на j -му напрямку; $\varepsilon_{\text{пас}}$, $\varepsilon_{\text{зб}}$ – коефіцієнти зняття вантажних поїздів пасажирськими та збірними відповідно.

Обмеження по довжині приймально-відправних колій:

$$l_{\text{лок}} + m \cdot l_{\text{ваг}} + a \leq l_{\text{кол}}, \quad (8)$$

де $l_{\text{лок}}$ – довжина поїзного локомотива на напрямку (згідно з [6]: $l_{\text{ел}}^{\text{ваг8}} = 30\text{м}$; $l_{\text{тепл}}^{2\text{TE116}} = 37\text{м}$); $l_{\text{ваг}}$ – середня довжина вагона (згідно з [6]: $l_{\text{ваг}} = 15\text{м}$); a – допуск на неточність зупинки поїзда (згідно з [6]: $a = 10\text{м}$).

Обмеження по наявній провізній спроможності дільниць:

$$P_{\text{прое } j}^{\text{спром}} \geq N_{\text{вант } j} Q_{\text{бр } j} l_{\text{діль } j}, \quad (9)$$

де $Q_{\text{бр } j}$ – середня вага бруто поїзда по j -ій дільниці.

Обмеження по наявній кількості порожнього вагонопотоку:

$$N_{\text{пор}} = N_{\text{вант}} \cdot \alpha_{\text{пор}}, \quad (10)$$

де $\alpha_{\text{пор}}$ – коефіцієнт порожнього вагонопотоку на дільниці.

Обмеження по силі тяги поїзних локомотивів:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$Q_{\text{брі}} = \frac{F_{\text{кр}} - P(\omega_0' + i_p)}{\omega_0'' + i_p} \geq Q, \quad (11)$$

де $F_{\text{кр}}$ – розрахункова сила тяги локомотива, кгс; ω_0' – основний питомий опір руху локомотива, кгс/тс; i_p – керівний ухил, %; P – розрахункова маса локомотива, тс; ω_0'' – основний питомий опір руху вантажних вагонів, кгс/тс.

Вагові норми поїздів брутто приймаємо згідно з [2].

Обмеження по локомотивному парку:

$$\frac{N_{\text{вант}} O_{\text{л}}}{24} \leq W_{\text{л}}, \quad (12)$$

де $O_{\text{л}}$ – оборот локомотива.

Окремо було розраховано дохід при сталих вихідних даних, який отримає залізниця від пропуску різної кількості поїздів по кожній з дільниць за формулою:

$$D_i = \frac{C_{10\text{т-кмбр}} \cdot L_{\text{длі}} \cdot N_{\text{ні}} \cdot Q_{\text{брі}}^{\text{сеп}}}{10}, \quad (13)$$

де i – досліджувана дільниця; $L_{\text{длі}}$ – довжина i -тої дільниці, км; $C_{10\text{т-кмбр}}$ – питома доходна ставка на 10 т.км-брутто [12]; $N_{\text{ні}}$ – кількість вантажних поїздів, що пропущені по i -ій дільниці за добу; $Q_{\text{брі}}^{\text{сеп}}$ – середня вага поїзда брутто, розрахована за формулою:

$$Q_{\text{брі}}^{\text{сеп}} = m_{\text{ум.ваг}} \cdot q_{\text{ваг}}^{\text{сеп}}, \quad (14)$$

де $q_{\text{ваг}}^{\text{сеп}}$ – середня вага брутто одного вагона, що перевозиться по дільниці, т/ваг.

Порівнявши витрати, яких потребує пропуск поїздів по кожній з дільниць з доходами, що при цьому отримує залізниця, прибуток залізниці від перевезень було визначено за формулою [4]:

$$\Pi_i = D_i - E_i. \quad (15)$$

Маючи прибуток, отриманий від перевезення різної кількості вантажних поїздів, для кожної дільниці було розраховано питому ставку

прибутку на 1 км експлуатаційної довжини дільниці:

$$C_{\text{прі}}^{1\text{км}} = \frac{\Pi_i}{L_{\text{длі}}}. \quad (16)$$

Цей показник наочно показує, які з дільниць пропуску вантажних поїздів є найбільш прибутковими.

Розрахунок витрат для кожної дільниці виконано за напрямками руху та з розподілом на порожній і вантажний вагонопотік для більш детального визначення залежності експлуатаційних витрат саме у вантажному напрямку.

Результати

Для визначення оптимальних параметрів поїздопотоків були виконані розрахунки експлуатаційних витрат при зміні умовної довжини поїздів та кількості поїздів на дільниці. Для прикладу наведений розрахунок експлуатаційних витрат при зміні параметрів поїздопотоків для парного вантажного напрямку дільниці Верхівцеве – Нижньодніпровськ – Вузол у табл. 2 та на рис. 4.

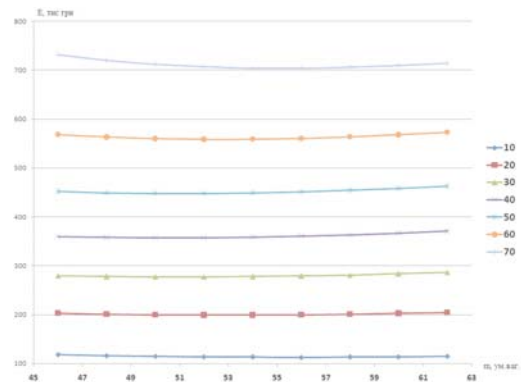


Рис. 4. Залежність витрат від кількості поїздів та умовної довжини поїзда у парному вантажному напрямку дільниці Верхівцеве – НДВ

Fig. 4. Costs dependence from trains number and conditional length in pair freight direction at the station Verkhivtseve – NDV

Згідно з даними графіка, пропуск неповноскладних поїздів є економічно не вигідним, оскільки капітальні вкладення на розвиток інфраструктури перевищують отриманий прибуток від пропуску неповноскладних поїздів.

Таблиця 2

Розрахунки експлуатаційних витрат у парному вантажному напрямку на просування вагонопотоку по дільниці Верхівцеве – НДВ

Table 2

Calculations of operating costs in pair freight hauling direction on movement of car traffic volume at the station Verkhivtseve – NDV

		Експлуатаційні витрати $E_{заг}$, грн				
Параметри моделювання		Умовна довжина поїздів $m_{ум.ваг}$, ум.ваг.				
		46	50	54	58	62
Кількість вантажних поїздів N_n , поїздів	10	118 602,47	114 615,07	113 047,30	113 192,58	114 703,0324
	20	203 080,42	199 561,48	199 017,47	200 731,97	204 348,0633
	30	279 805,26	277 049,68	277 690,85	281 004,05	286 629,6704
	40	359 785,31	357 095,31	358 457,63	363 042,99	370 438,8551
	50	451 924,14	447 807,78	448 924,72	454 161,52	462 955,8518
	60	568 379,77	559 791,66	558 726,80	563 398,49	572 887,9438
	70	732 195,65	712 009,70	704 354,81	705 716,89	714 285,77

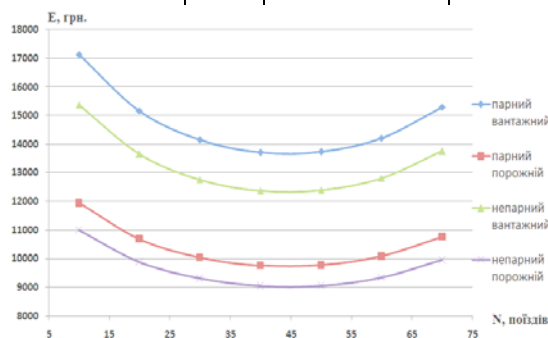


Рис. 5. Питомі витрати на 1 поїзд довжиною 58 умовних вагонів залежно від характеру та розмірів поїздопотоку дільниці Синельникове – Красноармійськ

Fig. 5. Specific costs for one train, length of 58 conventional cars, depending on the character and dimensions of car traffic volume between stations Synelnikove – Krasnoarmiisk

Також пропуск довгосоставних поїздів підвищує загальні експлуатаційні витрати за рахунок додаткових витрат на енергетичні ресурси та додаткові простой на технічних станціях. Тому оптимальна довжина вантажних поїздів коливається у межах 53–56 вагонів, залежно від дільниці.

Під час обробки статистичної інформації

про середньодобові розміри руху вантажних поїздів було визначено, що середня довжина повносоставного вантажного поїзда складає 58 умовних вагонів. Тому подальші розрахунки витрат та доходів наведені саме для вантажних поїздів довжиною 58 ум. ваг.

На рис. 5 наведені залежності питомих експлуатаційних витрат на 1 вантажний поїзд, сталою умовною довжиною, від характеру та розмірів поїздопотоку дільниці Синельникове – Красноармійськ. На його основі можна зробити висновок, що питомі експлуатаційні витрати на 1 поїзд, який слідує по двоколінійній дільниці, найменші при середньодобових розмірах руху в 40–50 вантажних поїздів. При менших розмірах руху питомі експлуатаційні витрати підвищуються за рахунок постійних витрат на утримання залізничної інфраструктури та організацію роботи залізничних станцій дільниці. А при підвищенні розмірів руху з'являються додаткові простой вантажних поїздів в очікуванні виконання технологічних операцій та «нитки» у графіку руху поїздів.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Розрахунок експлуатаційних витрат по дільницях залізничного полігону

Таблиця 3

Table 3

Calculation of operating costs for railway stations polygon

Експлуатаційні витрати при умовній довжині $m=58$ ум.ваг, Е грн.				
Дільниці пропуску поїздів	Розміри руху поїздів на дільницях N, поїздів			
	Одноколіїні ділянки			
	10	15	20	25
Кривий Ріг – Верхівцеве	102 177,00	143 554,28	189 379,68	246 702,36
Апостолове – НДВ	703 472,16	949 957,73	1 272 475,04	1 698 606,32
НДВ – Павлоград	63 437,73	86 086,23	110 399,98	139 221,49
Павлоград – Красноармійськ	88 772,06	120 701,33	2	195 475,92
	Двоколіїні			
	10,00	20,00	30,00	40,00
Верхівцеве – НДВ	113 192,58	200 731,98	281 004,57	363 042,99
Кривий Ріг – Запоріжжя Ліве	139 691,04	256 897,90	370 079,50	490 389,19
НДВ – Синельникове	46 653,96	93 177,52	139 701,08	186 224,65
Запоріжжя-Ліве – Синельникове	58 631,79	106 498,96	152 374,56	201 227,43
Синельникове – Павлоград	31 629,70	63 298,65	102 636,21	150 266,74
СинельниковеКрасноармійськ	171 196,88	303 370,18	424 426,95	548 299,68

Закінчення табл. 3

End of Table 3

Експлуатаційні витрати при умовній довжині $m=58$ ум.ваг, Е грн.			
Дільниці пропуску поїздів	Розміри руху поїздів на дільницях N, поїздів		
	Одноколіїні ділянки		
	30	35	40
Кривий Ріг – Верхівцеве	328 716,97	470 726,33	822 061,01
Апостолове – НДВ	2 266 272,33	3 027 727,73	4 055 145,46
НДВ – Павлоград	177 308,06	236 209,84	356 769,94
Павлоград – Красноармійськ	249 113,67	331 576,91	495 939,46
	Двоколіїні		
	50,00	60,00	70,00
Верхівцеве – НДВ	454 161,53	563 398,50	705 716,90
Кривий Ріг – Запоріжжя Ліве	629 587,47	806 375,13	1 060 154,82
НДВ – Синельникове	232 748,21	279 271,69	325 795,33
Запоріжжя-Ліве – Синельникове	258 163,22	331 345,71	438 320,93
Синельникове – Павлоград	206 927,45	273 390,27	350 449,14
Синельникове-Красноармійськ	686 313,71	852 521,06	1 070 258,98

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Таблиця 4

Розрахунок доходів залізниці від зміни обсягів пропуску вантажних поїздів за ділянками пропуску

Table 4

Calculation of railway incomes from change of freight trains handling volumes on sections of train handling

Доходи залізниці від пропуску вантажних поїздів умовної довжини m=58 ум.ваг, Д грн					
Дільниці пропуску поїздів	Довжина дільниці L, км	Середня вага поїзда брутто Q, т	Розміри руху поїздів на ділянках N, поїздів		
			Одноколіїні ділянки		
			10	15	20
КР – Верх	97	4 383	286 126,6	429 189,9	572 253,3
Апост – НДВ	170	4 077	466 449,6	699 674,4	932 899,1
НДВ – Павл	73,2	5 247	258 486,1	387 729,2	516 972,2
Павл – Красноарм	114,1	5 154	395 772,1	593 658,1	791 544,1
			Двоколіїні		
			10	20	30
Верх – НДВ	82,7	4 894	272 385,9	544 771,7	817 157,5
КР – Зап Ліве	178	4 392	526 135,3	1 052 270,5	1 578 405,7

Продовження табл. 4

Continuation of Table 4

Доходи залізниці від пропуску вантажних поїздів умовної довжини m=58 ум.ваг, Д грн						
Дільниці пропуску поїздів Довжина дільниці L, км Середня вага поїзда брутто Q, т			Розміри руху поїздів на ділянках N, поїздів			
			Двоколіїні			
			10	20	30	
НДВ – Синельн	35,9	4 659	112 564,7	225 129,4	337 694,1	
Зап Ліве – Синельн	67	4 473	201 692,1	403 384,1	605 076,1	
Синельн – Павл	38,7	4 521	117 749,9	235 499,8	353 249,7	
Синельн-Красноарм	155,4	4 716	493 219,1	986 438,2	1 479 657,3	
			Одноколіїні ділянки			
			25	30	35	40
КР – Верх	97	4 383	715 316,6	858 379,9	1 001 443,2	1 144 506,5
Апост – НДВ	170	4 077	1 166 123,9	1 399 348,7	1 632 573,5	1 865 798,3
НДВ – Павл	73,2	5 247	646 215,3	775 458,3	904 701,4	1 033 944,4
Павл – Красноарм	114,1	5 154	989 430,1	1 187 316,2	1 385 202,2	1 583 088,2
			Двоколіїні			
			40	50	60	70
Верх – НДВ	82,7	4 894	1 089 543,4	1 361 929,2	1 634 315,1	1 906 700,9

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Закінчення табл. 4

End of Table 4

Доходи залізниці від пропуску вантажних поїздів умовної довжини m=58 ум.ваг, Д грн						
Дільниці пропуску поїздів Довжина дільниці L, км Середня вага поїзда брутто Q , т			Розміри руху поїздів на дільницях N, поїздів			
Двоколійні						
			40	50	60	70
КР – Зап Лівє	178	4 392	2 104 541,0	2 630 676,2	3 156 811,5	3 682 946,7
НДВ – Синельн	35,9	4 659	450 258,8	562 823,5	675 388,2	787 952,9
Зап Лівє – Синельн	67	4 473	806 768,2	1 008 460,2	1 210 152,3	1 411 844,3
Синельн – Павл	38,7	4 521	470 999,6	588 749,5	706 499,4	824 249,3
Синельн-Красноарм	155,4	4 716	1 972 876,4	2 466 095,4	2 959 314,5	3 452 533,6

Загальні розрахунки експлуатаційних витрат виконані у вигляді табл. 3. Для одноколійних дільниць було досліджено витрати пропуску мінімально – 10, максимально – 40 поїздів за добу, з кроком у 5 поїздів, на двоколійних – мінімально – 10, максимально – 70, з кроком у 10 поїздів. Аналогічно виконані розрахунки доходів від перевезень (табл. 4) та визначений загальний прибуток залізниці від пропуску вантажних поїздів на залізничному полігоні (табл. 5, рис. 6, 7).

Виходячи з табл. 4 видно, що максимальний дохід отримує залізниця під час здійснення вантажних перевезень на дільницях Апостолове – Нижньодніпровськ Вузол (серед одноколійних дільниць) та Кривий Ріг – Запоріжжя Лівє

і Синельникове – Красноармійськ (серед двоколійних дільниць) полігону, що пояснюється довжиною цих дільниць.

За даними табл. 5 можна зробити висновок, що пропуск вантажних поїздів на дільниці Апостолове – НДВ з тепловозною тягою є нерентабельним (рис. 6).

Це зумовлене, в першу чергу, різницею витрат на паливо-мастильні матеріали для електровозів та тепловозів вантажного руху, а оскільки у структурі загальних експлуатаційних витрат значну частину (до 90 %) складають саме витрати на паливо, то різниця між експлуатаційними витратами по дільницях з подібними характеристиками досягає 300–500 %.

Таблиця 5

Розрахунок загального прибутку залізниці від зміни обсягів пропуску вантажних поїздів за дільницями пропуску

Table 5

The total income calculation of railway from change of freight trains handling volumes on sections of train handling

Прибуток залізниці від пропуску вантажних поїздів, П грн				
Дільниці пропуску поїздів	Розміри руху поїздів на дільницях N, поїздів			
	Одноколійні ділянки			
	10	15	20	25
Кривий Ріг – Верхівцеве	183 950	285 636	382 874	468 614
Апостолове – НДВ	-237 023	-250 283	-339 576	-532 482
НДВ – Павлоград	195 048	301 643	406 572	506 994

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Продовження табл. 5

Continuation of table 5

Прибуток залізниці від пропуску вантажних поїздів, П грн				
Дільниці пропуску поїздів	Розміри руху поїздів на дільницях N, поїздів			
	Одноколіїні ділянки			
	10	15	20	25
Павлоград – Красноармійськ	307 000	472 957	636 642	793 954
	Двоколіїні			
	10	20	30	40
Верхівцеве -НДВ	159 193	344 040	536 153	726 500
Кривий Ріг – Запоріжжя Ліве	386 444	795 373	1 208 326	1 614 152
НДВ – Синельникове	65 911	131 952	197 993	264 034
Запоріжжя – Ліве – Синельникове	143 060	296 885	452 702	605 541
Синельникове – Павлоград	86 120	172 201	250 613	320 733
Синельникове – Красноармійськ	322 022	683 068	1 055 230	1 424 577

Закінчення табл. 5

End of Table 5

Прибуток залізниці від пропуску вантажних поїздів, П грн			
Дільниці пропуску поїздів	Розміри руху поїздів на дільницях N, поїздів		
	Одноколіїні ділянки		
	30	35	40
Кривий Ріг – Верхівцеве	529 663	530 717	322 445
Апостолове – НДВ	-866 924	-1 395 154	-2 189 347
НДВ – Павлоград	598 150	668 492	677 174
Павлоград – Красноармійськ	938 202	1 053 625	1 087 149
	Двоколіїні		
	50	60	70
Верхівцеве -НДВ	907 768	1 070 917	1 200 984
Кривий Ріг – Запоріжжя Ліве	2 001 089	2 350 436	2 622 792
НДВ – Синельникове	330 075	396 117	462 158
Запоріжжя – Ліве – Синельникове	750 297	878 807	973 523
Синельникове – Павлоград	381 822	433 109	473 800
Синельникове – Красноармійськ	1 779 782	2 106 793	2 382 275

Тому введення електрифікації на дільницях, зі значними розмірами вантажного руху, є одним з пріоритетних шляхів розвитку залізниць.

Для інших одноколіїних ділянок існує тен-

денція підвищення прибутку при зростанні кількості вантажних поїздів до 30 (рис. 6). При подальшому зростанні обсягів перевезень з'являються додаткові простой, які суттєво впли-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ватимуть на експлуатаційні витрати та безпосередньо на скорочення прибутку залізниць.

Загальний прибуток залізниці від експлуатації двоколіїних ділянок змінюється майже прямо пропорційно кількості вантажних поїздів, що пропускаються. Але під час пропуску 70 поїздів відзначається невелике падіння прибутку, що свідчить про оптимальне завантаження цієї ділянки з урахуванням наявної пропускної спроможності (рис. 7).

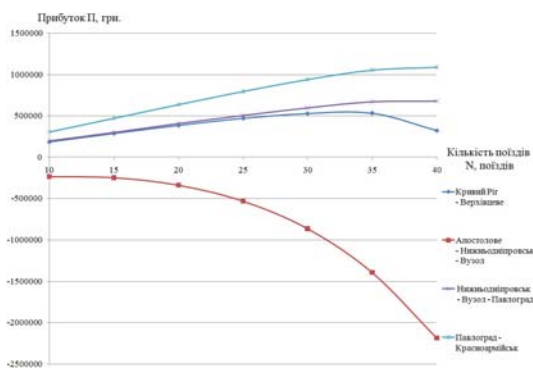


Рис. 6. Графік залежності прибутку залізниці від зміни обсягів пропуску вантажних поїздів на однокільних ділянках руху

Fig. 6. Graph of profits dependence from change of freight trains handling volumes on single track motion sections

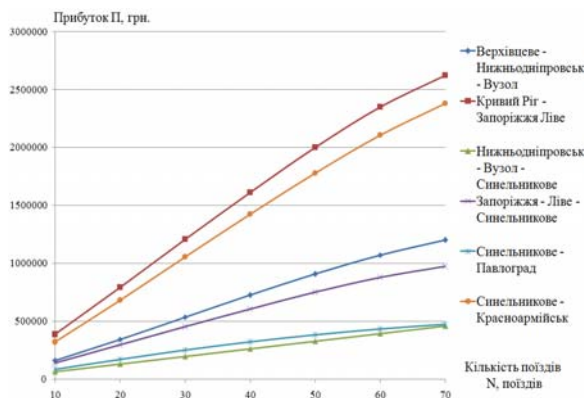


Рис. 7. Графік залежності прибутку залізниці від зміни обсягів пропуску вантажних поїздів на двоколіїних ділянках руху

Fig. 7. Graph of profit dependence from change of freight trains handling volumes on double-track motion sections

Отримані результати загального прибутку залізниці не можуть достовірно характеризува-

ти рентабельність окремої ділянки стосовно інших, оскільки кожна ділянка має різну експлуатаційну довжину. А, враховуючи реструктуризацію залізничного транспорту, метою якого є підвищення інвестиційної привабливості галузі [12], з'являється необхідність у адекватній оцінці прибутковості окремих ділянок. Тому для кожної ділянки була розрахована питома ставка прибутку на 1 км експлуатаційної довжини ділянки залежно від середньодобового розміру поїздопотоку (табл. 6) та наведений графічний аналіз отриманих результатів окремо по однокільних та двоколіїних ділянках (рис. 8 та 9).

Згідно з рис. 8 серед однокільних ділянок найприбутковішими є ділянки: Павлоград – Красноармійськ та Нижньодніпровськ-Вузол – Павлоград, що зумовлене використанням електровозної тяги та сприятливим поздовжнім профілем колії, що дає можливість пропускати великовагові поїзди без використання підштовхувачів або використання подвійної тяги.

В свою чергу, ділянка Апостолове – Нижньодніпровськ-Вузол при будь-яких розмірах руху приносить стабільний збиток, тому пропуск вантажних поїздів по цій ділянці рекомендується виконувати тільки у форс мажорних обставинах (тимчасові обмеження на мережі, пропуск термінових та стратегічно важливих вантажів і т.п.).

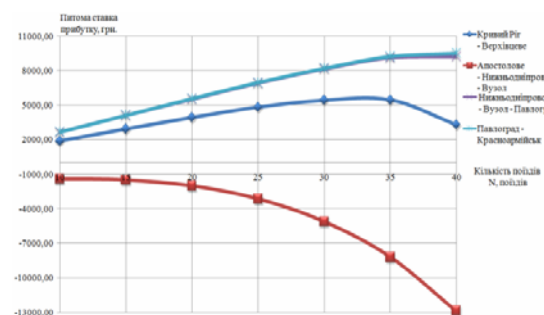


Рис. 8. Залежність питомої ставки прибутку залізниці залежно від зміни обсягів перевезень, віднесеної до 1 км. експлуатаційної довжини однокільних ділянок

Fig. 8. Dependence of specific rates of railroad profit depending on changes in volumes of transportation, referred to 1 km. operational length of a single-track sections

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

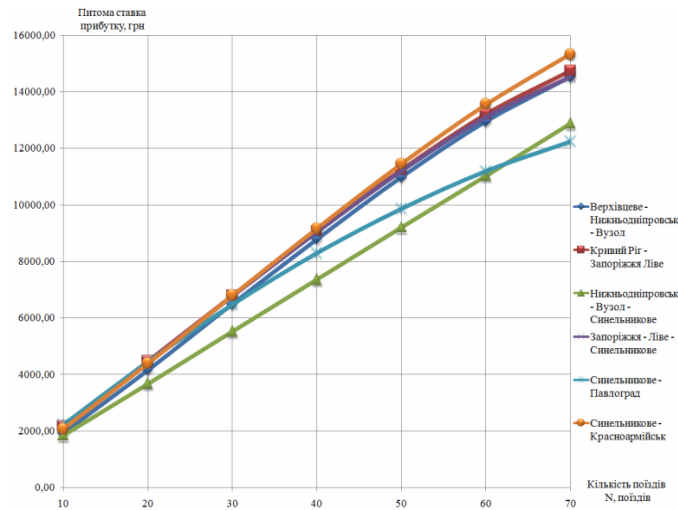


Рис. 9. Залежність питомої ставки прибутку залізниці залежно від зміни обсягів перевезень, віднесеної до 1 км експлуатаційної довжини двоколіїних ділянок

Fig. 9. Dependence of specific rates of railroad profit depending on changes in volumes of transportation, referred to 1 km double-track length of operational sections

Серед двоколіїних ділянок найприбутковішою є ділянка: Синельникове – Красноармійськ, але інші двоколіїні ланки залізничного полігону майже не поступаються їй у прибут-

ковості. Цей факт пояснюється схожими технічними характеристиками усіх двоколіїних ділянок та, в першу чергу, використанням електричної енергії виду тяги.

Таблиця 6

Розрахунок питомої ставки прибутку на 1 км експлуатаційної довжини ділянок пропуску поїздів залежно від зміни обсягів перевезень

Table 6

Calculation of the specific profit rates at 1 km of operational length of the train handling sections, depending on transportation volumes changes

Питома ставка прибутку на 1 км експлуатаційної довжини ділянки, С грн					
Ділянки пропуску поїздів	Довжина ділянки L, км	Розміри руху поїздів на ділянках N, поїздів			
		Одноколіїні ділянки			
		10	15	20	25
Кривий Ріг – Верхівцеве	97	1 896,39	2 944,70	3 947,15	4 831,07
Апостолове – НДВ	170	-1 394,25	-1 472,26	-1 997,51	-3 132,25
НДВ – Павлоград	73,2	2 664,60	4 120,81	5 554,27	6 926,14
Павлоград – Красноармійськ	114,1	2 690,62	4 145,11	5 579,69	6 958,41
Верхівцеве -НДВ	82,7	Двоколіїні			
		10	20	30	40
		1 924,95	4 160,09	6 483,11	8 784,77

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Продовження табл. 6

Continuation of table 6

Питома ставка прибутку на 1 км експлуатаційної довжини ділянки, С грн					
Дільниці пропуску поїздів	Довжина дільниці L, км	Розміри руху поїздів на дільницях N, поїздів			
		Двоколійні			
		10	20	30	40
Кривий Ріг – Запоріжжя Лів	178	2 171,03	4 468,39	6 788,35	9 068,27
НДВ – Синельникове	35,9	1 835,95	3 675,54	5 515,13	7 354,71
Запоріжжя – Лів – Синельникове	67	2 135,23	4 431,12	6 756,74	9 037,92
Синельникове – Павлоград	38,7	2 225,33	4 449,64	6 475,80	8 287,67
Синельникове – Красноармійськ	155,4	2 072,21	4 395,55	6 790,41	9 167,16

Закінчення табл. 6

End of Table 6

Питома ставка прибутку на 1 км експлуатаційної довжини ділянки, С грн				
Дільниці пропуску поїздів	Довжина дільниці L, км	Розміри руху поїздів на дільницях N, поїздів		
		Одноколійні ділянки		
		30	35	40
Кривий Ріг – Верхівцеве	97	5 460,44	5 471,31	3 324,18
Апостолове – НДВ	170	-5 099,55	-8 206,79	-12 878,51
НДВ – Павлоград	73,2	8 171,45	9 132,40	9 251,02
Павлоград – Красноармійськ	114,1	8 222,63	9 234,23	9 528,03
		Двоколійні		
		50	60	70
Верхівцеве -НДВ	82,7	10 976,63	12 949,41	14 522,18
Кривий Ріг – Запоріжжя Лів	178	11 242,07	13 204,70	14 734,79
НДВ – Синельникове	35,9	9 194,30	11 033,89	12 873,47
Запоріжжя – Лів – Синельникове	67	11 198,46	13 116,52	14 530,20
Синельникове – Павлоград	38,7	9 866,20	11 191,45	12 242,90
Синельникове – Красноармійськ	155,4	11 452,91	13 557,23	15 329,95

Наукова новизна та практична значимість

У роботі розроблені імітаційні моделі окремих дільниць реального залізничного полігону Придніпровської залізниці з урахуванням особливостей кожного залізничного перегону та

шляхом моделювання визначені залежності між основними параметрами поїздопотоків по кожній дільниці. Використання розроблених імітаційних моделей дозволить аналітичним шляхом розрахувати економічний ефект від збільшення добового поїздопотоків та допоможе визначити

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

фактори, які впливають на прибуток залізниці по окремих дільницях пропуску поїздів шляхом визначення питомої ставки прибутку.

Удосконалена технологія визначення загального прибутку залізниць на основі змінних параметрів поїздопотоків.

Вперше визначена та запропонована у використанні для визначення інвестиційної привабливості залізниць питома ставка прибутку на 1 км експлуатаційної довжини дільниці залежно від середньодобових розмірів руху.

Висновки

У роботі було виконано розрахунок загального прибутку залізниці шляхом визначення різниці між доходами та експлуатаційними витратами по дільницях. На основі отриманих даних було виконано аналіз зміни прибутку залежно від зміни обсягів пропуску вантажних поїздів при сталих значеннях середньої ваги поїзда брутто та умовної довжини поїздів, що обертаються по дільницях полігону, та отримана питома ставка прибутку на 1 км експлуатаційної довжини дільниці. В результаті дослідження встановлено, що оптимальним є пропуск вантажних поїздів довжиною 53–56 умовних вагона, а завантаження дільниці повинно складати 75–85 % від наявної пропускної спроможності для максимізації загального прибутку Придніпровської залізниці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аністратенко, В. О. Математичне планування експериментів в АПК : навч. посібн. / В. О. Аністратенко, В. Г. Федоров. – Київ : Вища шк., 1993. – 375 с.
2. Відомість вагових норм і довжини поїздів по дільницях Придніпровської залізниці (до графіка руху поїздів на 2014–2015 рр.). Додаток до наказу начальника Придніпровської залізниці від 14.06.2014 р. №358/4. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 4–18.
3. Залізничний портал Донецької залізниці [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://railway.in.ua/news/ukrzeliznycja_perevezla_v_2014_godu_pochti_390 mln_tonn_gruzov/2015-02-20-1754. – Назва з екрана. – Перевірено : 22.05.2015.
4. Інструкція про порядок розподілу та формування доходів від перевезень для залізниць України. ЦФ–0007 : затв. наказом Укрзалізниці від 14.05.1997 р. № 109-Ц // Головне фінансово-економічне управління Укрзалізниці. – Київ, 1997. – С. 28–34.
5. Козаченко, Д. М. Дослідження параметрів потоків поїздів на залізничних напрямках / Д. М. Козаченко, Г. Я. Мозолевич // Вост.-европ. журн. передовых техн. – 2010. – Т. 3. – Вип. 5 (45). – С. 17–21.
6. Кочнев, Ф. П. Управление эксплуатационной работой железных дорог : учеб. пособие для вузов / Ф. П. Кочнев, И. Б. Сотников. – Москва : Транспорт, 1990. – 424 с.
7. Лукова, М. В. Створення центрів руху поїздів як засіб оптимізації витрат / М. В. Лукова, О. В. Пилипенко // Заліз. трансп. : сучасні проблеми науки : зб. тез XLIII наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. – Київ : ДЕТУТ, 2013. – С. 108–109.
8. Методика розрахунку норм витрат дизельного палива і електроенергії на тягу поїздів : ЦТ–0099 : затв. наказом Укрзалізниці від 09.06.2004 р. № 113-Ц // Держ. адмін. заліз. трансп. України. – Київ : Укрзалізняця, 2004. – 60 с.
9. Мозолевич, Г. Я. Математична модель вибору раціональних варіантів пропуску поїздопотоків по залізничній мережі / Г. Я. Мозолевич, Ю. В. Чібісов // Вост.-европ. журн. передовых техн. – 2012. – Т. 3. – Вип. 11 (57). – С. 37–41.
10. Mozolevich, G. Ya. Operational distribution of the train traffic volume on the sections of railway operating domain / G. Ya. Mozolevich // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 5 (47). – С. 33–39. doi: 10.15802/stp2013/17964.
11. Практичні рекомендації з технологіко-економічного управління експлуатаційною роботою залізниць : ЦД–0068 : затв. : наказом Укрзалізниці від 05.08.2008 р. № 128/3 // Гол. управл. перевезень. – Київ, 2006. – С. 10–51.
12. Про затвердження Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки : постановою КМУ № 1390 від 16.12.2009 р. – Київ, 2012. – 3 с.
13. Cantos, P. Vertical and Horizontal Separation in the European Railway Sector and its Effects on Productivity / P. Cantos, J. M. Pastor, L. Serrano // J. of Transport Economics and Policy. – 2010. – № 3. – P. 45–53.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

14. D'Ariano, A. Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications / A. D'Ariano // Transport, Infra-structure and Logistics. – Delft, Netherlands : Netherlands TRAIL Research School, 2008. – 230 p.
15. Fay, A. A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control / A. Fray // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – Heidelberg, 2000. – Vol. 13. – Iss. 6. – P. 719–729. doi: 10.1016/s0952-1976(00)00027-0.

Г. Я. МОЗОЛЕВИЧ^{1*}, А. В. ТРОЯН^{2*}

^{1*} Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 12, эл. почта MrMozG81@mail.ru, ORCID 0000-0002-4715-1645

^{2*} ГП «Приднепровская железная дорога», просп. Карла Маркса, 108, Днепропетровск, Украина, 49602, тел. +38 (056) 793 27 63, эл. почта trojan_andrey@rambler.ru, ORCID 0000-0002-5133-5201

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЕЗДОПОТОКА НА ОБЩУЮ ПРИБЫЛЬ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Цель. Работа направлена на анализ влияния таких параметров, как количество поездов на участке и длина грузового поезда, на общий доход железной дороги и определение общей прибыли Приднепровской железной дороги по основным участкам пропуска поездов. Необходимым является также определение удельной ставки прибыли на 1 километр эксплуатационной длины каждого отдельного звена железнодорожной сети. **Методика.** Для достижения поставленной цели были разработаны имитационные модели участков железнодорожного полигона и проведено моделирование пропуска грузовых поездов. На основе полученных результатов определены зависимости основных параметров поездопотока и их влияние на общую прибыль железной дороги. **Результаты.** На основе проведенных исследований, для определения оптимальных маршрутов пропуска поездов и выбора рациональных параметров поездопотоков, разработаны функции эксплуатационных затрат по каждому участку. С их помощью рассчитаны эксплуатационные затраты, доход, общая прибыль железной дороги и определено влияние параметров поездопотока на экономические показатели работы железнодорожного транспорта. Определено, что оптимальным является пропуск грузовых поездов длиной 53–56 условных вагонов, а загрузка участка должна составлять 75–85 % от имеющейся пропускной способности. Учитывая полученные результаты, приоритетным развитием железнодорожного транспорта в период вероятного роста размеров движения поездов является электрификация участков с тепловозной тягой (в связи со значительной стоимостью дизельного топлива). **Научная новизна.** Авторами была усовершенствована технология определения общей прибыли железных дорог на основании переменных параметров поездопотоков. Впервые определена и предложена для использования при определении инвестиционной привлекательности железных дорог удельная ставка прибыли на 1 километр эксплуатационной длины участка в зависимости от среднесуточных размеров движения. Разработаны имитационные модели отдельных участков реального железнодорожного полигона Приднепровской железной дороги. **Практическая значимость.** Использование разработанных имитационных моделей позволит аналитическим путем рассчитать экономический эффект от увеличения суточного поездопотока. Внедрение моделей также поможет выделить факторы, которые влияют на прибыль железной дороги по отдельным участкам пропуска поездов путем определения удельной ставки прибыли.

Ключевые слова: железнодорожный полигон; поездопоток; имитационное моделирование; эксплуатационные расходы; общая прибыль железных дорог; удельная ставка прибыли

Н. YA. MOZOLEVICH^{1*}, A. V. TROIAN^{2*}

^{1*} Dep. «Stations and Junctions», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 12, e-mail MrMozG81@mail.ru, ORCID 0000-0002-4715-1645

^{2*} SE «Prydniprovsk Railway», Karl Marx Av., 108, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49602, tel. +38 (056) 793 27 63, e-mail trojan_andrey@rambler.ru, ORCID 0000-0002-5133-5201

THE INFLUENCE OF THE MAIN PARAMETERS OF TRAIN TRAFFIC VOLUME ON TOTAL PROFITS OF RAILWAYS

Purpose. The paper is aimed to influence analysis of parameters such as the number of trains on the section and the length of freight trains, the total profit of the railway and determination of total profit of Prydniprovsk railway for major parts of the trains handling; the determination of the specific rate of return on 1 kilometer operational length of each individual link in the rail network. **Methodology.** To achieve this goal the simulation models of the sections of railway polygon and the simulation of cargo trains have been developed. On the basis of obtained results the dependence of the main parameters of train traffic and their impact on the overall profit of the railway was determined. **Findings.** On the basis of the conducted studies the functions operating costs for each section were developed to determine the optimal routes crossing of trains and choice of rational parameters. The operating costs, revenue, total profit of railways and certain impact parameters of train traffic volume on the economic performance of railway transport were calculated with their help. It is determined that freight trains, length 53-56 of a conventional car is optimal to pass and loading area should be 75-85% of the available crossing capacity. Taking into account given results, the electrification of the sections with diesel traction (due to the significant cost of diesel fuel) is the priority development of railway transport at the possible increase in size of the movement. **Originality.** Authors have improved the technology of determining the total profits of railways on the basis of variables train traffic volumes. For the first time the specific rate of profit on the 1 kilometer operational length of the section depending on the size of the average daily traffic is identified and proposed to use to determine the investment attractiveness of the railways. The simulation models of individual sections of the real train polygon at Prydniprovsk railway were developed. **Practical value.** Using the developed simulation models will allow calculating the economic benefits from increased daily train traffic volume in analytical way. Implementation of models will help to identify factors that affect the railway profit on separate sections of the trains crossing by determining the specific rate of profit.

Keywords: train polygon; train traffic volume; simulation; operating expenses; total profit of railways; the specific rate of profit

REFERENCES

1. Anistratenko V.O., Fedorov V.H. *Matematychnye planuvannia eksperymentiv v APK* [Mathematical planning of experiments in agriculture]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 1993. 375 p.
2. *Vidomist vakhovykh norm i dovezhyny poizdiv po dilnytsiakh Prydniprovskoi zaliznytsi (do hrafika rukhu poizdiv na 2014-2015 rr.)* [Statement of weight limits and length of trains on sections of Prydniprovsk Railways (under train schedule for 2014-2015 yy.)]. Dnipropetrovsk, 2014, pp. 4-18.
3. *Zaliznychnyi portal Donetskoi zaliznytsi* [Railway Portal of Donetsk Railway]. Available at: http://railway.in.ua/news/ukrзалізниця_perevezla_v_2014_godu_pochti_390 mln_tonn_gruzov/2015-02-20-1754 (Accessed: 22.05.2015).
4. *Instruktsiia pro poriadok rozpodilu ta formuvannia dokhodiv vid perevezen dlia zaliznyts Ukrainy. TsF-0007* [The instruction on the procedure of distribution and generate income from traffic to the Railways of Ukraine. TsP-0007]. Kyiv, 1997, pp. 28-34.
5. Kozachenko D.M., Mozolevych H.Ya. *Doslidzhennia parametriv potokiv poizdiv na zaliznychnykh napriamkakh* [Investigation of the parameters of trains flow on railway lines]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnalпередових технологій – East European Journal of Advanced Technologies*, 2010, vol. 3, issue 5 (45), pp. 17-21.
6. Kochnev F.P., Sotnikov I.B. *Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy zheleznykh dorog* [Management of the operational work of the railways]. Moscow, Transport Publ., 1990. 424 p.
7. Lukova M.V., Pylypenko O.V. *Stvorennia tsentriv rukhu poizdiv yak zasib optymizatsii vytrat* [The creation of centres of trains as a means of cost optimization]. *Zbirnyk Tez XLIII naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv Zaliznychnyi transport «Suchasni problemy nauky»* [Proc. of XLIII Scientific-Practical Conf. of Young Scientists, Postgraduates and Students. Railway Transport «Modern Problems of Science»]. Kyiv, 2013, pp. 108-109.
8. *Metodyka rozrakhunku norm vytrat dyzelnoho palyva i elektroenerhii na tiahу poizdiv TsT-0099* [The method of calculation of the consumption of diesel fuel and electric power for traction of trains TsT-0099]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2004. 60 p.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Mozolevych H.Ya., Chibisov Yu.V. *Matematychna model vyboru ratsionalnykh variantiv propusku poizdopotokiv po zaliznychnii mrezi* [A mathematical model of rational choice variants of passing the train flows on the rail network]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – East European Journal of Advanced Technologies*. Kyiv, 2012, vol., 3, issue 11 (57), pp. 37-41.
10. Mozolevych G.Ya. Operational distribution of the train traffic volume on the sections of railway operating domain. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, issue 5 (47), pp. 33-39. doi: 10.15802/stp2013/17964.
11. *Pro zatverdzhennia Derzhavnoi tsilovoi prohramy reformuvannia zaliznychnoho transportu na 2010-2019 roky* [On endorsement of State target program of railway transport reforming for the period 2010-2019]. Kyiv, 2012. 3 p.
12. *Praktychni rekomendatsii z tekhnoloho-ekonomichnoho upravlinnia ekspluatatsiinoiu robotoiu zaliznyts. TsD-0068* [Practical recommendations on technological and economic management of the railways operational work. TsD-0068]. Kyiv, 2006, pp. 10-51.
13. Cantos P., Pastor J.M., Serrano L. Vertical and Horizontal Separation in the European Railway Sector and its Effects on Productivity. *Journal of Transport Economics and Policy*, 2010, no. 3, pp. 45-53.
14. D'Ariano A. Improving Real-Time Train Dispatching: Models, Algorithms and Applications. Transport, Infrastructure and Logistics. Delft, Netherlands, Netherlands TRAIL Research School Publ., 2008. 230 p.
15. Fay A. A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2000. vol. 13, issue 6, pp. 719-729. doi: 10.1016/s0952-1976(00)00027-0.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. І. Бобровським (Україна); д.т.н., проф. Є. С. Альошинським (Україна)

Поступила в редколлегию 24.02.2015

Принята к печати 22.04.2015

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК [621.331: 621.311.4:621.3] – 047.44

О. О. МАТУСЕВИЧ^{1*}

^{1*}Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 17, ел. пошта al_m0452@meta.ua, ORCID 0000-0002-2174-7774

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ЗБИТКУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

Мета. Дослідження передбачає розробку методики та моделі зменшення збитку системи тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованих залізниць України. Необхідним є й визначення показника оцінки запобігання збитку системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць. Робота також спрямована на пошук сучасних методів та підходів до удосконалення системи моніторингу, діагностування та технічного обслуговування СТЕ. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено дослідження світового досвіду та публікацій, які присвячені якісному вирішенню проблем СТЕ з використанням лінгвістичного підходу на базі теорії нечітких множин та лінгвістичної змінної. **Результати.** У результаті дослідження розроблено алгоритм зменшення збитку СТЕ, яка функціонує в умовах невизначеності. Встановлено, що розв'язання даної проблеми можливе за рахунок своєчасного виявлення фактичного технічного стану обладнання в умовах проведення якісного технічного обслуговування, діагностування та оновлення ресурсу електротехнічного обладнання тягових підстанцій (ТП) СТЕ. При проведенні дослідження розглянута схема нечіткого висновку, що базується на застосуванні механізму мінімізації області прийняття рішень. Вона сприяє не тільки структурній ідентифікації у процесі формування бази даних, але й дозволяє значно підвищити продуктивність знаходження параметрів нечіткої моделі, що, в свою чергу, зменшує зусилля, які необхідні для аналізу та проектування ефективних систем управління технічним обслуговуванням і ремонтом (ТО і Р) СТЕ. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано алгоритм зменшення збитку системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України. Розроблена математична модель розрахунку зменшення збитку СТЕ від відмов силового обладнання ТП за рахунок удосконалення системи ТО і Р. Вперше запропоновано показник оцінки запобігання збитку системи тягового електропостачання. **Практична значимість.** У статті розглянута схема нечіткого висновку, що базується на застосуванні механізму мінімізації області прийняття рішень та сприяє не тільки структурній ідентифікації в процесі формування бази даних, але й дозволяє значно підвищити продуктивність знаходження параметрів нечіткої моделі. Впровадження даного підходу зводиться до визначення основних етапів, особливостей та оптимального обґрунтування кількісних й якісних вимог до системи ТО і Р ТП. Це досягається при допустимих витратах на удосконалення з метою зменшення збитків СТЕ та вирішення проблеми підтримки обладнання ТП у працездатному стані в умовах наростання темпів і обсягів його старіння (у порівнянні з існуючим темпом і обсягами оновлення).

Ключові слова: електрифіковані залізниці; система тягового електропостачання; тягова підстанція; електрообладнання; зменшення збитків; технічне обслуговування і ремонт; діагностування; фактичний технічний стан; показник оцінки зменшення збитку; нечіткі множини; лінгвістичні змінні

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Вступ

Основним завданням системи електропостачання залізниць є повне і надійне енергетичне забезпечення перевізного процесу при зниженні ризиків та недопущення розвитку кризових ситуацій в безперервному енергозабезпеченні залізничного транспорту.

Підходи до оцінки економічного збитку від ненадійності силового обладнання СТЕ можуть бути виражені у вигляді вартості витрат від простою електрорухомого складу (ЕРС) внаслідок перерв в електропостачанні, недоотриманих доходів енергопередавальних компаній або соціального збитку під час розгляду систем електропостачання житлово-комунального сектора. У статті ми будемо розглядати лише складову збитків, пов'язану із зменшенням надійності та відмов силового обладнання СТЕ в умовах невизначеності її функціонування.

Система електропостачання залізниць має складну ієрархічну структуру і велику кількість пристроїв, довготривала експлуатація, яких без належного моніторингу та діагностування технічного стану може привести до виходу їх із ладу і значних матеріальних збитків. Найбільш складним об'єктом системи електропостачання є тягові підстанції. На електрифікованих залізницях України експлуатується 307 ТП, однак з них 37 ТП мають термін служби понад 30 ро-

ків, а 216 ТП більше 40 років. Також на електрифікованих залізницях в експлуатації знаходиться 9 підстанцій з одним вводом живлення, що не відповідає вимогам Правил улаштування системи тягового електропостачання залізниць України [1, 13].

Розподіл тягових підстанцій по терміну експлуатації наведено на рис. 1.

Аналіз поданих результатів, які наведені на рис. 1, вказує на тенденцію збільшення в експлуатації кількості ТП та їх обладнання, яке відпрацювало не тільки призначений, але і парковий ресурс, а обсяги його заміни настільки малі, що процес старіння парку ТП і його силового електрообладнання практично не зменшує своїх темпів, що знижує ефективність і надійність тягового електропостачання залізниць. Виходячи з цього, важливою складовою в системі діагностики тягової підстанції повинна бути методика діагностики, згідно з якою діагностичні оцінки відображають фактичний стан обладнання ТП. Метою сучасних підходів щодо управління системою діагностики та технічного обслуговування пристроїв ТП є: уникнення або мінімізація наслідків відмов пристроїв; забезпечення ремонту за фактичним станом обладнання; вирішення завдань щодо виявлення відмов; оптимізація планового обслуговування тощо.

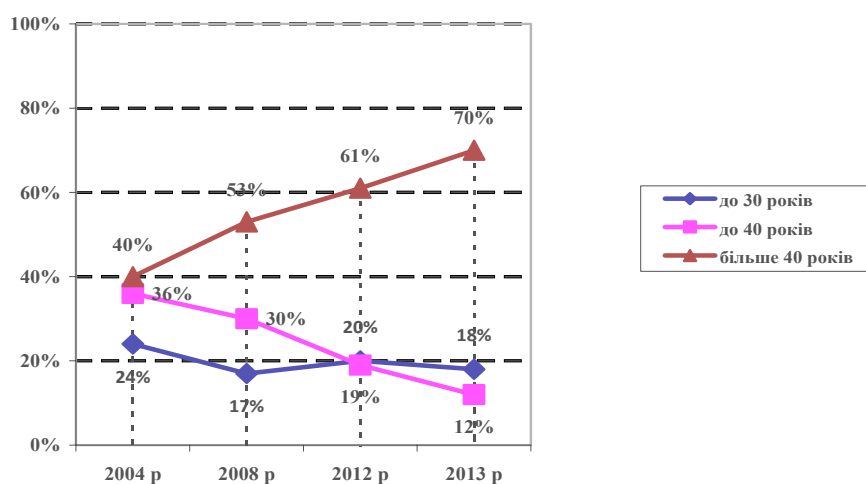


Рис. 1. Розподіл тягових підстанцій по терміну експлуатації

Fig. 1. The distribution of traction substations according to the term of service

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

У господарстві електропостачання залізниць України за 2013 рік допущено 1 031 випадок порушень нормальної роботи пристроїв, що на 43 випадки більше, ніж за 2012 рік (988 випадків), а внаслідок пошкодження пристроїв електропостачання на залізницях України за 2012 рік було затримано 982 поїзди на 959 годин, у 2011 році 832 – поїзди на 656 годин. Це на 17,0 % більше по кількості і на 46,0 % більше за часом [1].

Мета

Виходячи з вищенаведеного, метою статті є виконання дослідження світового досвіду та публікацій, які присвячені якісному вирішенню проблем СТЕ. Пошук нових сучасних методів і підходів удосконалення системи моніторингу, діагностування і технічного обслуговування в процесі експлуатації ТП з метою зменшення збитків системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України.

Методика

Для вирішення задачі мінімізації наслідків відмов пристроїв ТП, система ТО і Р повинна мати такі властивості:

- ефективність в умовах високої невизначеності початкової інформації стану СТЕ;
- простота застосовування, універсальність, комплексність, практична спрямованість, можливість нарощування вхідних даних, тощо.

Кінцевим результатом дослідження повинна бути розробка моделі зменшення збитків системи тягового електропостачання.

Однак, вирішення цієї проблеми ускладнюється деякими особливостями організації та управління системою ТО і Р, основними з яких є [3, 8, 12]:

- необхідність обліку великої кількості показників експлуатаційної надійності обладнання при виборі їх раціонального варіанта в умовах невизначеності функціонування СТЕ;
- суттєвий взаємозв'язок і взаємозалежність показників, що мають суперечливий характер;
- складність отримання вихідних даних залишкового ресурсу обладнання в умовах невизначеності стану пристроїв ТП, які необхідні для вирішення завдань аналізу і синтезу, особливо на ранніх етапах розвитку відмови;
- здебільшого якісний характер показників, які враховуються під час аналізу і синтезу системи ТО і Р.

Вказані особливості дуже ускладнюють застосування традиційних математичних методів, зокрема методів математичної статистики і теорії ймовірності, а також класичних методів оптимізації для вирішення прикладних завдань аналізу і синтезу системи ТО і Р ТП внаслідок того, що математична статистика і теорія ймовірності використовують експериментальні дані, які володіють певною точністю і достовірністю.

У цьому випадку перспективним напрямом для вирішення прикладних задач, які пов'язані з оцінкою та вибором напрямів рішення проблеми зменшення збитків системи тягового електропостачання з причини відмов пристроїв СТЕ, при експертній початковій інформації є: лінгвістичний підхід на базі теорії нечітких множин і лінгвістичної змінної [5, 6, 15–20].

Теорія нечітких множин має справу з «людськими знаннями», які прийнято називати експертною інформацією. У цьому випадку ухвалення рішень в більшості базується на експертних оцінках.

Виходячи з розглянутого та враховуючи практичний досвід і публікації [4, 7, 9, 10], можна запропонувати алгоритм зменшення збитку системи тягового електропостачання від відмов силового електрообладнання під час перевезень на електрифікованому залізничному транспорті, який враховує наведені складові та їх взаємозв'язки (рис. 2).

На рис. 2: $i = \overline{1, n}$ – відмови силового обладнання ТП; P_i – ймовірність відмови i -го обладнання; Δq_i – збиток системи тягового електропостачання залізниць з причини відмов силового обладнання ТП (економічний, технічний, інформаційний тощо). Для тягового електропостачання економічний збиток може бути визначений за наступним виразом [15]:

$$\Delta q = q_{\text{пр}} + q_{\text{зуп}} + q_{\text{від}},$$

де $q_{\text{пр}}$ – збиток від простою поїздів через перерви в тяговому електропостачанні, $q_{\text{зуп}}$ – збиток від зупинки поїздів, $q_{\text{від}}$ – складова збитку, пов'язана з ліквідацією наслідків відмови силового обладнання; $R_i(r)$ – фактичний залишковий ресурс i -го електрообладнання ТП в обсязі напрацювання r ; P_i^B – ймовірність відновлення ресурсу i -го обладнання при своєчасному

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

виявленні його фактичного технічного стану та виконанні якісного ТО і Р; $i = \overline{1, n}$ – відновлення працездатності силового обладнання ТП при своєчасному виявленні фактичного технічного стану та виконанні якісного ТО і Р; $\overline{w}_i$ – показник запобігання збитку СТЕ: економічного, технічного, інформаційного тощо за рахунок відновлення ресурсу i -го обладнання ТП.

В умовах відмов силового обладнання ТП – $i = \overline{1, n}$, кожна i -та відмова характеризується ймовірністю появи – P_i і збитком системи тягового електропостачання – Δq_i , який наноситься під час простою, зупинки ЕРС внаслідок перерв у електропостачанні, ліквідації наслідків відмови силового обладнання, тощо.

Інтелектуальна система моніторингу, діагностування та ТО і Р ТП (ІСМД ТО і Р – ТП), яка розглянута в [9], виконує такі основні функції:

- безперервний моніторинг та діагностування технічного стану основного силового електрообладнання ТП;
- визначення залишкового ресурсу $R_i(r)$ i -го обладнання;
- повне або часткове відновлення ресурсу i -го обладнання ($i = \overline{1, n}$) з ймовірністю відновлення P_i^6 ;
- зменшення збитку СТЕ ($\overline{w}_i$) за рахунок відновлення ресурсу i -го обладнання.

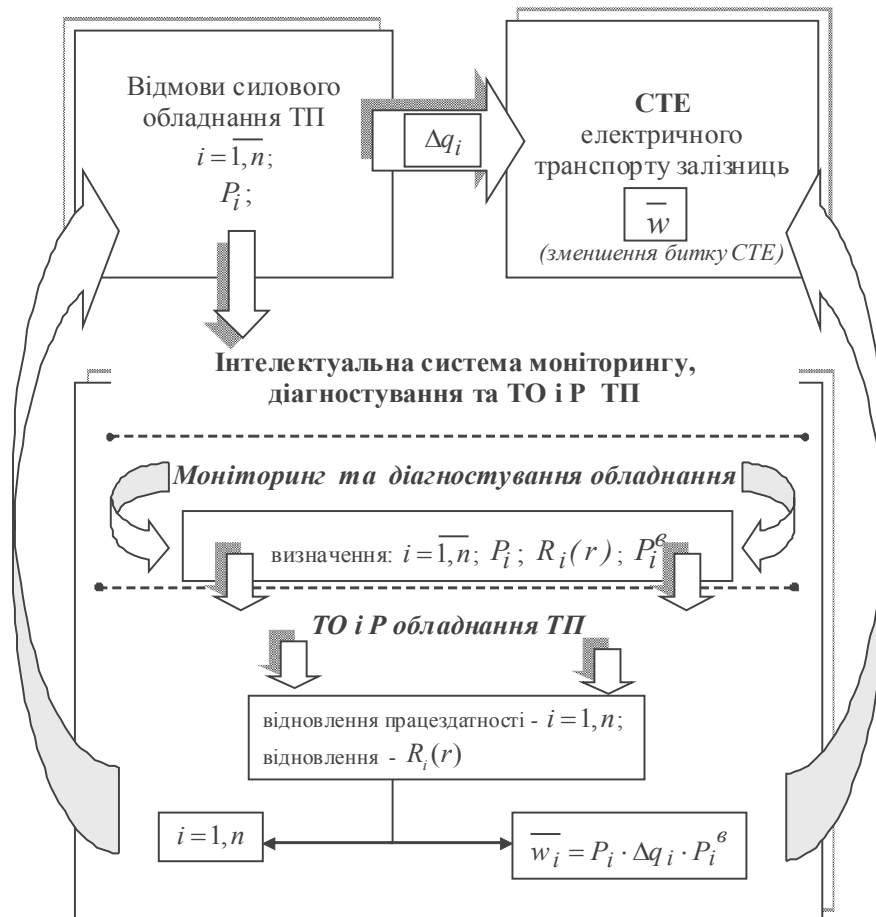


Рис. 2. Алгоритм зменшення збитку системи тягового електропостачання

Fig. 2. The algorithm of reduction the damage of traction energy system

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

З метою вирішення проблеми підвищення ефективності системи ТО і Р визначимо в загальному вигляді задачу ІСМД ТО і Р – ТП, це: відновлення ресурсу силового електрообладнання ТП та зменшення збитку СТЕ під час перевезень на електрифікованому залізничному транспорті за рахунок своєчасного виявлення фактичного технічного стану обладнання та виконання якісного ТО і Р.

Для вирішення цієї задачі необхідно вибрати варіант реалізації запропонованої ІСМД ТО і Р – ТП, який забезпечить максимум відновлення ресурсу та зменшення збитку при допустимих витратах на створення та підтримку інтелектуальної системи.

Згідно з [2] формальна постановка задачі має вигляд:

$$T^{\text{опт}} = \arg \max \bar{W}(\bar{T}). \quad (1)$$

При цьому необхідно знайти

$$T^{\text{опт}} \in T^{\text{доп}}$$

при обмеженні

$$C(T^{\text{опт}}) \leq C_{\text{доп}}$$

де $\bar{T}$ – вектор, що характеризує варіант технічної реалізації ІСМД ТО і Р – ТП; $T^{\text{доп}}$, $T^{\text{опт}}$ – допустиме і оптимальне значення вектора $\bar{T}$; $C_{\text{доп}}$ – допустимі витрати на ІСМД ТО і Р – ТП.

Для вирішення цієї задачі необхідно, перш за все, сформулювати показник визначення рівня зменшення збитку з причини відмов силового обладнання ТП – $\bar{W}(\bar{T})$ з врахуванням якості функціонування ІСМД ТО і Р – ТП.

Показник загального зменшення збитку СТЕ в загальному вигляді подамо співвідношенням:

$$\bar{W} = F(P_i; \Delta q_i; i = \overline{1, n}; P_i^B). \quad (2)$$

Показник запобігання збитку СТЕ i -го обладнання ТП за рахунок визначення реального фактичного стану обладнання (залишкового ресурсу) та поновлення ресурсу подамо співвідношенням:

$$\bar{w}_i = P_i \Delta q_i P_i^B; i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

За умови незалежності відмов обладнання ТП і адитивності (збільшення) їх наслідків отримуюмо

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n P_i \Delta q_i P_i^B. \quad (4)$$

Розглянемо співмножники, що входять у формулу (4).

Ймовірність виходу з ладу i -го обладнання ТП визначається статистично і відповідає відносній інтенсивності виходу з ладу:

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (5)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го обладнання.

Збиток, який наноситься з причини відмов силового обладнання ТП – Δq_i , може визначатися в абсолютних одиницях: економічних втрат, технічних витрат, тимчасових втрат інформації тощо.

Однак практично застосувати ці визначення дуже важко, особливо на ранніх етапах впровадження ІСМД – ТП. Тому доцільно замість абсолютного збитку використовувати *відносний збиток*, який по суті справи є рівнем відмови i -го обладнання ТП. Рівень відмови i -го обладнання ТП може бути визначений експертним шляхом в припущенні, що всі відмови силового обладнання ТП складають повну групу відмов

[5, 7], тобто $0 \leq \Delta q_i \leq 1$; $\sum_{i=1}^n \Delta q_i = 1$.

Найбільш складним питанням є визначення ймовірності відновлення ресурсу i -го обладнання – P_i^B .

Зробимо припущення, що ця ймовірність визначається тим, наскільки повно враховані якісні і кількісні вимоги до ІСМД ТО і Р – ТП, тобто

$$P_i^B = f_i(x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im}), \quad (6)$$

де x_{ij} – ступінь виконання j -ї вимоги до ІСМД ТО і Р – ТП для відновлення ресурсу i -го обладнання, $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, k+m}$.

Хай перші j вимоги « k » до ІСМД ТО і Р – ТП будуть *кількісними* ($j = \overline{1, k}$), а решта – *якісними* ($j = \overline{1, m}$).

Для оцінки ступеня виконання j -ї кількісної та якісної вимог до ІСМД ТО і Р – ТП найзруч-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ніше використовувати його нормоване значення.

Як показано в [2], для нормування значення ступеня виконання j -ї вимоги зручно використовувати таку функцію

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^{\text{нг}}}{x_{ij}^{\text{нк}} - x_{ij}^{\text{нг}}}, \quad (7)$$

де x_{ij} – поточне значення ступеня виконання j -ї вимоги відновлення ресурсу i -го обладнання; $x_{ij}^{\text{нк}}$, $x_{ij}^{\text{нг}}$ – найкраще і найгірше значення.

З урахуванням формули (7) отримуємо такі розрахункові співвідношення:

при $x_{ij}^{\text{нк}} = x_{ij_{\max}}$; $x_{ij}^{\text{нг}} = x_{ij_{\min}}$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij_{\min}}}{x_{ij_{\max}} - x_{ij_{\min}}}, \quad (8)$$

при $x_{ij}^{\text{нк}} = x_{ij_{\min}}$; $x_{ij}^{\text{нг}} = x_{ij_{\max}}$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij_{\max}} - x_{ij}}{x_{ij_{\max}} - x_{ij_{\min}}} \quad (9)$$

Тоді при $x_{ij}^{\text{нк}} = x_{ij_{\text{opt}}}$; $x_{ij}^{\text{нг}} = x_{ij_{\min}}$; $x_{ij}^{\text{нг}} = x_{ij_{\max}}$;

$x_{ij_{\min}} \leq x_{ij_{\text{opt}}} \leq x_{ij_{\max}}$;

– ступінь виконання j -ї кількісної вимоги відновлення ресурсу i -го обладнання:

$\bar{x}_{ij} = 0$ при $x_{ij_{\text{opt}}} > x_{ij} > x_{ij_{\min}}$, $x_{ij_{\text{opt}}} < x_{ij} < x_{ij_{\max}}$;

$\bar{x}_{ij} = 1$ при $x_{ij} = x_{ij_{\text{opt}}}$ ($x_{ij_{\min}} \leq x_{ij_{\text{opt}}} \leq x_{ij_{\max}}$);

– ступінь виконання j -ї якісної вимоги відновлення ресурсу i -го обладнання визначається функцією приналежності до якнайкращого значення $\mu(x_{ij})$:

$$\mu(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - x_{ij_{\min}}}{x_{ij_{\text{opt}}} - x_{ij_{\min}}} \text{ при } x_{ij_{\min}} \leq x_{ij} \leq x_{ij_{\text{opt}}};$$

$$\mu(x_{ij}) = \frac{x_{ij_{\max}} - x_{ij}}{x_{ij_{\max}} - x_{ij_{\text{opt}}}} \text{ при } x_{ij_{\text{opt}}} \leq x_{ij} \leq x_{ij_{\max}}.$$

Розклавши функцію (6) в ряд Макларена і обмежившись лише першими членами ряду, отримаємо

$$P_i^{\text{в}} = P_i^{\text{в}}(0) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial P_i^{\text{в}}}{\partial x_{ij}} x_{ij}, \quad (10)$$

де $P_i^{\text{в}}(0) = 0$ – ймовірність відновлення ресурсу i -го обладнання при невиконанні вимоги до

ІСМД ТО і Р – ТП; $\frac{\partial P_i^{\text{в}}}{\partial x_{ij}} = \alpha_{ij}$ – величина, що

характеризує ступінь впливу вимоги на ймовірність відновлення ресурсу i -го обладнання (важливість виконання j -ї вимоги для усунення i -ї відмови обладнання). Очевидно, що

$$0 \leq \alpha_{ij} \leq 1; \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} = 1 \text{ для } i = \overline{1, n}.$$

Після підстановки в (10) відповідних значень отримуємо

$$P_i^{\text{в}} = \sum_{j=1}^k \alpha_{ij} \bar{x}_{ij} + \sum_{j=k+1}^m \alpha_{ij} \mu(x_{ij}). \quad (11)$$

Остаточно формула (4) показника оцінки запобігання збитку СТЕ приймає вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{w} = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_i \Delta q_i \alpha_{ij} \bar{x}_{ij} + \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{j=k+1}^m P_i \Delta q_i \alpha_{ij} \mu(x_{ij}). \end{aligned} \quad (12)$$

Результати

У результаті дослідження розглянута схема нечіткого висновку, що базується на застосуванні механізму мінімізації області прийняття рішень та сприяє не тільки структурній ідентифікації в процесі формування бази даних, але й дозволяє значно підвищити продуктивність знаходження параметрів нечіткої моделі, оскільки в цьому випадку ми маємо справу не з нескінченними величинами – варіаціями, а з великою кількістю, але, тим не менш, кінцевим числом даних і формальних правил прийняття рішень, що якісно впливає на знаходження системою правильного рішення задачі. Це дуже важливий фактор, тому що застосування концепції мінімізації області прийняття рішень зменшує кількість правил для опису нечіткої моделі, що в свою чергу зменшує зусилля, які необхідні для аналізу і проектування ефективних систем управління ТО і Р СТЕ.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Отримано вираз показника оцінки запобігання збитку СТЕ (економічного, технічного, інформаційного тощо) за рахунок визначення реального фактичного стану обладнання (залишкового ресурсу) та у разі потреби поновлення ресурсу i -го обладнання ТП:

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k P_i \Delta q_i \alpha_{ij} \bar{x}_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=k+1}^m P_i \Delta q_i \alpha_{ij} \mu(x_{ij}),$$

де P_i – ймовірність відмови i -го обладнання (визначається статистично); Δq_i – збиток системи тягового електропостачання залізниць з причини відмов силового обладнання ТП ($0 \leq \Delta q_i \leq 1$); α_{ij} – показник важливості виконання j -ї вимоги для усунення i -ї відмови обладнання. Ця величина характеризує ступінь впливу вимоги на ймовірність усунення i -ї відмови обладнання ($0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$); $\bar{x}_{ij}$ – ступінь виконання j -ї кількісної вимоги з близькістю до необхідного (оптимального) значення для усунення i -ї відмови силового електрообладнання ТП: $\bar{x}_{ij} = 0$, при $x_{ij} < x_{ij_{\min}}$; $x_{ij} > x_{ij_{\max}}$, $\bar{x}_{ij} = 1$, при $x_{ij} = x_{ij_{\text{opt}}}$; $\mu(x_{ij})$ – ступінь виконання j -ї якісної вимоги визначається функцією приналежності до якнайкращого значення в межах ($0 < \mu(x_{ij}) < 1$).

Наукова новизна та практична значимість

У статті вперше запропоновано алгоритм зменшення збитку системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць України. Розроблена математична модель розрахунку зменшення збитку СТЕ від відмов силового обладнання ТП за рахунок удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту. Вперше запропоновано показник оцінки запобігання збитку системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць.

Цей підхід зводиться до визначення основних етапів, особливостей та оптимального обґрунтування кількісних і якісних вимог до інтелектуальної системи моніторингу, діагностики та ТО і Р ТП, при допустимих витратах на удосконалення, з метою зменшення збитків системи тягового електропостачання та вирішення проблеми підтримки обладнання ТП у працездатному стані в умовах наростання темпів і обсягів його старіння порівняно з існуючим темпом і обсягами оновлення.

здатному стані в умовах наростання темпів і обсягів його старіння порівняно з існуючим темпом і обсягами оновлення.

Висновки

Вирішення задачі зменшення збитку СТЕ у вигляді (1), (2) зводиться до оптимального обґрунтування кількісних і якісних вимог до системи ІСМД ТО і Р – ТП, яка дозволяє визначити $\max \bar{w}(x_{ij}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, k+m})$ при обмеженні допустимих витрат на систему $C(x_{ij}) \leq C_{\text{доп}}$.

Встановлено, що основними етапами розв'язання задачі зменшення збитку СТЕ електрифікованих залізниць, є:

- збір і обробка експертної інформації про характеристики відмов: ймовірності відмови i -го обладнання P_i і збитку Δq_i ($i = \overline{1, n}$);
- збір і обробка експертної інформації для визначення показника важливості виконання j -ї вимоги для усунення відмови i -го обладнання – α_{ij} ;
- визначення ступеня виконання j -ї якісної вимоги $\mu(x_{ij})$, ($i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$) та кількісної вимоги $\bar{x}_{ij}$, ($i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, k}$);
- оцінка вартості системи ІСМД ТО і Р – ТП для конкретного варіанта її реалізації, залежна від ступеня виконання вимог $C(x_{ij}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, k+m})$;
- розробка моделі для вибору раціонального варіанта побудови системи ІСМД ТО і Р – ТП.

Також цей підхід дозволить визначити найбільш важливі проблеми підтримки основного обладнання ТП СТЕ у працездатному стані, в умовах наростання темпів і обсягів його старіння та відмов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2013 році. – Київ : Дедал, 2014. – 251 с.
2. Борисов, А. Н. Принятие решения на основе нечетких моделей: примеры использования / А. Н. Борисов, О. А. Крумберг, И. П. Федоров. – Рига : Знание, 1990. – 184 с.
3. Интегрированная система управления электрооборудованием железнодорожного транспорта / В. Б. Землянов, А. Н. Пшинько, В. Т. Доманс-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- кий, В. В. Скалозуб // Proc. of the 7th Intern. Scientific Conf. of Railway Experts. «ЖУЖЕЛ» (4.10.-6.10.2000). – Vrnjacka Banja, 2000. – С. 65–68.
4. Капіца, М. І. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів / М. І. Капіца, Р. О. Коренюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 63–66.
 5. Костерев, Н. В. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации / Н. В. Костерев, Е. И. Бардик // Технічна електродинаміка : тем. вип. : Проблеми сучасної електротехніки. – 2006. – Ч. 3. – С. 39–43.
 6. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные сети / В. В. Круглов. – Москва : Физматлит, 2001. – 221 с.
 7. Кузнецов, В. Г. Модель экономического ущерба от ненадежности силового оборудования, участвующего в регулировании режимов системы тягового электроснабжения / В. Г. Кузнецов // Вестн. нац. техн. ун-та «ХПИ». Сер. : «Новые решения в современных технологиях» : сб. науч. тр. – Харьков, 2013. – № 38 (1011). – С. 136–141.
 8. Матусевич, А. А. Построение модели системы защиты информационно-управляющих телемеханических комплексов электроснабжения железных дорог / А. А. Матусевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 14. – С. 59–63.
 9. Матусевич, О. О. Сучасні підходи з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць на основі SMART технологій / О. О. Матусевич // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 4 (52). – С. 75–85. doi: 10.15802/stp2014/27362.
 10. Матусевич, О. О. Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць / О. О. Матусевич // Гірн. електромеханіка та автоматика : наук.-тех. зб. – 2014. – № 92. – С. 31–36.
 11. Методы определения коэффициентов важности критериев / А. М. Анохин, В. А. Глотков, В. В. Павельев, А. М. Черкашин // Автоматика и телемеханика. – 1997. – № 8. – С. 3–35.
 12. Общие технические требования к системам тягового электроснабжения постоянного и переменного тока скоростных и высокоскоростных линий : Рекомендации ОСЖД Р-610/7. – Варшава : Комитет ОСЖД, 2002. – 25 с.
 13. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України : ЦЕ- 0009 : затв. Наказом Укрзалізничі від 24.12.2004 р. № 1010-ЦЗ. – Київ : Укрзалізниця, 2005. – 80 с.
 14. Рекомендації з техніко-економічних розрахунків окремих показників експлуатаційної роботи залізниць : ЦД-0037 : затв. Наказом Укрзалізничі від 18.06.2001 р. № 329-Ц / розроб. О. Ф. Вергун, Л. Ю. Гаркуша. – Київ : Трансп. України, 2001. – 64 с.
 15. Buckley, J. J. Simulating Continuous Fuzzy Systems / J. J. Buckley, L. J. Jowers, K. D. Reilly // Information Sciences. – 2007. – Vol. 177. – Iss. 2. – P. 436–448. doi: 10.1016/j.ins.2006.03.005.
 16. Wang, X. A Hybrid Algorithm to Extract Fuzzy Measures for Software Quality Assessment / X. Wang, M. Ceberio, S. Virani [et. all] // J. of Uncertain Systems. – 2013. – Vol. 7 (3). – P. 219–237.
 17. Yang, H. Measuring Software Product Quality with ISO Standards Base on Fuzzy Logic Technique / H. Yang // Affective Computing and Intelligent Interaction. – 2012. – Vol. 137. – P. 59–67. doi: 10.1007/978-3-642-27866-2_8.
 18. Zadeh, L. A. Fuzzy logic. Computing with words / L. A. Zadeh // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 1996. – Vol. 4, № 2. – P. 103–111. doi: 10.1109/91.493904.
 19. Zemankova-Leech, M. Fuzzy Relational Data Bases: A Key to Expert Systems / M. Zemankova-Leech, A. Kandel. – Cologne : TUV Rheinland, 1984. – 68 p.
 20. Zimmerman, H. Fuzzy Sets Theory – and Its Applications / H. Zimmerman. – Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2001. – 544 p.

А. А. МАТУСЕВИЧ^{1*}

^{1*}Каф. «Електроснабження железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793 19 17, эл. почта al_m0452@meta.ua, ORCID 0000-0002-2174-7774

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА УЩЕРБА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Цель. Исследование предусматривает разработку методики и модели уменьшения ущерба системы тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог Украины. Необходимым является и определение показателя оценки предотвращения ущерба СТЭ электрифицированных железных дорог. Работа также направлена на поиск современных методов и подходов к усовершенствованию системы мониторинга, диагностирования и технического обслуживания СТЭ. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведено исследование зарубежного опыта и публикаций, которые посвящены качественному решению проблем СТЭ с использованием лингвистического подхода на базе теории нечетких множественных чисел и лингвистической переменной. **Результаты.** В результате исследования разработан алгоритм уменьшения ущерба СТЭ, которая функционирует в условиях неопределенности. Установлено, что решение данной проблемы возможно за счет своевременного выявления фактического технического состояния оборудования в условиях проведения качественного технического обслуживания, диагностирования и обновления ресурса электротехнического оборудования тяговых подстанций (ТП) СТЭ. При проведении исследования рассмотрена схема нечеткого вывода, который базируется на применении механизма минимизации области принятия решений. Это способствует не только структурной идентификации в процессе формирования базы данных, но и позволяет значительно повысить продуктивность нахождения параметров нечеткой модели, которая, в свою очередь, уменьшает усилия, необходимые для анализа и проектирования эффективных систем управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТО и Р) СТЭ. **Научная новизна.** Впервые предложен алгоритм уменьшения ущерба системы тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог Украины. Разработана математическая модель расчета уменьшения ущерба СТЭ от отказов силового оборудования ТП за счет усовершенствования системы ТО и Р. Впервые предложен показатель оценки предотвращения ущерба системы тягового электроснабжения. **Практическая значимость.** В статье рассмотрена схема нечеткого вывода, который базируется на применении механизма минимизации области принятия решений и способствует не только структурной идентификации в процессе формирования базы данных, но и позволяет значительно повысить производительность определения параметров нечеткой модели. Внедрение данного подхода сводится к определению основных этапов, особенностей и оптимального обоснования количественных и качественных требований к системе ТО и Р ТП. Это достигается при допустимых расходах на усовершенствование с целью уменьшения ущерба СТЭ и решения проблемы поддержания оборудования ТП в работоспособном состоянии в условиях нарастания темпов и объемов его старения (в сравнении с существующим темпом и объемами обновления).

Ключевые слова: электрифицированные железные дороги; система тягового электроснабжения; тяговая подстанция; электрооборудование; уменьшение ущерба; техническое обслуживание и ремонт; диагностирование; фактическое техническое состояние; показатель оценки уменьшения ущерба; нечеткие множества; лингвистические переменные

О. О. MATUSEVYCH^{1*}

^{1*}Dep. «Power Supply of Railway Transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 17, e-mail al_m0452@meta.ua, ORCID 0000-0002-2174-7774

MATHEMATICAL MODEL OF THE DAMAGE ANALYSIS OF RAILWAY TRACTION ENERGY SYSTEM

Purpose. The study provides the methods and models development of reducing damages of traction energy systems (TES) at electrified railways of Ukraine. Definition the indicator of preventing damage evaluation TES at electrified railways is necessary. Paper is aimed to search the modern methods and approaches to improve the system of TES monitoring, diagnosis and maintenance. **Methodology.** To achieve this purpose a study of foreign experience and publications that focus on problem-solving quality of TES using a linguistic approach based on the theory of fuzzy multiple numbers and linguistic variable were done. **Findings.** In result of research an algorithm to reduce TPS damages which operates under uncertainty was developed. It is found that the solution of this problem is possible by timely detection of actual technical condition of equipment in terms of quality maintenance, diagnostics and update resource of electrical equipment traction substations (TS) power supply TES. The study examined the fuzzy inference scheme, which is based on the use of mechanisms to minimize the area of decision-making. It contributes

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

not only to structural identification in the process of developing a database, but also can significantly improve the efficiency of finding the parameters of fuzzy model, which in turn reduces the efforts that are necessary for the analysis and the design of effective control systems maintenance and repair (M and R) TES. **Originality.** For the first time the algorithm of reduction the damage of traction energy system of electrified railways of Ukraine was offered. The mathematical model of reduction the damage calculation of TES from TP power equipment failures by improving system maintenance (M and P) was developed. Firstly evaluation index was proposed to prevent the damage of traction energy system. **Practical value.** The article describes the fuzzy inference scheme, which is based on the use of the mechanism to minimize the area of decision-making and contributes not only to structural identification in the process of developing a database, but also can significantly improve the performance of determining the parameters of fuzzy model. Implementation of this approach comes to the determination of the main stages, features and optimal justification of quantitative and qualitative requirements for system M and R of TS. It will be done with allowable costs for improvements to reduce TPS damage and address the equipment of traction substations in working condition in terms of growth rates and volumes aging (compared to the current speed and volume of updates).

Keywords: electrified railway; traction energy system; traction substation; electrical equipment; reduction the damage; maintenance and repair; diagnosis; actual technical condition; evaluation index of reduction the damage; fuzzy sets; linguistic variables

REFERENCES

1. *Analiz roboty hospodarstva elektryfikatsii ta elektropostachannia v 2013 rotsi* [Analysis of the electrification work and electricity supply in 2013]. Kyiv, Devalta Publ., 2014. 251 p.
2. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Prinyatiye resheniya na osnove nechetkikh modeley: primery ispolzovaniya* [Decision making based on fuzzy models: examples of usage]. Riga, Znaniye Publ., 1990. 184 p.
3. Zemlyanov V.B., Pshinko A.N., Domanskiy V.T., Skalozub V.V. *Integrirovannaya sistema upravleniya elektrosnabzheniyem zheleznodorozhnogo transporta* [The integrated power management system of railway transport]. Proc. of 7th Intern. Sci. Conf. of Railway Experts. «ЖУЖЕЛ» (4.10.-6.10.2000). Vrnjacka Banja, 2000, pp. 65-68.
4. Kapitsa M.I., Koreniuk R.O. *Stratehii ekspluatatsii, tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu lokomatyviv* [Strategies for the operation, maintenance and locomotive repair]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 63-66.
5. Kosterev N.V., Bardik Ye.I. *Nechetkoye modelirovaniye elektrooborudovaniya dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i prinyatiya resheniy o strategii dalneyshey ekspluatatsii* [Fuzzy modeling of electrical equipment for technical condition assessment and decision-making about the strategy of further exploitation]. *Tekhnichna Elektrodynamika. Problemy suchasnoi elektrotekhniki – Technical Electrodynamics. Problems of Modern Electrical Engineering*, 2006, part 3, pp. 39-43.
6. Kruglov V.V. *Nechetkaya logika i iskusstvennye seti* [Fuzzy logic and artificial networks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 221 p.
7. Kuznetsov V.G. *Model ekonomicheskogo ushcherba ot nenadezhnosti silovogo oborudovaniya, uchastvuyushchego v regulirovanii rezhimov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya* [The model of economic losses due to the unreliability of power equipment that is involved in the modes regulation of traction power supply system]. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KPI». Novyye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh* [Bulletin of the National Technical University KhPI. New solutions in modern technologies.], Kharkiv, 2013, no. 38 (1011), pp. 136-141.
8. Matusevich A.A. *Postroeniye modeli sistemy zashchity informatsionno-upravlyayushchikh telemekhanicheskikh kompleksov elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog* [Building a model system for the protection of information-control telemechanical railway power supply systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 14, pp. 59-63.
9. Matusevich O.O. *Suchasni pidkhody z tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu obladnannia tiahovykh pidstantsii elektryfikovanykh zaliznyts na osnovi SMART tekhnolohii* [New approaches to maintenance and repairing of the traction substations equipment on electrified railways on the basis of SMART-technologies]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zal-*

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- iznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 4 (52), pp. 75-85. doi: 10.15802/stp2014/27362.
10. Matusевич О.О. Udoshkonalennia systemy diahnostuvannia sylovykh transformatoriv tiahovykh pidstantsii elektryfikovanykh zaliznyts [Improvement of the diagnostics system of power transformers traction substation of electrified railways]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka. Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk* [Collection of Mining Electromechanics and Automation], 2014, no. 92, pp. 31–36.
 11. Anokhin A.M., Glotkov V.A., Pavelev V.V., Cherkashin A.M. Metody opredeleniya koeffitsientov vazhnosti kriteriyev [Methods of the coefficients importance criteria determination]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and remote control*, 1997, no. 8, pp. 3-35.
 12. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya k sistemam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo i peremennogo toka skorostnykh i vysokoskorostnykh liniy: Rekomendatsii OSZhD R-610/7. [General technical requirements for traction power supply systems, AC and DC speed and high-speed lines: Recommendations OSJD R-610/7]. Varshava, Komitet OSZhD Publ., 2002. 25 p.
 13. Pravyla ulashtuvannia systemy tiahovoho elektropostachannia zaliznyts Ukrainy. TsE-0009 [Rules arrangement of the traction power supply system of railways of Ukraine. TsE-0009]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2005. 80 p.
 14. Verhun O.F., Harkusha L.Yu. Rekomendatsii z tekhniko-ekonomichnykh rozrakhunkiv okremykh pokaznykiv ekspluatatsiinoi roboty zaliznyts. TsD-0037 [Recommendations on technical and economic calculations of individual operational performance of the Railways. TsD-0037]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2001. 64 p.
 15. Buckley J.J., Jowers L.J., Reilly K.D. Simulating Continuous Fuzzy Systems. *Information Sciences*, 2007, vol. 177, issue 2, pp. 436-448. doi: 10.1016/j.ins.2006.03.005.
 16. Wang X., Ceberio M., Virani S., Garcia A., Cummins J. Hybrid Algorithm to Extract Fuzzy Measures for Software Quality Assessment. *Journal of Uncertain Syste*, 2013, vol. 7 (3), pp. 219-237.
 17. Yang H. Measuring Software Product Quality with ISO Standards Base on Fuzzy Logic Technique. *Affective Computing and Intelligent Interaction*. Berlin, Springer-Verlag Publ., 2012, vol. 137, pp. 59-67. doi: 10.1007/978-3-642-27866-2_8.
 18. Zadeh L.A. Fuzzy logic. Computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1996, vol. 4, no.2, pp. 103-111. doi: 10.1109/91.493904.
 19. Zemankova-Leech M., Kandel A. Fuzzy Relational Data Bases: A Key to Expert Systems. Cologne, TUV Rheinland Publ., 1984. 68 p.
 20. Zimmerman H. Fuzzy Sets Theory – and Its Applications. Netherlands, Kluwer Academic Publishers Publ., 2001. 544 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. В. Хворостом (Україна);
д.т.н., доц. В. Г. Сиченком (Україна)

Надійшла до редколегії 20.02.2015

Прийнята до друку 15.05.2015

УДК 629.423.31.016.56

В. Ф. НОВИКОВ^{1*}

^{1*} Отдел «Электротехнические комплексы», Институт транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины, ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (066) 01 99 673, эл. почта nvf2005@ua.fm, ORCID 0000-0002-1695-2714

**ПОДТВЕРЖДЕНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Цель. Для снижения трудозатрат и объёма машинного времени при проектировании линейных синхронных двигателей с возбуждением от источника постоянного магнитного поля высокоскоростного наземного транспорта необходимо использовать инженерную методику. Целью данного исследования является подтверждение адекватности предложенной ранее математической модели такого двигателя и принятых допущений. Предполагается также подтвердить возможность применения метода расчёта тягового усилия, возникающего в двигателе при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. **Методика.** Поскольку для эмпирических теорий положительный результат эксперимента не является стопроцентным доказательством истинности, для однозначного заключения об адекватности разработанной модели и эффективности разработанных методов необходимо произвести их проверку на фальсифицируемость. В соответствии с этим критерием необходимо не просто провести эксперимент, результаты которого совпадут с расчётными, но нужно ещё избежать ошибок, вызванных случайным их совпадением. Для этого проводится эксперимент с изменяющимися параметрами. **Результаты.** В критическом эксперименте изменения конфигурации системы возбуждения проведены так, чтобы формы зависимости тягового усилия от смещения существенно отличались. Сравнение результатов расчётных и экспериментальных значений тягового усилия для различных конфигураций показало, что различия незначительны и легкообъяснимы погрешностью измерений и неравномерностью зазоров между полюсами возбуждения и катушками путевой структуры. **Научная новизна.** Доказана адекватность математической модели линейного синхронного двигателя без ферромагнитного магнитопровода и принятых допущений, а также применимость метода расчёта тягового усилия, возникающего в нём, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. Данное доказательство построено на проведении критического эксперимента путём сравнения расчётных и экспериментально полученных значений величины тягового усилия для различных конструкций линейного синхронного двигателя. **Практическая значимость.** В работе доказана адекватность математической модели линейного синхронного двигателя высокоскоростного транспорта с возбуждением от источника постоянного магнитного поля и принятых допущений. Автором также доказана применимость метода расчёта тягового усилия, возникающего в нём, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. Применение подобной методики позволит снизить трудозатраты и объём машинного времени при проектировании линейных синхронных двигателей с возбуждением от источника постоянного магнитного поля высокоскоростного наземного транспорта.

Ключевые слова: высокоскоростной наземный транспорт; линейный синхронный двигатель; критерий Поппера; критический эксперимент; постоянный магнит

Введение

Для обеспечения возможности рационального выбора конструктивных параметров линейного синхронного двигателя [2; 3; 7; 9; 10; 11; 13] высокоскоростного магнитолевитирующего экипажа [2; 4; 12] с возбуждением от постоянных магнитов, т.е. для решения обратной задачи с некорректными условиями, необходимо иметь инженерный (не связанную с большим объёмом вычислений) метод определения тягового усилия,

возникающего при взаимодействии магнитного поля возбуждения с током в катушках путевой структуры. Работоспособность этого метода нуждается в доказательстве.

Цель

Целью данного исследования является подтверждение адекватности математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимость метода

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры [8].

Методика

Из общего курса философии известно, что единственным критерием истины является практика [5]. Поэтому, подтверждением адекватности математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимость метода расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры может являться только соответствие полученных теоретических и экспериментальных данных.

С другой стороны, из того же общего курса философии известно, что доказательством некорректности может служить даже единичный отрицательный результат, а положительный результат сам по себе не является доказательством истинности эмпирической теории.

Данное противоречие может быть разрешено, если обратиться к гносеологии. Сэр Karl Raimund Popper, являющийся основоположником критического рационализма, разработал метод определения научности теоретических посылок – критерий фальсифицируемости, часто называемый критерием Поппера. Теория является фальсифицируемой и, соответственно, научной в том случае, если существует методологическая возможность ее опровержения путём постановки того или иного эксперимента, даже если такой эксперимент еще не был поставлен [1].

В соответствии с этим критерием, необходимо не просто провести эксперимент, результаты которого совпадут с расчетными, но нужно еще избежать ошибок, вызванных случайным их совпадением. Для этого необходимо провести эксперимент с изменяющимися параметрами.

Допустим, что в результате проведения эксперимента измеренная зависимость силы от смещения совпала с расчетной.

Вероятность случайного совпадения сложных кривых достаточно низка, но для постановки критического эксперимента ее можно

принять $p_1 = 0,5$.

Будем считать, что при изменении конструкции вероятность случайного совпадения кривых тоже $p_2 = 0,5$.

Аналогично, для следующего изменения конструкции – $p_3 = 0,5$ и так далее.

При существенном изменении конструкции линейного двигателя и, соответственно, существенном изменении формы зависимости силы тяги от смещения можно считать каждое измерение независимым событием. Следовательно, вероятность случайного совпадения формы зависимости силы от смещения составляет

$$p_{1-2} = p_1 \times p_2 = 0,5 \times 0,5 = 0,25.$$

Для трех кривых

$$p_{1-2-3} = p_1 \times p_2 \times p_3 = 0,5 \times 0,5 \times 0,5 = 0,125.$$

После четвертого эксперимента данная вероятность составляет

$$\begin{aligned} p_{1-2-3-4} &= p_1 \times p_2 \times p_3 \times p_4 = \\ &= 0,5 \times 0,5 \times 0,5 \times 0,5 = 0,0625. \end{aligned}$$

Уже после четырех независимых измерений вероятность случайного совпадения теоретических и экспериментальных результатов составляет 6,25 %, что ниже средней погрешности экспериментальных исследований. С учетом того, что вероятность случайного совпадения сложных кривых гораздо ниже принятого значения $p = 0,5$, можно считать, что эксперимент с четырьмя независимыми измерениями является критическим. Это даст возможность сделать заключение об адекватности математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимость метода расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры.

Для проведения критического эксперимента необходимо решить следующие задачи:

- разработка экспериментального стенда;
- разработка метода определения знакопеременного тягового усилия, возникающего в линейном двигателе;
- изменение геометрических параметров линейного двигателя, приводящего к сущест-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

венному изменению формы кривой тягового усилия.

Для экспериментального исследования линейного тягового электропривода на опытно-экспериментальном полигоне ИТСТ НАНУ «Трансмаг» был создан стенд. Экспериментальный стенд для исследования ЛСТЭП включает в себя путевую эстакаду, транспортное средство и преобразователь частоты с непосредственной связью. Путевая эстакада (рис. 1) представляет собой конструкцию, изготовленную из немагнитного алюминиевого профиля 1, которая посредством опор 3 крепится к фундаментным блокам 4. Эстакада по общей длине состоит из двух секций. Первая секция длиной 8 750 мм находится в неотапливаемом ангаре 5 и является продолжением четырехточечного стенда электродинамического подвеса 6 [8].

Вторая секция длиной 21 250 мм является продолжением первой секции и расположена на открытом воздухе. Соединение секций между собой осуществляется посредством опускаемого моста 7.

После окончания экспериментов мост 7 опускается, что необходимо для закрытия ворот ангара.

На путевой эстакаде уложены два ряда путевых катушек, которые крепятся на немагнитных подложках. Длинные стороны путевых катушек расположены в направлении перемещения платформы. На эстакаде закреплены направляющие рельсы, которые используются для опирания ТС. Рядом с направляющими рельсами размещается датчик положения.

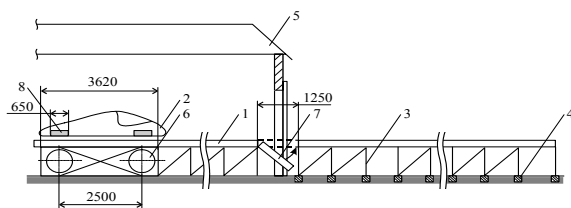


Рис. 1. Стенд для исследования ЛСЭД

Fig. 1. Stand for research LSEM

Линейный синхронный двигатель служит для перемещения ТС вдоль экспериментального стенда. Система возбуждения образуется четырьмя сверхпроводящими магнитами 8, расположенными на транспортном средстве 2, которые можно заменить блоками постоянных магнитов. Трехфазная путевая обмотка образо-

вана катушками, выполненными из прямоугольного медного провода. Ряды катушек расположены друг от друга с межосевым расстоянием 1 600 мм, равным поперечному расстоянию между осями сверхпроводящих магнитов. Продольное расстояние между осями магнитов макетного образца ВСНТ равно 2 500 мм, поэтому шаг размещения катушек путевой обмотки принят равным $2500/6=416,6$ мм.

В рабочем режиме транспортное средство 2 перемещается на колесах по рельсам. При этом электромагнитный зазор между плоскостями средних сечений обмоток двигателя составляет 110 мм, а зазор в свету лежит в пределах 15–18 мм. Для управления работой ЛСД имеется датчик положения ТС относительно путевой структуры. Датчик конструктивно состоит из излучателя, расположенного на движущемся ТС, и приемника, размещенного на эстакаде.

Для оценки качества математической модели можно выполнить сравнение расчетного и измеренного тягового усилия. В литературе не описаны методы измерения знакопеременных тяговых усилий вдоль оси перемещения при отсутствии механической связи между транспортным средством и эстакадой в направлении перемещения, поэтому нами было предложено следующее техническое решение [6].

Измерения производились косвенным методом, в связи с тем, что напрямую мгновенные динамические усилия, действующие на транспортное средство, измерить не представлялось возможным. Фактически измерялись усилия, действующие на транспортное средство при смещении его вдоль путевой структуры в условиях зафиксированных мгновенных распределений токов в фазах путевой структуры и, соответственно, при фиксированных распределениях магнитного поля вдоль путевой структуры. Для моделирования мгновенных значений токов в фазах использовался постоянный ток.

В качестве ТС вместо макетного экипажа при постановке критического эксперимента, связанного с существенным изменением конструктивных параметров, используется экспериментальная тележка, выполненная из алюминиевых труб 1 прямоугольного профиля. На ней крепятся колеса 2, движущиеся по направляющим рельсам стенда и блоки постоянных магнитов возбуждения 3 (рис. 2).

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

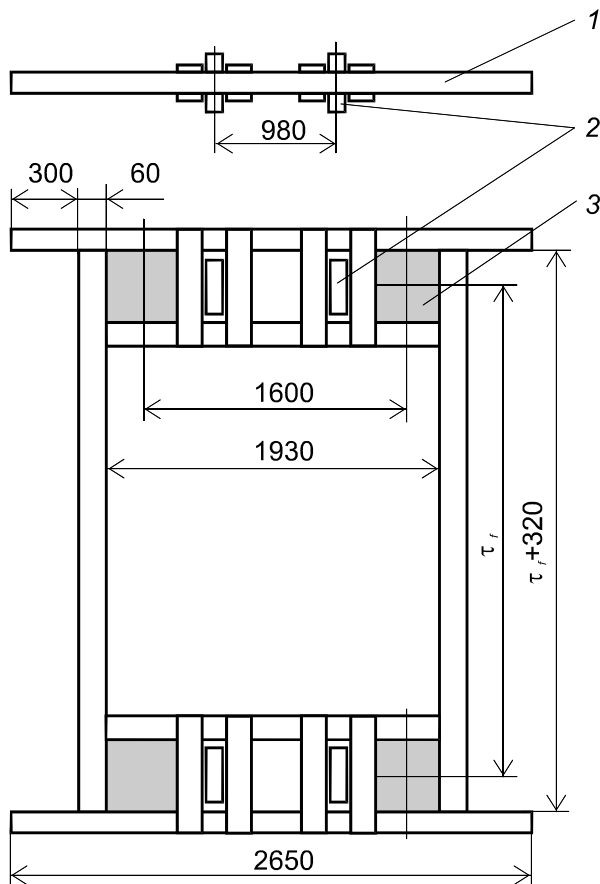


Рис. 2. Экспериментальная тележка

Fig. 2. Experimental bogie

Для сглаживания пульсаций тягового усилия необходимо подавить пятую и седьмую гармоники потокоцепления, так как более высокие гармоники существенного влияния на форму кривой усилия не оказывают.

Для подавления высших гармоник в электрических машинах применяются различные методы, среди которых изменение длины полюсов, укорочение шага обмотки и т.д.

Для экспериментального подтверждения адекватности математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимости метода расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры выбраны следующие конфигурации систем возбуждения:

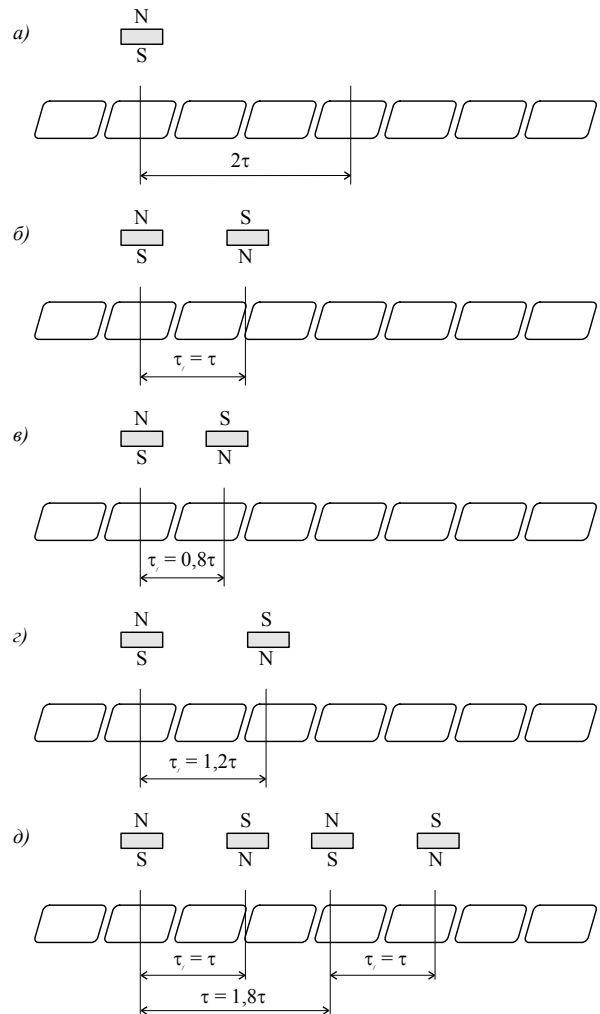


Рис. 3. Конфигурации систем возбуждения

Fig. 3. Configuration of excitation systems

Результаты

Результаты сравнения расчетных (кривая 2) и экспериментальных значений (кривая 1) для различных конфигураций системы возбуждения приведены на рис. 4–7.

Как видно из рис. 4, результирующая сила является крайне неравномерной. На периоде имеются 3 зоны отсутствия силы тяги. Причем основной вклад в несинусоидальность э.д.с. и размах усилий вносит 2-я гармоника потокоцепления.

С целью подавления четных гармоник потокоцепления добавляется еще один блок магнитов противоположной полярности, смещенный относительно первого на величину полюсного деления τ (рис. 3, б). В данном случае (рис. 5)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

на кривой зависимости усилия от смещения отсутствуют провалы, но наблюдается влияние 5-й и 7-й гармоник.

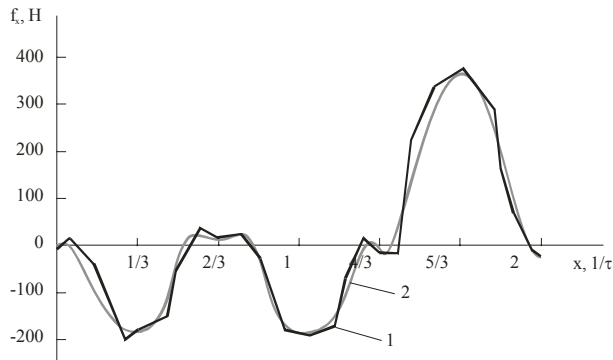


Рис. 4. Зависимость тягового усилия от смещения для конфигурации системы возбуждения (рис. 3, а)

Fig. 4. The dependence of the driving force of the offset configuration of the excitation system (Fig. 3, a)

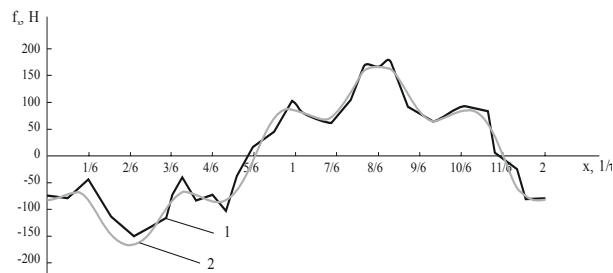


Рис. 5. Зависимость тягового усилия от смещения для конфигурации системы возбуждения (рис. 3, б)

Fig. 5. The dependence of the driving force of the offset configuration of the excitation system (Fig. 3, b)

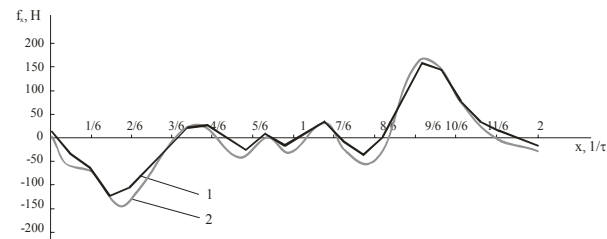


Рис. 6. Зависимость тягового усилия от смещения для конфигурации системы возбуждения (рис. 3, в, г)

Fig. 6. The dependence of the driving force of the offset configuration of the excitation system (Fig. 3, c, d)

В случае линейного двигателя с парными полюсами относительное укорочение шага путевой обмотки (увеличение шага обмотки возбуждения) (рис. 3, в, г) приводит не столько к подавлению высших нечетных гармоник,

сколько к росту четных, в частности второй (рис. 6).

Был предложен способ косвенного увеличения длины полюсов возбуждения. Данный способ заключается в сдвиге одной пары полюсов возбуждения относительно другой на $0,2\tau$, причем внутри пары расстояние между полюсами остается неизменным (рис. 3, е).

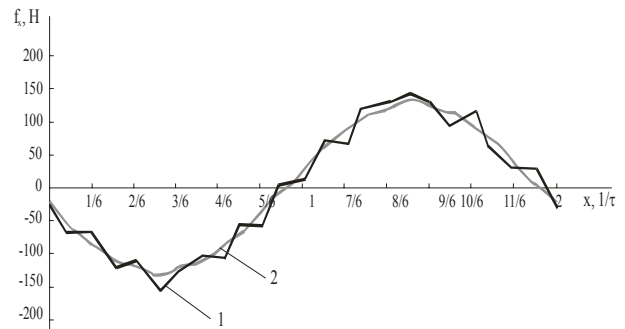


Рис. 7. Зависимость тягового усилия от смещения для конфигурации системы возбуждения (рис. 3, д)

Fig. 7. The dependence of the driving force of the offset configuration of the excitation system (Fig. 3, e)

В этом случае применим принцип суперпозиции в силу того, что в конструкции путевой структуры отсутствует магнитопровод, а блоки магнитов находятся за пределами области влияния друг на друга.

Зависимость тягового усилия от смещения (рис. 7) в данном случае имеет практически синусоидальный характер. Существующие отличия легко объяснимы погрешностью измерений и неравномерностью зазоров между полюсами возбуждения и катушками путевой структуры.

Научная новизна и практическая значимость

Доказана адекватность математической модели линейного синхронного двигателя и принятых допущений, а также применимость метода расчета тягового усилия, возникающего в нем, при взаимодействии постоянного магнитного поля системы возбуждения транспортного средства с катушкой путевой структуры. Данное доказательство построено на проведении критического эксперимента путем сравнения расчетных и экспериментально полученных значений величины тягового усилия для различных конструкций линейного синхронно-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

го двигателя без ферромагнитного магнитопровода с возбуждением от постоянных магнитов высокоскоростного магнитолевитирующего транспортного средства.

Выводы

Для снижения трудозатрат и объема машинного времени при проектировании линейных синхронных двигателей с возбуждением от источника постоянного магнитного поля высокоскоростного наземного транспорта можно использовать инженерную методику.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Введение в философию : учеб. пособие для вузов / Фролов И. Т. [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Республика, 2003. – 623 с.
2. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев [и др.]. – Киев : Наук. думка, 2001. – 479 с.
3. Исследование математической модели привода с линейным синхронным двигателем в переходных режимах / А. Н. Зайцев, В. Э. Воскобойник, С. В. Комаров, А. С. Ворошилов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 11. – С. 155–159.
4. Корниенко, В. В. Высокоскоростной электрический транспорт: Мировой опыт / В. В. Корниенко, В. И. Омеляненко. – Харьков : НТУ ХПИ, 2007. – 159 с.
5. Ленин, В. И. Материализм и эмпириокритицизм / В. И. Ленин. – Москва : Звено, 1926. – 400 с.
6. Новиков, В. Ф. Усилия в линейном синхронном двигателе испытательного участка / В. Ф. Новиков, А. С. Ворошилов, В. И. Матин // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2001. – Вип. 9. – 184 с.
7. Поляков, В. А. Терминальное управление движением магнитолевитирующего поезда с использованием линейного синхронного двигателя / В. А. Поляков, Н. М. Хацапуридзе // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 138–145.
8. Расчётно-экспериментальный метод определения потокоцепления / В. Ф. Новиков, С. В. Бурьлов, В. Э. Воскобойник, В. А. Дзензерский // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 5. – 240 с.
9. Characteristic research of electromagnetic force for mixing suspension electromagnet used in low-speed maglev train / Sh.-K. Liu, B. An, S.-K. Liu, Zh.-J. Guo // IET Electric Power Applications. – 2015. – Vol. 9. – Iss. 3. – P. 223–228. doi: 10.1049/iet-epa.2013.0414.
10. Hengkun, L. Thrust for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor / L. Hengkun, C. Hu // Applied Mathematics & Information Science. – 2015. – № 2. – P. 927–933.
11. Huang, W. A new modular and complementary double-sided linear flux-switching permanent magnet motor with yokeless secondary / W. Huang, M. Cheng, C. Ruiwu // Electrical Machines and Systems (ICEMS) : 17th Intern. Conf. (22.10.-25.10.2014). – Hangzhou, 2014. – P. 3648–3652. doi: 10.1109/icems.2014.7014124.
12. Liu, Zh. Maglev Train Overview / Zh. Liu, Zh. Long, X. Li // Springer Tracts in Mech. Engineering. – 2015. – P. 1–28. doi: 10.1007/978-3-662-45673-6_1.
13. Optimization of Multi-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator Based 8 Blade Magnetically Levitated Variable Pitch Low Speed Vertical Axis Wind Turbine / M. S. A. Khan, R. K. Rajkumar, R. K. Rajkumar, C. V. Aravind. // Applied Mech. and Materials. – 2014. – Vol. 492. – P. 113–117. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.492.113.

В. Ф. НОВІКОВ^{1*}

^{1*}Відділ «Електротехнічні комплекси», Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (066) 01 99 673, ел. пошта nvf2005@ua.fm, ORCID 0000-0002-1695-2714

ПІДТВЕРДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛІНІЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Мета. Для зниження трудовитрат та обсягу машинного часу при проектуванні лінійних синхронних двигунів із порушенням від джерела постійного магнітного поля високошвидкісного наземного транспорту необхідно використовувати інженерну методику. Метою даного дослідження є підтвердження адекватності запропонованої раніше математичної моделі такого двигуна та прийнятих припущень. Передбачається також підтвердити можливість застосування методу розрахунку тягового зусилля, що виникає в двигуні при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. **Методика.** Оскільки для емпіричних теорій позитивний результат експерименту не є стовідсотковим доказом істинності, для однозначного висновку про адекватність розробленої моделі та ефективності розроблених методів необхідно провести їх перевірку на фальсифіковність. Відповідно до цього критерію необхідно не просто провести експеримент, результати якого співпадуть із розрахунковими, але потрібно ще уникнути помилок, викликаних випадковим їх збігом. Для цього проводиться експеримент зі змінними параметрами. **Результати.** У критичному експерименті зміни конфігурації системи збудження проведені так, щоб форми залежності тягового зусилля від зсуву суттєво відрізнялися. Порівняння результатів розрахункових та експериментальних значень тягового зусилля для різних конфігурацій показало, що відмінності незначні та легкопояснювальні похибкою вимірювань, і нерівномірністю зазорів між полюсами збудження й котушками шляхової структури. **Наукова новизна.** Доказано адекватність математичної моделі лінійного синхронного двигуна без феромагнітного магнітопроводу та прийнятих припущень, а також застосовність методу розрахунку тягового зусилля, яке виникає в ньому, при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. Даний доказ побудовано на проведенні критичного експерименту шляхом порівняння розрахункових та експериментально отриманих значень величини тягового зусилля для різних конструкцій лінійного синхронного двигуна. **Практична значимість.** У роботі доведено адекватність математичної моделі лінійного синхронного двигуна високошвидкісного транспорту з порушенням від джерела постійного магнітного поля та прийнятих припущень. Автором також доведена застосовність методу розрахунку тягового зусилля, що виникає в ньому, при взаємодії постійного магнітного поля системи збудження транспортного засобу з котушкою шляхової структури. Застосування такої методики дозволить знизити трудовитрати й обсяг машинного часу при проектуванні лінійних синхронних двигунів із порушенням від джерела постійного магнітного поля високошвидкісного наземного транспорту.

Ключові слова: високошвидкісний наземний транспорт; лінійний синхронний двигун; критерій Поппера, критичний експеримент; постійний магніт

V. F. NOVIKOV^{1*}

^{1*}Dep. «Electrical Systems», Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskiy St., 5, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (066) 01 99 673, e-mail nvf2005@ua.fm, ORCID 0000-0002-1695-2714

CONFIRMATION OF THE MATHEMATICAL MODEL ADEQUACY OF A LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR

Purpose. To reduce labor costs and the amount of computer time in the design of linear synchronous motors with excitation from a source of a constant magnetic field of high-speed ground transportation it is necessary to use engineering methods. The purpose of this study is to confirm the adequacy of the previously proposed mathematical model of this engine and assumptions. It is also intended to confirm the possibility of applying the method of calcu-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

lation of traction that occurs in the engine in the interaction of the permanent magnetic field of the excitation system of a vehicle with a coil track structure. **Methodology.** As for empirical theories the positive result of the experiment is not absolute proof of the truth, for an unambiguous conclusion about the adequacy of the developed model and the effectiveness of the developed methods need to be tested for falsification. In accordance with this criterion, it is necessary to conduct an experiment, the results of which will coincide with the calculation but you also need to avoid errors caused by random coincidences. For this purpose the experiments with varying parameters are conducted. **Findings.** In a critical experiment configuration changes of the excitation system were held so that the shape dependence of traction from displacement is differed significantly. The comparison of the results of the calculated and experimental values of traction for different configurations showed that the differences are minor and easily explained by measurement error and uneven gaps between the poles and excitation coils of the track structure. **Originality.** The adequacy of the mathematical model of a linear synchronous motor without a ferromagnetic magnetic circuit and the assumptions and applicability of the calculation method of traction forces involved in it, at the interaction of a permanent magnetic field of the excitation system of a vehicle with a coil track structure were proved. This proof is built on conducting a critical experiment by comparing the calculated and experimentally obtained values of the magnitude of traction for different structures of the linear synchronous motor. **Practical value.** The adequacy of the mathematical model of a linear synchronous motor of high-speed transport with the excitation of the DC magnetic field and the accepted assumptions is proved in this paper. The author also proved the applicability of the method of calculation of traction that occurs in it, the interaction of static magnetic field of the excitation system of a vehicle with a coil track structure. The use of this technique will reduce the amount of labor and machine time for the design of linear synchronous motors from the DC magnetic field of high-speed ground transportation.

Keywords: high-speed ground transportation; linear synchronous motor; Popper's criterion; critical experiment; permanent magnet

REFERENCES

1. Frolov I.T. *Vvedeniye v filosofiyu* [Introduction to philosophy]. Moscow, Respublika Publ., 2003. 623 p.
2. Dzenzerskiy V.A., Omelyanenko V.I., Vasilev S.V., Matin V.I., Sergeyev S.A. *Vysokoskorostnoy magnitnyy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiey* [High-speed transport with magnetic electrodynamic levitation]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2001. 479 p.
3. Zaytsev A.N., Voskoboynik V.E., Komarov S.V., Voroshilov A.S. Issledovaniye matematicheskoy modeli privoda s lineynym sinkhronnym dvigatelem v perekhodnykh rezhimakh [Research of mathematical model of the actuator with a linear synchronous motor in transient modes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2006, issue 11, pp. 155-159.
4. Korniyenko V.V., Omelyanenko V.I. *Vysokoskorostnoy elektricheskyy transport: Mirovoy opyt* [High-speed electric vehicles: World experience]. Kharkov, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Publ., 2007. 159 p.
5. Lenin V.I. *Materializm i empiriokrititsizm* [Materialism and empiriocriticism]. Moscow, Zveno Publ., 1926, 400 p.
6. Novikov V.F., Voroshilov A.S., Matin V.I. Usiliya v lineynom sinkhronnom dvigatele ispytatelnogo uchastka [Efforts in the linear synchronous motor of test site]. *Transport: Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Transport: Proc. of Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport], 2001, issue 9, 184 p.
7. Polyakov V.A., Khachapuridze N.M. Terminalnoye upravleniye dvizheniyem magnitolevitiruyushchego poyezda s ispolzovaniyem lineynogo sinkhronnogo dvigatelya [Terminal control the movement of the magnetic levitating train using linear synchronous motor]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2006, issue 12, pp. 138-145.
8. Novikov V.F., Burylov S.V., Voskoboynik V.E., Dzenzerskiy V.A. Raschetno-eksperimentalnyy metod opredeleniya potokostsepleniya [Calculation-experimental method for the determination of flux linkage]. *Transport: Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Transport: Proc. of Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport], 2004, issue 5, 240 p.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

9. Liu Sh.-K., An B., Liu S.-K., Guo Zh.-J. Characteristic research of electromagnetic force for mixing suspension electromagnet used in low-speed maglev train. *IET Electric Power Applications*, 2015, vol. 9, issue 3, pp. 223–228. doi: 10.1049/iet-epa.2013.0414.
10. Hengkun, L., Hu C. Thrust for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor. *Applied Mathematics & Information Science*, 2015, no. 2, pp. 927–933.
11. Huang W., Cheng M., Ruiwu C. A new modular and complementary double-sided linear flux-switching permanent magnet motor with yokeless secondary. *Electrical Machines and Systems (ICEMS) : 17th International Conference (22.10.-25.10. 2014)*. Hangzhou, 2014, pp. 3648–3652. doi: 10.1109/icems.2014.7014124.
12. Liu Zh., Long Zh., Li X. Maglev Train Overview. *Springer Tracts in Mech. Engineering*, 2015, pp. 1–28. doi: 10.1007/978-3-662-45673-6_1.
13. Khan M. S. A., Rajkumar R.K., Rajkumar R.K., Aravind C.V. Optimization of Multi-Pole Permanent Magnet Synchronous Generator Based 8 Blade Magnetically Levitated Variable Pitch Low Speed Vertical Axis Wind Turbine. *Applied Mech. and Materials*, 2014, vol. 492, pp. 113–117. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.492.113.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. А. М. Афанасовым (Украина),
д.т.н., ст. науч. сотр. Н. А. Радченко (Украина)

Поступила в редколлегию 03.04.2015

Принята к печати 13.06.2015

УДК 656–026.661(1–21)

К. О. СОРОКА^{1*}, Д. О. ЛИЧОВ²

^{1*}Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, Харків, Україна, 61002, тел. + 38 (97) 499 24 95, ел. пошта sorokahome@rambler.ru, ORCID 0000-0001-9091-6861

²Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, Харків, Україна, 61002, тел. + 38 (050) 996 27 86, ел. пошта dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985

ЗМІСТОВНА МОДЕЛЬ ТА РІВНЯННЯ РУХУ
ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Мета. В статті розглянуто удосконалення методів розрахунку кривих руху електротранспорту та затрат електроенергії із метою підвищення продуктивності й точності розрахунків. **Методика.** В основу методики покладені загальні принципи математичного моделювання, коли створюється змістовна модель предметної області, на основі якої будується математична модель із певним математичним апаратом. Розглянуто питання побудови удосконаленої змістовної моделі руху засобів електричного транспорту та відповідної математичної моделі. **Результати.** Авторами запропонована модель, в якій транспортний засіб представляється системою взаємодіючих матеріальних точок, між якими встановлено певні типи зв'язків, та на яку діють зовнішні сили. Як математичний апарат використано рівняння Ейлера-Лагранжа другого роду. Розглянуто консервативні та дисипативні сили, що зумовлюють динаміку системи. Запропоновано формули розрахунку кривих руху з урахуванням витрат електроенергії. **Наукова новизна.** В роботі одержана змістовна модель руху засобів електротранспорту з розподіленою масою як системи взаємозв'язаних матеріальних точок із накладених на неї зв'язками. В найбільш простому вигляді система має одну ступінь вільності. Математична модель руху транспортного засобу побудована на основі рівнянь Лагранжа. Вказаний підхід дозволяє детально, фізично обгрунтовано описати динаміку засобів електротранспорту. Для засобів міського електротранспорту одержані суттєво точніші рівняння розрахунку кривих руху, ніж рекомендовані в навчальних посібниках та нормативній документації. Розраховано криві руху та витрати електроенергії на перевезення одного пасажера тролейбусом на ділянці маршруту. Показано, що вони залежать від типу транспортного засобу (ТЗ), а при наповненні вище певного рівня можуть збільшуватися. **Практична значимість.** Авторами одержані рівняння руху, орієнтовані на використання комп'ютерних методів числового інтегрування. Зменшено затрати праці на проведення розрахунків; збільшено точність розрахунків; забезпечено можливості врахування різних чинників, що впливають на характер руху. Певний енергозберігаючий ефект уможливлений авторами за рахунок спрямованості методів розрахунку на практичну розробку технологічних карт руху засобів електротранспорту в умовах експлуатації при постійній зміні наповнення салону транспортного засобу.

Ключеві слова: міський електричний транспорт; затрати електроенергії; рівняння руху; змістовна та математичні моделі; рівняння Ейлера-Лагранжа; консервативні та дисипативні сили

Вступ

Енергозбереження на міському електричному транспорті, підвищення ефективності його роботи – питання, актуальність яких з плином часу не зменшується. Теоретичною базою розробки заходів з енергозбереження є точні, продуктивні і зручні для користування методи розрахунку характеристик руху та витрат електроенергії транспортним засобом (ТЗ). Проектування і розробка ТЗ також здійснюються на основі тягових розрахунків. На жаль, існуючі

методи тягових розрахунків, рівняння руху, що пропонуються у фаховій літературі, надмірно спрощені і мають недостатню точність. Завданням цієї роботи є уточнення рівнянь руху, одержання рівнянь, які б мали більшу точність і продуктивність та дозволяли враховувати різні чинники, що зумовлюють рух засобів електричного транспорту та витрати електроенергії. Уточнення рівнянь, як показано в роботах В. А. Лазаряна [1], може бути здійснене тільки на основі більш досконалої моделі транспортного засобу.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Методика

Згідно з рекомендаціями [3, 6, 11, 14] витрати електроенергії транспортним засобом розраховують шляхом інтегрування рівняння руху з урахуванням параметрів ділянки маршруту та електромеханічних характеристик двигуна. Для спрощення розрахунків і надання їм універсальності рівняння приведені до питомих одиниць. Після інтегрування одержані результати перераховують перемноживши на фактичну масу ТЗ. Наприклад, в джерелах [5, 8, 11] основне рівняння руху має вигляд:

$$102(1+\gamma)\frac{dv}{dt} = f_T + w_C - b, \quad (1)$$

де γ – коефіцієнт, що враховує інерцію обертових частин $\gamma = \frac{m_e}{m}$ ($\gamma = 1, 1-1, 2$); v – швидкість транспортного засобу; f_T – питома сила тяги, Н/кН; w_O – сила основного питомого опору руху, (для тролейбуса в режимі тяги $w_O = 12 + 0,0004v^2$); w_D – додаткова сила опору, зумовлена рухом на похилих та кривих ділянках шляху, b – гальмівна сила.

Аналіз показує, що у рівнянні прихована і не повною мірою враховується залежність від маси. Величини коефіцієнта γ і коефіцієнтів сили основного опору залежать від маси (наповнення ТЗ) [8, 11]. Неповне врахування залежності коефіцієнтів рівняння від маси призводить до помилкових практичних дій. Так, наприклад, в м. Харкові в період нестачі електроенергії і часткового її відключення заради економії прийняли рішення скоротити випуск тролейбусів на 1/3. Результат був несподіваний як для керівництва міста, так і працівників електротранспорту. Витрати електроенергії не скоротились. Від експерименту швидко відмовились. Це свідчить, що теоретичні уявлення та розрахунки затрат електроенергії за існуючою методикою є незадовільними.

Рівняння руху (1), одержане на основі змістовної моделі (див. рис. 1), в якій ТЗ є матеріальною точкою, на яку діють рушійні та гальмівні сили [5, 8, 9, 11, 15, 16]. В математичній моделі використано формалізм другого закону Ньютона.

Недоліком вказаної моделі є те, що згідно з законом Ньютона не можна врахувати фак-

тичний розподіл мас ТЗ з декількома вагонами та обертовий рух окремих частин. Використана одиниця «питомої» сили тяги – Ньютон, поділений на «вагу» ТЗ в кілоньютонах (Н/кН), не є питомою величиною в загальноприйнятому розумінні – це фактично відношення двох сил, яке виражається в безрозмірних одиницях. Хоча рівняння фактично безрозмірне, та під час його отримання одночасно використовуються різні одиниці вимірювання: Н і кН, м і км, години та секунди, а саме: «питома» сила в Н/кН, прискорення в км/(год·с) і прискорення земного тяжіння в м/с² [11]. Це унеможливає безпосереднє інтегрування рівняння руху числовими методами за допомогою комп'ютерних програм і призводить до появи помилок в результатах розрахунку [8]. Вага – це сила, з якою тіло діє на горизонтальну опору чи вертикальний підвіс [13]. Вага тіла змінюється, коли воно рухається з прискоренням відносно земного тяжіння. Тобто під час отримання рівняння здійснена заміна понять: відношення сил вважається «питомою» силою, а як «вага» використано добуток маси на прискорення земного тяжіння, що не правильно, причому прискорення виражене в м/с², тоді як час руху виражається в годинах; шлях – кілометрах, а швидкість – кілометрах за годину.

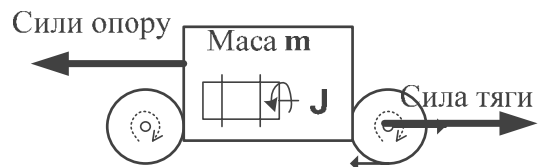


Рис. 1. Існуюча змістовна модель

Fig. 1. Existing conceptual model

Мета

Метою роботи є одержання моделі і рівняння руху, які б відповідали вимогам точності розрахунків, були фізично зрозумілі, зручні для розрахунків на комп'ютерах та дозволяли враховувати механічні, електричні і теплові характеристики транспортного засобу та його двигуна; наповнення салону та інші чинники.

Для досягнення мети завданнями роботи є:

– розробка змістовної моделі руху ТЗ, що дозволяє врахувати розподіл мас, їх характер руху і відповідає вимогам точності;

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- на основі змістовної моделі одержати рівняння руху;
- виконати розрахунки для перевірки адекватності моделі.

Результати

Як змістовну модель руху ТЗ обрано систему матеріальних точок (див. рис. 2). На систему накладено зв'язки різних типів, які забезпечують передачу обертового моменту якоря двигуна до ведучих коліс і рух ТЗ в цілому. Рух здійснюється за рахунок електричної енергії двигуна і перетворення її в механічну. На систему діють сили опору, які зумовлюють часткове перетворення механічної енергії в теплову. Водій має можливість регулювати швидкість руху шляхом зміни сили тяги двигуна (величини струму, магнітного потоку) та шляхом гальмування.

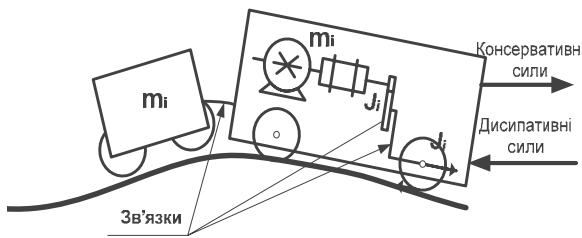


Рис. 2. Змістовна модель динаміки транспортного засобу

Fig. 2. Conceptual model of the vehicle dynamics

Динаміка розглянутої змістовної моделі ТЗ описується рівнянням Ейлера-Лагранжа другого роду [7, 11]. У разі консервативної системи в потенціальному силовому полі Землі рівняння має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = 0. \quad (2)$$

У разі дисипативної системи, тобто в разі врахування перетворення механічної енергії в інші види:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j, \quad (3)$$

де q_j і $\dot{q}_j$ – узагальнені координати і швидкості для j -го степеня вільності; L – функція Лагран-

жа ($L=T-U$), дорівнює різниці кінетичної – T та потенціальної – U енергій; Q_j – узагальнені сили.

Рух ТЗ є поступальним рухом в силовому полі Землі і додатково – обертальним рухом його окремих частин (двигуна, коліс, трансмісії). Накладені зв'язки дозволяють розрахувати поступальний рух через швидкість обертального руху двигуна. Тому в прийнятій моделі ТЗ є системою з одним степенем вільності, в якій узагальнена швидкість $\dot{q}_j = v$, та координата $q_j = l$ є швидкістю та шляхом, пройденим ТЗ.

Кінетична енергія T , згідно з прийнятою математичною моделлю, дорівнює сумі кінетичної енергії поступального руху ТЗ та частин, що обертаються:

$$T = \sum_{i=1}^s \frac{m_i v^2}{2} + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\mu_i^2 v^2}{2R^2}, \quad (4)$$

де J_i , μ_i – момент інерції та передаточне число i -ої частини, що обертається; m_i – маса i -ої матеріальної точки; s – кількість матеріальних точок; n – кількість частин, що обертаються; R – радіус ведучих коліс.

При зосередженій масі m_k та русі на похилій ділянці з нахилом $\frac{dh}{dl} \approx \tan(\varphi) = \alpha$, згідно з формулою (2), одержуємо рівняння руху консервативної системи:

$$\left(m_k + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\mu_i^2}{R^2} \right) \frac{dv}{dt} - m_k g \alpha = 0. \quad (5)$$

Рівняння (5) співпадає з (1) і містить формулу розрахунку додаткової маси частин, що обертаються. В ній також врахована потенціальна сила скочування, зумовлена дією тяжіння Землі.

Для врахування сили тяги та сил опору використаємо рівняння дисипативної системи (3). В нього входять потенціальна сила $Q_i = m g \alpha$, яка вже врахована (5) та дисипативні сили: тяги, опору зовнішнього середовища, та опору двигуна і трансмісії. Сили опору зовнішнього середовища є трьох типів [7, 9]: сухе тертя, в'язкий опір та аеродинамічний опір. Сила тертя дорівнює добутку коефіцієнта тертя на вагу:

$$W_T = K_T G_T, \quad (6)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

де G_T – вага ТЗ. Під час руху без прискорення відносно поля тяжіння Землі $G_T = mg$. Під час руху через долину (чи пагорб) радіусом заглиблення R_l вага ТЗ:

$$G = mg \pm \frac{mv^2}{R_l}. \quad (7)$$

Зміна ваги впливає на характер руху ТЗ, а при великій швидкості може призвести до аварій. Збільшення ваги під час проїзду долиною – до обриву підвіски чи трансмісії, а зменшення на пагорбі – до часткової втрати керуваності.

В'язкий опір – зумовлений тертям між шарами повітря, що захоплюються транспортним засобом і нерухомими, більш віддаленими [7]. Ця сила є лінійною функцією швидкості:

$$W_B = K_B v, \quad (8)$$

де K_B = коефіцієнт в'язкого опору:

$$K_B = \frac{\eta}{\Delta Z} S, \quad (9)$$

де η , – в'язкість повітря; S – площа поверхні, що стикається з повітрям; ΔZ – відстань між шарами повітря, які примикають до транспортного засобу і шарами, які є відносно нерухомими.

У випадку тягових розрахунків руху трамваїв і тролейбусів [8, 11] цю силу, як правило, не враховують. Під час розрахунків руху залізничних поїздів та поїздів метрополітену ця сила є суттєвою [9, 17]. Залізничний потяг має досить велику довжину і поверхню S , що стикається з повітрям, велика. А у випадку метрополітену, крім того, суттєвий вплив має мала величина відстані ΔZ між шаром повітря, що примикає до поїзда, та нерухомим шаром, який примикає до стінок тунелю.

Сила аеродинамічного опору зумовлена вихровими потоками і пропорційна квадрату швидкості. Розраховується вона згідно з формулою [7]:

$$W_A = K_A v^2 = C_x \frac{\rho v^2}{2} \sigma, \quad (10)$$

де C_x – коефіцієнт лобового опору, залежний від форми ТЗ; ρ – густина повітря; σ – площа поперечного перерізу.

Крім вказаних сил для рейкового транспорту, враховують додаткову силу опору під час проїзду кривими ділянками шляху. Ця сила подається як рух на підйом з кутовим коефіцієнтом, розрахованим залежно від радіуса кривої [5, 8, 11]. Позначивши кутовий коефіцієнт α_d для розрахунку величини додаткової сили опору маємо:

$$W_d = mg \alpha_d. \quad (11)$$

ТЗ рухається за рахунок енергії, яка споживається з електричної мережі і перетворюється двигуном в механічну. Перетворення супроводжується втратами енергії в двигуні [12]. Перетворення електричної енергії в механічну двигуном відповідає формулі:

$$iU - \Delta P_E = M\omega + \Delta P_M, \quad (12)$$

де i , U струм та напруга, що споживає електричний двигун; ΔP_E – електричні втрати потужності в двигуні; M , ω – момент та кутова швидкість на валу двигуна; ΔP_M – потужність механічних втрат у двигуні.

Електричні втрати ΔP_E можна подати як суму втрат на послідовно ввімкнутих резистивних

елементах $\sum_{i=1}^n i r_i^2$ (щітках двигуна, активному

опорі послідовних обмоток збудження, резисторах системи керування та ін.) і втрат в паралельно ввімкнутих елементах $\sum_{i=1}^b \frac{U}{r_i^2}$ (обмотках

паралельного збудження, допоміжних двигунів, елементах обігріву кузова тощо).

Механічні втрати тягового двигуна та трансмісії ΔP_M – це втрати на тертя, на в'язкість мастил трансмісії – пропорційні швидкості, і вентиляційні втрати – пропорційні квадрату швидкості.

З рівняння (12) знаходимо момент – M_K та силу тяги – F_K на колесі ТЗ:

$$M_K = \frac{\mu_D (iU - \Delta P_E - \Delta P_M)}{\omega}; \quad (13)$$

$$F_K = \frac{(iU - \Delta P_E - \Delta P_M)}{R\omega_K}, \quad (14)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

де μ_D – передаточне число трансмісії; R – радіус; $\omega_K = \omega/\mu_D$ – кутова швидкість ведучого колеса.

Сила тяги, приведена до ободу ведучих коліс:

$$F_E = \frac{(iU - \Delta P_E - \Delta P_M)}{v} = \frac{(iU - \Delta P_E)}{v} - \frac{\Delta P_M}{v}. \quad (15)$$

У цілому для транспортного засобу одержуємо рівняння руху:

$$\left(m + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\mu_i^2}{R^2} \right) \frac{dv}{dt} = \frac{(iU - \Delta P_E)}{v} - \frac{\Delta P_M}{v} - K_T G - \frac{\eta}{\Delta Z} S v - C_x \frac{\rho v^2}{2} + mg(\alpha + \alpha_d). \quad (16)$$

Використовуючи позначення, прийняті в теорії електричної тяги, рівняння, виражене в діючих, а не «питомих» величинах, набуде вигляду:

$$(m + m_e) \frac{dv}{dt} = F_E(v) - W_T - W_B - W_A + mg(\alpha + \alpha_d). \quad (17)$$

Під час тягових розрахунків розглядають три режими руху, а саме: тяги, вибігу та гальмування. Рівняння (17) описує рух в режимі тяги на ділянці шляху з відомим ухилом α , з врахуванням енергії, яка поступає з електричної мережі, та втрат в електродвигуні і дисипативних складових втрат енергії ТЗ.

В режимі вибігу струм відсутній і складові, в які входить величина струму, дорівнюють нулю. Механічні втрати в двигуні залишаються, оскільки в режимі вибігу двигун механічно зв'язаний з ведучими колесами.

$$\left(m + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\mu_i^2}{R^2} \right) \frac{dv}{dt} = mg(\alpha + \alpha_d) - \frac{\Delta P_M}{v} - \frac{\eta}{\Delta Z} S v - C_x \frac{\rho v^2}{2} \sigma. \quad (18)$$

В режимі гальмування з'являються сили електричного та механічного гальмування. Електричне гальмування здійснюється за рахунок під'єднання до двигуна гальмівних резисторів. Відключений від мережі двигун переходить в режим генератора і вироблена ним енер-

гія гаситься на гальмівних резисторах r_r . Потужність втрат на гальмування дорівнює:

$$\Delta P_{rr} = \frac{U_g^2}{r + r_r} = \frac{(C\Phi\omega)^2}{r + r_r}. \quad (19)$$

Робота δA , виконана за проміжок часу Δt силою електричного гальмування, на елементарній ділянці шляху $\delta S = v \Delta t$ дорівнює:

$$\delta A = \frac{(C\Phi\omega)^2}{r + r_r} \Delta t, \quad (20)$$

звідки величина сили:

$$B_{rr} = \frac{\delta A}{\Delta S} = \frac{(C\Phi\omega)^2}{(r + r_r)v}, \quad (21)$$

тут: C – конструкційна постійна двигуна; Φ – магнітний потік; r – опір послідовного кола двигуна; r_r – опір гальмівного резистора.

Оскільки $\omega = \frac{\mu_D v}{R}$, то сила електричного гальмування дорівнює:

$$B_{Er} = \frac{\delta A}{\Delta S} = \frac{(C\Phi\mu_D)^2}{(r + r_r)R^2} v. \quad (22)$$

Сила електричного гальмування пропорційна швидкості транспортного засобу. Для забезпечення потрібної гальмівної сили при зменшенні швидкості перемикають гальмівні резистори r_r та збільшують величину магнітного потоку Φ . При подальшому зменшенні швидкості вступають в дію механічні гальма.

Сили механічного гальмування зумовлені притисканням гальмівних колодок до гальмівних барабанів чи гальмівного диску, залежно від конструкції гальмівної системи. Момент сили в дисковому гальмі:

$$B_{Mr} = K_r W_r. \quad (23)$$

В разі розміщення гальмівних барабанів безпосередньо на колесі, гальмівна сила, приведена до ободу колеса, дорівнює:

$$B_{Mr} = \frac{K_r W_r R_r}{R}, \quad (24)$$

де R_r – радіус гальмівного барабана; K_r , W_r – коефіцієнт тертя та сила притискання накладок гальмівних колодок.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Реалізуються сили гальмування за рахунок тертя між колесами і поверхнею, по якій вони рухаються. Величина гальмівної сили обмежена коефіцієнтом тертя ковзання між колесами та полотном шляху (рейками).

В загальному вигляді рівняння руху в режимі гальмування має вигляд:

$$\left(m + \sum_{i=1}^n J_i \frac{\mu_i^2}{R^2} \right) \frac{dV}{dt} = mg(\alpha + \alpha_d) - \frac{\Delta P_M}{\mu_D V} - \frac{\eta}{\Delta Z} SV - C_x \frac{\rho v^2}{2} \sigma - B_{EG} - B_{MG}. \quad (25)$$

Для виконання тягових розрахунків відповідно розглянутої моделі задають значення вхідних величин, що характеризують ТЗ та параметри ділянки шляху. До цих параметрів слід додати характеристики двигуна, а саме: електро-механічну характеристику – залежність кутової швидкості від величини струму $\omega = \omega(i)$; механічну – залежність кутової швидкості від моменту двигуна $\omega = \omega(M)$ та залежність коефіцієнта корисної дії від величини струму $\eta = \eta(i)$. Ці характеристики в аналітичному вигляді одержані шляхом апроксимації паспортних даних двигунів.

Коефіцієнти рівняння руху можна розрахувати за експериментальними даними для цього типу ТЗ. В цитованій літературі зібрано достатньо інформації для визначення величини коефіцієнтів. Як правило, наведено два різні типи формул розрахунку коефіцієнтів рівняння, а саме: з врахуванням залежності складових сили основного опору від маси і без такого врахування. Останнє викликано спрощенням, направленим на зменшення трудомісткості і об'єму розрахунків, забезпечення можливості використання комп'ютерних програм для розрахунків [16]. Уточнення коефіцієнтів рівнянь, відповідно до розглянутої моделі, потребує окремого аналізу.

Виконані розрахунки для тролейбуса типу ЗиУ-9 [2] показують, що витрати електроенергії суттєво змінюються при зміні водієм режиму ведення ТЗ. Різниця на деяких ділянках руху досягає 30 %. Одержано залежність питомих витрат електроенергії від наповнення салону транспортного засобу (рис. 3).

Питомі витрати електроенергії на перевезення одного пасажирів суттєво залежать від наповнення салону транспортного засобу. При невеликому наповненні зі збільшенням кількості пасажирів вони суттєво знижуються. При досягненні певного наповнення, характерного для кожного типу ТЗ, витрати електроенергії не змінюються і можуть дещо зростати. Ці дані пояснюють наведений на початку статті приклад неефективності скорочення випуску транспортних засобів на маршрути, при незмінному пасажиропотоці, заради економії електроенергії.

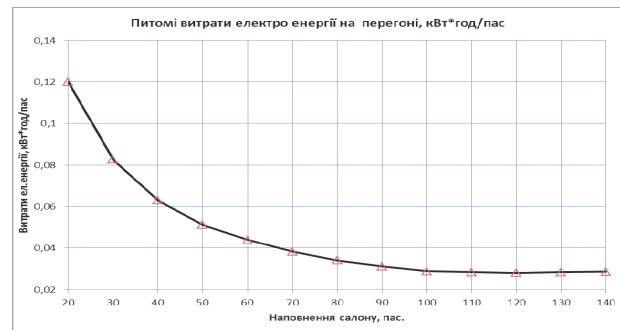


Рис. 3. Витрати електроенергії на перевезення одного пасажирів на перегоні

Fig. 3. The cost of electricity for transportation of one passenger on the running line

Наукова новизна та практична значимість

Побудовано нову змістовну модель динаміки міського електротранспорту, в якій ТЗ подається як система матеріальних точок з розподіленою масою та накладених на неї зв'язками різного типу. В найбільш простому вигляді зв'язки накладено таким чином, що система має один степінь вільності.

Математична модель руху транспортного засобу побудована на основі змістовної моделі з використанням рівнянь Лагранжа. На основі цієї математичної моделі виведені більш точні рівняння розрахунків кривих руху і витрат електроенергії ТЗ.

Рівняння руху приведені до основних одиниць системи СІ, що дозволяє виконувати їх багаторазове інтегрування числовими методами за допомогою стандартних комп'ютерних процедур і усуває необхідність використання графоаналітичних методів розрахунку.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

У зв'язку з суттєвою залежністю характеру руху і витрат електроенергії від наповнення салону, яке змінюється протягом маршруту слідування міського електротранспорту, характеристик ділянок шляху, режиму ведення ТЗ водієм є потреба в багаторазових розрахунках, що потребує розробки відповідних програм для ЕОМ.

Питомі витрати електроенергії на перевезення одного пасажирів мають мінімум при певному наповненні салону і при збільшенні його – зростають.

З метою енергозбереження на ТЗ. потрібно встановлювати лічильники електроенергії та засоби обліку кількості пасажирів.

Висновки

1. Побудовано нову змістовну модель руху, в якій транспортний засіб подано як систему взаємодіючих матеріальних точок з встановленими між ними зв'язками.

2. Показано, що в прийнятій моделі транспортного засобу зв'язки між просторово розподіленими матеріальними точками встановлені таким чином, що система має один степінь вільності.

3. Використовуючи формули Ейлера-Лагранжа, одержано рівняння розрахунку кривих руху і витрат електроенергії, що дозволяють врахувати низку додаткових чинників і підвищити точність розрахунків.

4. Розраховано, що витрати електроенергії троллейбусом на перевезення одного пасажирів зменшуються зі збільшенням наповнення салону до певної межі і в подальшому можуть зростати. Експлуатація електротранспорту при переповненому салоні, з точки зору енергозбереження, є нерациональною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Блохин, Е. П. Развитие математических моделей динамики поезда в трудах В. А. Лазаряна и его учеников / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 30. – С. 64–74.
- Вишняк, Г. В. Троллейбус пассажирский ЗиУ-682Б / Г. В. Вишняк. – Москва : Транспорт, 1977. – 208 с.
- Гетьман, Г. К. Визначення витрат електроенергії на тягу поїздів при розв'язанні задач тягового забезпечення / Г. К. Гетьман, С. М. Голік // Проблемы и перспективы развития ж.-д. трансп. : тез. XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (11.05-12.05 2006) / ДНУЖТ. – Днепропетровск, 2006. – С. 115.
- Гетьман, Г. К. Математическая модель поезда для производства тяговых расчетов в задачах выбора параметров тяговых средств / Г. К. Гетьман // Транспорт : зб. наук. пр. Випуск 1. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 1999. – С. 75–79.
- Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги. В 2 т. Т. 1. / Г. К. Гетьман. – Днепропетровск : Маковецкий, 2011. – 456 с.
- Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги : монография в 2 т. Т. 2 / Г. К. Гетьман. – Днепропетровск : Маковецкий, 2011. – 364 с.
- Лобас, Л. Г. Теоретична механіка : підручник / Л. Г. Лобас, Л. Г. Лобас // Держ. екон.-технол. ун-т трансп. – Київ : ДЕТУТ, 2008. – 406 с.
- Основи електричної тяги : навч. посібн. / В. Х. Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко, Ю. В. Мінесва. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 312 с.
- Радченко, В. Д. Сопротивление движению вагонов метрополитена / В. Д. Радченко. – Москва : Трансжелдориздат, 1957. – 71 с.
- Распопов, А. С. Построение математических моделей движения экипажей ж.-д. транспорта на основе уравнений Эйлера-Лагранжа / А. С. Распопов, И. В. Клименко, Т. В. Кравец // Транспорт : зб. наук. пр. / Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. – Дніпропетровськ, 2000. – Вип. 6. – С. 101–107.
- Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. Г. Исаев, Н. Н. Сидоров. – Москва : Транспорт, 1983. – 328 с.
- Розробка моделей електродвигунів тягового електроприводу транспортних засобів з урахуванням вихрових струмів / М. В. Хворост, К. О. Сорока, М. І. Шпіка, А. І. Бесараб // Електрифікація трансп. – 2014. – № 8. – С. 99–104.
- Рудой, Ю. Г. Вес / Ю. Г. Рудой // Физическая энциклопедия / под общ. ред. А. М. Прохорова. – Москва : Советская энцикл. – 1988. – Т. 1. – С. 262.
- Mägi, M. Analysis of modelling electric transportation networks / M. Mägi // Topical problems of education in the field of electrical and power engineering : Proc. of the 4th Intern. Symposium (15.01–20.01.2007) / Tallinn University of Technology. – Kuressaare, 2007. – P. 73–77.
- Mathematical Models of High-Speed Trains Movement / D. C. Cismaru, D. A. Nicola,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- M. A. Drighiciu [et al.] // WSEAS. Transactions on Circuits and Systems. – 2008. – № 2. – P. 379–388.
16. Matyja, T. Simulink library project for modeling and simulation of dynamic phenomena in rotating power transmission systems / T. Matyja // Problemy Transportu. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 101–111.
17. Methods of calculation line optimum travel of trains with consideration of longitudinal dynamic efforts / L. P. Lingaitis, G. Vaičiūnas, L. Liudvinavičius, G. Jevdomacha // Problemy Transportu. – 2013. – Vol. 8. – Iss. 2. – P. 25–34.

К. А. СОРОКА^{1*}, Д. А. ЛЫЧОВ²

^{1*}Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Революции, 12, Харьков, Украина, 61002, тел. + 38 (097) 499 24 95, эл. почта sorokahome@rambler.ru, ORCID 0000-0001-9091-6861

²Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Революции, 12, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (050) 996 27 86, эл. почта dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985

СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Цель. В статье рассмотрено совершенствование методов расчета кривых движения электротранспорта и затрат электроэнергии с целью повышения производительности и точности расчетов. **Методика.** В основу методики положены общие принципы математического моделирования, когда создается содержательная модель предметной области, на основе которой строится математическая модель соответствующего математического аппарата. Рассмотрены вопросы построения содержательной модели движения средств электрического транспорта и соответствующей математической модели. **Результаты.** Авторами предложена модель, в которой транспортное средство представляется как система взаимодействующих материальных точек, между которыми установлены определенные типы связей, и на которую действуют внешние силы. Как математический аппарат использовано уравнение Эйлера-Лагранжа второго рода. Рассмотрены консервативные и диссипативные силы, обуславливающие динамику системы. Предложены формулы расчета кривых движения с учетом затрат электроэнергии. **Научная новизна.** В работе получена содержательная модель движения средств электротранспорта с распределенной массой, как системы взаимосвязанных материальных точек с наложенными на нее связями. В наиболее простом виде система имеет одну степень свободы. Математическая модель движения транспортного средства построена на основе уравнений Лагранжа. Указанный подход позволяет детально, физически обоснованно описать динамику средств электротранспорта. Получены существенно более точные уравнения расчета кривых движения и расхода электроэнергии, чем рекомендованные в учебных пособиях и нормативной документации для средств городского электротранспорта. Рассчитаны кривые движения и расхода электроэнергии на перевозку одного пассажира троллейбусом на участке маршрута. Показано, что они зависят от типа транспортного средства (ТС), а при наполнении выше определенного уровня могут увеличиваться. **Практическая значимость.** Авторами получены уравнения движения, ориентированные на использование компьютерных методов численного интегрирования. Уменьшены затраты труда при проведении расчетов, увеличена точность расчетов; обеспечены возможности учета различных факторов, влияющих на характер движения. Определенный энергоэкономический эффект может быть достигнут за счет направленности методов расчета на практическую разработку технологических карт движения средств электротранспорта в различных условиях эксплуатации при постоянном изменении наполнения салона транспортного средства.

Ключевые слова: городской электрический транспорт; затраты электроэнергии; уравнения движения; содержательная и математические модели; уравнение Эйлера-Лагранжа; консервативные и диссипативные силы

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

К. О. SOROKA^{1*}, D. A. LYCHOV²^{1*}Dep. «Electric Transport», National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov, Revoliutsiia St., 12, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. + 38 (097) 499 24 95, e-mail sorokahome@rambler.ru, ORCID 0000-0001-9091-6861²Dep. «Electric Transport», National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov, Revoliutsiia St., 12, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (050) 996 27 86, e-mail dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985THE CONTENT MODEL AND THE EQUATIONS OF
MOTION OF ELECTRIC VEHICLE

Purpose. The calculation methods improvement of the electric vehicle curve movement and the cost of electricity with the aim of performance and accuracy of calculations improving are considered in the paper. **Methodology.** The method is based upon the general principles of mathematical simulation, when a conceptual model of problem domain is created and then a mathematic model is formulated according to the conceptual model. Development of an improved conceptual model of electric vehicles motion is proposed and a corresponding mathematical model is studied. **Findings.** The authors proposed model in which the vehicle considers as a system of interacting point-like particles with defined interactions under the influence of external forces. As a mathematical model the Euler-Lagrange equation of the second kind is used. Conservative and dissipative forces affecting the system dynamics are considered. Equations for calculating motion of electric vehicles with taking into account the energy consumption are proposed. **Originality.** In the paper the conceptual model of motion for electric vehicles with distributed masses has been developed as a system of interacting point-like particles. In the easiest case the system has only one degree of freedom. The mathematical model is based on Lagrange equations. The shown approach allows a detailed and physically based description of the electric vehicles dynamics. The derived motion equations for public electric transport are substantially more precise than the equations recommended in textbooks and the reference documentation. The motion equations and energy consumption calculations for transportation of one passenger with a trolleybus are developed. It is shown that the energy consumption depends on the data of vehicle and can increase when the manload is above the certain level. **Practical value.** The authors received the equations of motion and labour costs in the calculations focused on the use of computer methods of numerical integration. The calculation expenses are reduced. The accuracy is improved; provided possibility to consider different parameters influencing the motion. A certain environmental effect can be achieved by orientation calculation methods for the practical development of the process charts of the movement of electric vehicle funds in different operating conditions at a constant change of filling the interior of the vehicle.

Keywords: urban electric transport; electric power costs; equation of motion; conceptual and mathematical models; Euler-Lagrange equation; conservative and dissipative forces

REFERENCES

1. Blokhin Ye.P., Manashkin L.A. Razvitiye matematicheskikh modeley dinamiki poyezda v trudakh V. A. Lazaryana i yego uchenikov [The development of mathematical models of the dynamics of trains in the writings of Yves. A. Lazaryan and his disciples]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 30, pp. 64-74.
2. Vishnyak G.V. *Trolleybus passazhirskiy ZiU-682B* [Trolleybus passenger ZiU-682B]. Moscow, Transport Publ., 1977. 208 p.
3. Hetman H.K., Holik S.M. Vyznachennia vytrat elektroenerhii na tiahу poizdiv pry rozv'iazanni zadach tiahovoho zabezpechennia [The cost of electricity for traction trains determination in solving problems of providing traction]. *Tezisy LXVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta (11.05-12.05 2006)»* [Proc. of LXVI Intern. Sci. and Pract. Conf. «Problems and prospects of railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2006. P. 115.
4. Getman G.K. Matematicheskaya model poyezda dlya proizvodstva tyagovykh raschetov v zadachakh vybora parametrov tyagovykh sredstv [Mathematical model of a train for production of traction calculations in problems of parameters selection of the traction means]. *Transport : zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 1* [Transport: Proceedings. Issue 1]. Dnipropetrovsk, Nauka i osvita Publ., 1999, pp. 75-79.
5. Getman G.K. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2011. 456 p.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

6. Getman G.K. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2011. 364 p.
7. Lobas Leonid, Lobas Liudmyla. *Teoretychna mekhanika* [Theoretical mechanics]. Kyiv, Derzhavnyi ekonomiko-tehnologichnyi universytet transportu Publ., 2008. 406 p.
8. Daleka V.Kh., Pushkov P.M., Andriichenko V.P., Minieieva Yu.V. *Osnovy elektrychnoi tiahly* [Fundamentals of electric traction]. Kharkiv, Kharkivskiy natsionalnyi universytet miskoho hospodarstva imeni O. M. Beketova Publ., 2012. 312 p.
9. Radchenko V.D. *Soprotivleniye dvizheniyu vagonov metropolitena* [The resistance to movement of the subway cars]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1957. 71 p.
10. Raspopov A.S., Klimenko I.V., Kravets T.V. Postroeniye matematicheskikh modeley dvizheniya ekipazhey zh.-d. transporta na osnove uravneniy Eylera-Lagranzha [Construction of mathematical models of the railway transport crews movement on the basis of the Euler-Lagrange]. *Transport: zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Transport: Proc. of Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport]. Dnipropetrovsk, 2000, issue 6, pp. 101-107.
11. Rozenfeld V.Ye., Isayev I.G., Sidorov N.N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1983. 328 p.
12. Khvorost M.V., Soroka K.O., Shpika M.I., Besarab A.I. Rozrobka modelei elektrodvyhunyv tiahovoho elektropryvodu transportnykh zasobiv z urakhuvanniam vykhrovykh strumiv [The modelling of electric traction motors electric drive vehicles, taking into account eddy currents]. *Elektryfikatsiia transportu – Electrification of Transport*, 2014, no. 8, pp. 99-104.
13. Rudoy Yu.G., Prokhorov A.M. Ves [Weight]. *Fizicheskaya entsiklopediya* [Physical encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1988, vol. 1, pp. 262-270.
14. Mägi M. Analysis of modelling electric transportation networks. Proc. of 4th Intern. Symposium «Topical problems of education in the field of electrical and power engineering (15.01-20.01.2007)». Kuressaare, Tallinn University of Technology Publ., 2007, pp. 73-77.
15. Cismaru D.C., Nicola D.A., Drighiciu M.A. Mathematical Models of High-Speed Trains Movement. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2008, no. 2, pp. 379-388.
16. Matyja T. Simulink library project for modeling and simulation of dynamic phenomena in rotating power transmission systems. *Problemy Transporty*, 2014, vol. 9, issue 2, pp. 101-111.
17. Lingaitis L.P., Vaičiūnas G., Liudvinavičius L., Jevdomacha G. Methods of calculation line optimum travel of trains with consideration of longitudinal dynamic efforts. *Problemy Transporty*, 2013, vol. 8, issue 2, pp. 25-34.

Стаття рекомендована до публікації: д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Україна), д.т.н., проф. В. П. Шпачуком (Україна)

Надійшла до редколегії: 10.04.2015

Прийнята до друку: 05.06.2015

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

UDC 625.1-027.45

I. O. BONDARENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Railway Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 42, e-mail irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

FORMATION OF ESTIMATED CONDITIONS FOR LIFE CYCLE OF DEFORMATION WORK OF THE RAILWAY TRACK

Purpose. The purpose of this research is to substantiate the technical limits of the railway track (under reliability status) for the formation the regulatory framework for reliability and functional safety of the railway track in Ukraine. **Methodology.** In order to achieve the goal of research analysis methods of the technical states of elements and trackforms that are typical of operation conditions of the railways in Ukraine were used. **Findings.** Technical states accordance of elements and trackforms to reliability status under existing regulations was defined. These conditions are based on the track assessments in accordance with the dimensional tape results. The status of each element of the track design affects its deformation work, but the rules are still absent that would connect state of track elements with the state of the track by estimation of the dimensional tape. The reasons on which the limits are not set were established. It was found out which researches are necessary to conduct for their installation. **Originality.** The classification of the reliability state of a railway track for permitted deviation at the track laying and maintenance was developed. The regulation importance the technical states of ballast section and subgrade for the developed classification was established. **Practical value.** Ukrzaliznytsia (UZ) is a founding member of the Council for Railway Transport of the Commonwealth. This body issued interstate standard State Standard 32192-2013 «Reliability of railway equipment. Basic concepts, terms and definitions». On this basis developed a new interstate standard «Security functional of railway equipment. Terms and definitions». At the same time UZ is a member of the cooperation of railways in International Union of Railway Transport where rules with reliable and safe operation of railways are established in all transport branches. This study will help implement these standards on the railways of Ukraine, improve the efficiency of the information in this sphere, providing mutual understanding and unity of presentation and perception of information, including contractual legal relations of economic agents with public authorities in international scientific and technical, trade and economic relations.

Keywords: state track reliability; technical condition of the track; the elements of the track; the track construction; regulatory; technical and design documentation; unit standards and content

Introduction

Reliable railways operation provides reliable joint work of the track design, technical equipment and technical personnel that performs and supervises the process implementation at all levels. The whole process of reliable operation of a track meets regulatory, organizational and administrative, technological and technical requirements.

Reliable operation of track design provides safe

operation as each item individually and the system as a whole. The criteria are necessary to control the reliable operation of track design and their compliance provide the functional and safe work of the track. The formation of these criteria should be based on the standarts in accordance with the parameters describing the system state with components of the track design. Standarts are based on the parameters describing the condition of each

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

track design element separately. The existing standards reflect the state parameters of each track design element and the condition of rail-sleeper grid from the point of view of its geometric position. Completely the regulatory base is absent, classifying the status impact of both items the geometry of the rail-sleeper grid and the status of the track design. It is necessary to model the deformation operation service life of the railway track for the development of missing parameters.

The deformation operation service life of the track is the process of its transition regularities from one reliable state to the other beginning from the primary pouring to the full retirement.

It is necessary to perform an analysis of existing methods of condition assessment of railway structures and to consider regulatory requirements that establish the condition of the elements and a rail-sleeper grid as a system of these elements from the point of view of the concepts of reliability theory to create conditions for evaluation modeling.

But no standard regarding a railway track, contains a technical description of its condition, that corresponds to the concept of the condition in terms of reliability.

Purpose

The aim of the research is to study the technical boundaries of the elements and construction states of the track in accordance with the conditions of reliability.

Methodology

Terms and definitions of basic concepts in reliability theory for the established operating standards are used in science and technology [6-9].

According to the classification of the basic concepts of reliability theory, there are six conditions: serviceable, unserviceable, functional, partially functional, non-functional and adjoining.

Technically the condition of the track structural elements are described for rails in [5, 12, 14, 15, 19], for fasteners – [5, 10, 12, 19, 21], for sleepers – [3, 5, 12, 13, 15], for ballast – [5, 10, 12, 15, 20], for roadbed – [5, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 19].

There are no difficulties to establish compliance with reliability status for track design elements. That is, in accordance with the requirements of the design criteria is determined the serviceable and fault con-

ditions: for rails is determined by [12, 13], for fasteners – [4, 12, 21], for sleepers – [3, 5, 12, 15], for ballast – [5, 10, 11, 12, 15, 18, 20], for roadbed – [5, 11, 12, 13, 15, 17, 18].

In accordance with the requirements of establishment and maintenance there are functional, partially functional, non-functional and adjoining conditions.

For a rail-sleeper grid as system the conditions are described in [5, 10, 14, 16, 18]. But there are difficulties with the classification. Thus, depending on the speeds the requirements for elements relative to the conditions are changed. For example, the requirements for a functional track state by the rails condition for the first category are different from a functional track condition for the same category at speeds of 101-120, 121-140, 141-160, 161-200 km/h. Functional condition of a track by the rails condition for the fourth category, with load intensity more than 30 million gross tonnes km. to km. per year differs from the functional condition of the same category at a lower load intensity and in the first case the new elements of the track are laid and in the second the old one.

Thus, it is necessary to classify the track condition by the track elements state and indicators of a track measurement tape.

Consider the compliance of reliability conditions to requirements for the track classification by categories.

According to [18] serviceable and unserviceable condition of a rail-sleeper grid for high-speed, the first, second, third and fourth categories with load intensity of 30 million gross tonnes km. to km. per year are defined as for elements in accordance with the regulatory requirements and design documents.

For the fourth (with a lower load intensity), fifth, sixth and seventh track categories of functional and nonfunctional conditions are defined by the requirements of the establishment and maintenance

But for all track categories in accordance with requirements of establishment and maintenance are determined functional, partially functional, non-functional and adjoining conditions.

The main parameter of establishing the technical condition of element and track design classification is the speed of movement. Permissible speed of passenger and freight trains movement is established by geometric shapes of both in loaded and

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

unloaded conditions, so they should be taken to determine the boundaries of the track design technical condition by the corresponding condition of reliability.

As to the condition of the ballast edge the state of reliability should include not only the geometric contour, but also its impurity.

In addition, there is a problem with the definition of the railbed condition in the normative literature, as applied term «soundness» roadbed [1, 2] corresponds to the modulus of elasticity under the rail base value of 50 MPa in summer and 75 to 80 MPa in winter, that is applied at:

- the determination of the stresses in the track elements [15];
- calculations of the rail binds laying conditions of jointless track [10];
- definition of permissible speeds [15];
- definition diagrams of sleepers in track design [18].

The railway track meets these values of module elasticity, if its sites are located on the roadbed with the modulus of deformation of more than 40 MPa, that is, the roadbed consists of rocky or dry soils, compacted in accordance to the norms [5]: sand-clay; light sandy loam; medium clay; heavy clay.

In other cases, the elastic modulus does not correspond to the input conditions of these calculations.

Thus, it is necessary lead the track state to the conditions of operating rules fulfillment (normalized stiffness of the track that is used on the railways of the Europe, [22]) to meet the strength and stability.

The value of the actual modulus of the under rail elasticity for structures are specified in [18], and ranges from 7.4...to 69.6 MPa in summer.

The value of the average elastic modulus is about 27 MPa. It should be understand that this is almost in twice (1,85) lower than it is required by the initial conditions, so the effects will be in the increased variability under the influence of the rolling stock, on average, in the vertical plane на 67%, horizontal 24%

Thus, in view of this, to ensure the dependability of a track at the level set by the criteria [18] at the specified resource (missed tonnage or the number of years) between upgrades, enhanced capital and capital repairs without additional investments and not provided by the interrepair schemes and maintenance is impossible.

Avoidance of excessive use of force on the track at the execution of conditions of the track and rolling stock maintenance in functional and non-functional condition, but in serviceable condition there were no additional force effect in the system track-crew-track. It is possible only if the track is equally stressed-stained. Thus, it is necessary that even in a failed state, the stiffness of the track was at the same level throughout its length, and did not receive additional shocks from rolling stock.

The uniform track stiffness can be ensured only at the renovation of the condition of the roadbed. After all, it was built more than a century ago and for other operational requirements than applied today. For design requirements the roadbed is designed for loading of locomotives 30 kN, 50 kN cars, design speed of 80 km / h. According to the existing requirements [5]: under the load from the carriage 294 kN and a design speed of 120 km/h. Modern standart technological processes do not provide for renovation of the roadbed. Therefore, after the repair of the rail-sleeper grid replacement, the track design would not meet the terms of strength, durability and equal strain.

It is believed that the distribution of trains in the implementation of high-speed services will remove the factors that lead to the breakdown of the geometric dimensions of the track and wear of its elements, without removing the roadbed condition. Combined movement of freight and passenger trains intensively affects the track disorder and wear of its elements than the impact from the movement of freight or passenger trains separately. But it will give an effect, which is not significantly affect the reliability pointer and durability without eliminating the main cause – the accumulation of permanent deformation at operation of not strong, not sustainable, uneven elastic track.

It is also believed that the distribution of trains flows will lead to the retention of established standards for size and geometric environs of the track in valid values for long-term operation, that is the following of the track in a functional condition with the maximum value of the coefficient of track technical use.

But the distribution of trains will solve the problem only partially. It is necessary to change the technology of current track maintenance: remove the work from the local track linings if the track conditions of strength, durability and reliability are not kept. These works involves the reduction of track

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

elasticity in the places of work. Consider the reduction of track elasticity in the places of work with local track lining, when missed tonnage of the sector was less than 140 million tons km. br. after the replacement of a rail-sleeper grid repair. If the missed tonnage of the section is to 25 million tons km. br., while executing these works by sleeper tampers the elasticity of the track is reduced by 50-60%, and machines on 35-25%. If the missed tonnage is 26-140 million tons km. br. at the performing such work by any means the reducing is 25-20%. It helps to increase the intensity of local residual deformations, which are contrary to the requirement to prevent excessive force on the track and the compliance of the strength and stability conditions for a long period of operation.

Thus, it is necessary to set the condition of under sleeper bases and associate them with track condition.

Findings

The technical concept of reliability is based on the definition of such indicators:

– reliability (all possible types of system failures, depending on the application and the external environment; the possibility of each failure or, in the alternative, the intensity of occurrence of each failure; failure effects on system capability);

maintainability (the time of maintenance; the time

of detection, recognition and localization of faults; restore the system that refused (unscheduled maintenance);

durability (criteria for the limit condition of the system; the average operation time of the system);

– operation and maintenance (all possible modes of operation and maintenance in the service life of the system; the human factor.

Thus, on the basis of the normative literature, the classification of the technical condition of the railway track at the reliability conditions is presented in the section methodology in table 1.

The data given in table 1, are fully reflect the condition of the secure ways depending on the speed of rolling stock for design, that collected of both new and used items of the track. But the speed of movement is influenced by the geometrical parameters of the elements, for example the wear of rails over which they are considered defective. And if the old suitable rails lie on the track, the presence of even allowable wear does not affect the track width, as they are put to other edge, but affect the deflection of the rail under load by reducing the area of resistance. Thus, the permissible deviations of old suitable structural elements of construction and choose a margin of safety, sustainability and reliability, and require the compensation due to the characteristics of under sleeper bases.

Table 1

**The states classification reliability of the railway track with permitted deviations
at the organization and supporting of a track**

The speed of passenger / freight trains, km/h.	Condition			
	Functional condition	Nonfunctional condition	Partly functional	Nonserviceable condition
Clearance allowances to the track width, mm				
>140-160/ >80-120	+5, -3	-	-	+6, -4
>120-140/ >80-120	+8, -4	+9, -5	+21, -9	+29, -11
≤ 120/ ≤ 80	+8, -4	+9, -8	+21, -9	+29, -11
Standarts of track width elimination, mm/m				
>140-160/ >80-120	1/1	1/1,01	1/1,25	1/2,5
>120-140/ >80-120	1/1	1/1,01	1/1,5	1/2,5
>80-120/ >60-80	1/1	1/1,01	1/1,75	1/2,5
≤ 80/ ≤ 60	1/1	1/1,01	1/2	1/2,5

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Continuation of the table 1

The speed of passenger / freight trains, km/h.	Condition			
	Functional condition	Nonfunctional condition	Partly functional	Nonserviceable condition
The permissible deviations according to the mutual position of trackways height, mm				
Subsidence				
>140-160/ >80-120 either-direction	4	5,5	6	45
one-way	6	8	10	45
>80-140/ >60-120	10	11	21	45
≤ <80/ ≤ 60	10	11	26	45
Twists				
>140-160/ >80-120 (on length 10 m)	8	9	16	50
>120-140/ >80-120 (on length 20 m)	8	9	16	50
≤ 120/ ≤ 80 (on length 20 m)	8	9	17	
The difference in adjacent deflections (mm) measured at the mid-chord, length of 20 m in circular curves				
>140-160/ >80-120	3	4	5	10
>120-140/ >80-120	5	6	8	10
≤ 80-120/ ≤ 60-80	8	9	10	10
The biggest deviation from a uniform rise of arrows at ease curves				
>140-160/ >80-120	2	3	4	90
>120-140/ >80-120	3	4	5	90
>80-120/ >60-80	5	6	10	90
≤ 80/ ≤ 60	10	11	26	90
Nominal distance (m) between the axes of the sleepers leader/continuous of the track				
>140-160/ >80-120	±0,01	-	±0,02	-
≤ 140/ ≤ 120	±0,07/0,03	-	±0,08/0,04	-
The steepness of the elimination of superelevation, mm/m				
>140-160/ >80-120	0,4	0,5	0,7	4,5
>120-140/ >80-120	0,7	0,9	1,0	4,5
>80-120/ >60-80	0,7	1,3	1,4	4,5
≤ 80/ ≤ 60	1,4	1,8	1,9	4,5
Permissible irregularities on the running surface of rails in welded joints (the numerator), the rest of the length (the denominator), mm				
>140-160/ >80-120	0,3/0,3	0,5/0,7	1/	6/4
>120-140/ >80-120	0,5/0,7	1/1	1/2	6/4
≤ 120/ ≤ 80	1/1	2/2	2/3	6/4

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

End of table 1

The speed of passenger / freight trains, km/h.	Condition			
	Functional condition	Nonfunctional condition	Partly functional	Nonserviceable condition
Standards and tolerance of the rails tilt device				
>140-160/ >80-120	1/20	-	-	min1/40 max 1/12
≤ 140/ ≤ 120	1/20	-	-	min1/60 max 1/12
Depth of wave-like unevenness or potholes, mm				
>140-160/ >80-120	1,0	1,9	2,0	4,0
>120-140/ >80-120	1,0	1,5	2,0	4,0
≤ 120/ ≤ 80	2,0	2,5	3,0	4,0
Deflection of the ends (mm), including wrinkling and saddle				
>140-160/ >80-120	0,8	0,9	1,0	6,0
>120-140/ >80-120	0,9	1,0	2,0	6,0
>80-120/ >60-80	1,9	2,0	3,0	6,0
≤ <80/ ≤ 60	2,9	3,0	4,0	6,0

It is necessary to perform calculations to determine the parameters of deformation of the track for the boundaries determination of the under sleeper condition bases. Possible combination of the technical characteristics of the ballast and roadbed will be defined out of the condition classification boundaries of a rail-sleeper grid (table 1), by the allowable speed of trains on sections of the road with defective sleepers and mountings, and unsuitability sleepers or fasteners in [12].

Originality and Practical value

The classification of conditions the railway track reliability is developed at the allowed tolerances at the maintenance and improvement of rail track. The necessity of rationing the technical condition of the ballast and roadbed for designed classification was established.

Ukrzaliznytsia is one of the founders of the Council for rail transport of the States-participants of the Commonwealth and a member of OCRR. These bodies have issued standards that should be used and by our state: OCRR [23...25]; The Council of States-participants of the Commonwealth – interstate standard State standart 32192-2013 «Reliability of railway equipment. Basic concepts

terms and definitions» and on its basis a new interstate standard «Security functional of railway equipment. Terms and definitions» is developed. This study will help with the implementation of these standards on the Railways of Ukraine. It also will provide the increasing of information efficiency in this area to ensure mutual understanding, unity of the representation and perception of information, including the legal relations of business entities with each other, governments, intergovernmental scientific and technical, trade and economic relations.

Conclusions

One of the new aspects of the interaction process between the track and rolling stock is solving of reliability and functional safety of the track problems. Given that the Ukrainian railways have no normative documents of these area, the area of research is important.

Analysis of regulatory framework the regulatory, technical and design documentation of railway track and its components have helped to define with:

– technical conditions of track design for a development of railway track reliability conditions classification;

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

– the need to establish the technical condition of the ballast and roadbed through the parameters of the track deformation.

Common materials that are listed in the paper permit the establishment of the characteristics and functional reliability of the track, and dependencies which are linked by these characteristics.

LIST OF REFERENCE LINKS

- Бондаренко, І. О. Рекомендації щодо проектування конструкції нижньої будови колії / І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 36. – С. 100–103.
- Бондаренко, І. О. Щодо забезпечення якості проектування конструкції земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 120–123.
- ГОСТ 78-2004. Шпалы деревянные для железных дорог рельсовой колеи. – Введ. 2004–05–26. – Москва : Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
- Губар, О. В. Обґрунтування норм улаштування та утримання колії для кривих з радіусами менше 350 метрів : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.22.06 / Губар Олексій Васильович ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – 24 с.
- ДБН В.2.3-19-2008. Споруди транспорту залізничної колії 1520 мм. – Введ. 2008–01–26. – Київ : Мінергобуд, 2008. – 151 с.
- ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення ; надано чинності 1994–12–08. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 33 с.
- ДСТУ 2864-94 Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення ; надано чинності 1994–12–08. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 32 с.
- ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунків показників надійності. Загальні вимоги ; надано чинності 1994–12–08. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 39 с.
- ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення ; надано чинності 1994–12–28. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 91 с.
- Дутаев, Х. Х. Особенности устройства, укладки, содержания и ремонта бесстыкового пути на конечных участках рельсовых плетей и с их учетом разработка технических решений : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.55.06 / Дутаев Хаважи Хамзатович ; Рост. государств. ун-т путей сообщ. – Ростов-на-Дону, 2006. – 24 с.
- Журавлев, И. Н. Оценка влияния геоматериалов на напряженно-деформированное состояние железнодорожного земляного полотна : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.22.06 / Журавлев Игорь Николаевич ; Петербург. государств. ун-т путей сообщ. – Санкт –Петербург, 2005. – 24 с.
- Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП-0269 : Наказ М-ва інфраструктури України від 01 берез. 2012 р. № 072-Ц. – Київ : М-во інфраструктури України, Укрзалізниця. – 2012. – 456 с.
- Інструкції з утримання земляного полотна залізниць України : ЦП-0072 : Наказ Укр-залізниця від 08 трав. 2001 р. № 256-Ц. – Київ : М-во трансп. і зв'язку України, Укр-залізниця. – 2001. – 104 с.
- Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів на залізницях України. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України : ЦП-0284 : Наказ М-ва інфраструктури України від 27 лют. 2013 р. № 050-Ц. – Київ : М-во інфраструктури України, Укрзалізниця. – 2013. – 194 с.
- Норми допустимих швидкостей руху рухомого складу по залізничних коліях державної адміністрації залізничного транспорту України шириною 1520 мм : ЦП-0235 : Наказ Укр-залізниця від 14 груд. 2010 р. № 778-Ц. – Київ : М-во інфраструктури України, Укрзалізниця. – 2010. – 53 с.
- Особенности реализации инструкции : ЦП-515 в системе измерений КВЛ и автоматизированной оценки состояния пути / В. М. Филиппов, В. Б. Каменский, Б. В. Исаев, Ю. А. Седелкин // Информ. технологии в трансп. системах и упр. предприятиями : сб. науч. тр. – Москва, 2000. – С. 111–117.
- Певзнер, В. О. Необходимость применения комплексной оценки пути для оценки состояния земляного полотна на слабых основаниях большой мощности / В. О. Певзнер, Т. И. Громова // Соврем. проблемы проектирования, стр-ва и эксплуатации : тр. VIII науч.-техн. междунар. конф. / МИИТ. – Москва, 2011. – С. 187–190.
- Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП-0113 : Наказ М-ва трансп. та зв'язку України від 10 серп. 2004 р. № 630-ЦЗ. – Київ : М-во трансп. та зв'язку України, Укрзалізниця. – 2004. – 32 с.
- СН 449-72. Указания по проектированию земляного полотна железных и автомобильных

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- дорог. – Введ. 1972–12–29. – Москва : Стройиздат, 1983. – 114 с.
20. Содержание балластной призмы железнодорожного пути / Е. С. Варызгин, Б. Н. Бондаренков, А. Н. Марготьев, В. Ф. Федулов ; под ред. Е. С. Варыгина. – Москва : Транспорт, 1978. – 142 с.
 21. Технічні вказівки щодо проведення вхідного контролю приймання матеріалів верхньої будови колії : ЦП-0192 : Наказ М-ва інфраструктури України від 16 серп. 2008 р. № 328-Ц. – Київ : М-во інфраструктури України, Укрзалізниця, 2008. – 90 с.
 22. Jovanovic, S. Railway Track Quality Assessment and Related Decision Making / S. Jovanovic // Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (10.10-13.10.2004). – 2004. – Vol. 6. – P. 5038–5043. doi: 10.1109/icsmc.2004.140-0992.
 23. Kumar, S. Study of the Rail Degradation Process to Predict Rail Breaks, Licentiate / S. Kumar // Thesis, Division of Operation and Maintenance Engineering. – Luleå University of Technology, – Luleå, Sweden. 2006. – 93 p.
 24. Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). – P. 3 : Guide to the application of IEC 62278 for rolling stock RAM. Intern. Electrotechnical Commission Technical Re-port 62278-3. – Geneva : Switzerland, 2010. – 8 p.
 25. Railway applications – The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). – P. 1 : Generic RAMS process EN 50126-1:2012 E. – Netherlands : CENELEC, 2012. – 2 p.

І. О. БОНДАРЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, ел. пошта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

ФОРМУВАННЯ ОЦІНОЧНИХ УМОВ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ДЕФОРМАТИВНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Мета. Дане дослідження спрямоване на обґрунтування меж технічних станів залізничної колії (відповідно станам надійності) для можливості формування нормативної бази з надійності та функціональної безпеки залізничної колії України. **Методика.** Для досягнення мети дослідження використано методи аналізу технічних станів елементів та конструкцій колії, характерних для умов експлуатації залізниць України. **Результати.** Визначено відповідність технічних станів елементів та конструкцій колій станам надійності за існуючими нормами. Вони базуються на оцінці станів колії за результатами колієвимірної стрічки. Стан кожного елементу конструкції колії впливає на її деформативну роботу, але досі відсутні норми, які б пов'язували стан елементів колії зі станом колії за колієвимірними стрічками. Обґрунтовано причини, за якими межі технічних станів не встановлено, та з'ясовано, які дослідження необхідно провести для їх встановлення. **Наукова новизна.** Розроблено класифікацію станів надійності залізничної колії за допустимими відхиленнями при влаштуванні й утриманні рейкової колії. Встановлена необхідність нормування технічних станів балластної призми та земляного полотна для розробленої класифікації. **Практична значимість.** Укрзалізниця є одним із засновників Ради із залізничного транспорту держав-учасників Співдружності. Цим органом видано міждержавний стандарт ГОСТ 32192-2013 «Надежность железнодорожной техники. Основные понятия термины и определения» та на його основі розроблено новий міждержавний стандарт «Безопасность функциональной железнодорожной техники. Термины и определения». У той же час Укрзалізниця є членом організації співпраці залізничних доріг Міжнародного союзу залізничного транспорту, де встановлені в усіх транспортних галузях норми з надійної та безпечної роботи залізниць. Дане дослідження допоможе впровадженню таких стандартів на залізницях України. Стандарти забезпечать підвищення інформаційної ефективності в розглянутій сфері, встановлюючи взаєморозуміння, єдність подання та сприйняття інформації, в тому числі, в договірно-правових відносинах між суб'єктами господарської діяльності, з органами влади, в міждержавних науково-технічних та торговельно-економічних відносинах.

Ключові слова: стан надійності колії; технічний стан колії; елементи колії; конструкція колії; нормативно-технічна та конструкторська документація; норми влаштування та утримання

И. А. БОНДАРЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта irina_bondarenko@ua.fm, ORCID 0000-0003-4717-3032

ФОРМИРОВАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ УСЛОВИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДЕФОРМАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Цель. Данное исследование направлено на обоснование границ технического состояния железнодорожного пути (согласно состояниям надежности) для возможности создания нормативной базы по надежности и функциональной безопасности железнодорожного пути Украины. **Методика.** Для достижения цели исследования использованы методы анализа технических состояний элементов и конструкций пути, характерных для условий эксплуатации железных дорог Украины. **Результаты.** Определено соответствие технических состояний элементов и конструкций пути состояниям надежности по существующим нормам. Они базируются на оценке состояний пути по результатам путеизмерительной ленты. Состояние каждого элемента конструкции пути влияет на его деформативную работу, но до сих пор отсутствуют нормы, которые связывали бы состояние элементов пути с состоянием пути по оценке путеизмерительной ленты. Обоснованы причины, по которым границы технических состояний не установлены, и выяснено, какие исследования необходимо провести для их установок. **Научная новизна.** Разработана классификация состояний надежности железнодорожного пути за допустимыми отклонениями при устройстве и содержании железнодорожного пути. Установлена необходимость нормирования технических состояний балластной призмы и земляного полотна для разработанной классификации. **Практическая значимость.** Укрзалізниця является одним из основателей Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества. Этот орган издал межгосударственный стандарт ГОСТ 32192-2013 «Надежность железнодорожной техники. Основные понятия термины и определения» и на его основе разработал новый межгосударственный стандарт «Безопасность функциональная железнодорожной техники. Термины и определения». В то же время Укрзалізниця является членом организации сотрудничества железных дорог Международного союза железнодорожного транспорта, где установлены во всех транспортных отраслях нормы надежной и безопасной работы железных дорог. Данное исследование поможет внедрению таких стандартов на железных дорогах Украины. Стандарты обеспечат повышение информационной эффективности в рассматриваемой сфере, устанавливая взаимопонимание, единство представления и восприятия информации, в том числе, в договорно-правовых отношениях между субъектами хозяйственной деятельности, с органами власти, в межгосударственных научно-технических и торгово-экономических отношениях.

Ключевые слова: состояние надежности пути; техническое состояние пути; элементы пути; конструкция пути; нормативно-техническая и конструкторская документация; нормы устройства и содержания

REFERENCES

1. Bondarenko I.O. Rekomendatsii shchodo proektuvannia konstrukttsii nyzhnoi budovy kolii [Recommendations are about construction designing of low structure of rail track]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 100-103.
2. Bondarenko I.O. Shchodo zabezpechennia yakosti proektuvannia konstrukttsii zemlianooho polotna zaliznychnoi kolii [About providing quality ground state of rail track]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 120-123.
3. GOST 78-2004. Shpaly derevyannyye dlya zheleznykh dorog relsovoy kolei. [State Standard 78-2004. Wooden sleepers for railway]. Moscow, Standartinform Publ., 2004. 8 p.
4. Hubar O.V. Obruntuvannia norm ulashtuvannia ta utrymannia kolii dlia kryvykh z radiusamy menshe 350 metriv. Avtoreferat Diss. [Justification standards and keeping track arrangement for curves with radii less than 350 meters. Author's abstract]. Dnipropetrovsk, 2011. 24 p.
5. DBN V.2.3-19-2008. Sporudy transportu zaliznychnoi kolii 1520 mm [State Building Regulations B.2.3-19-2008. Transport facilities of railway track 1520 mm]. Kyiv, Minenerhobud Publ., 2008. 151 p.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

6. DSTU 2861-94. *Nadiinist tekhniky. Analiz nadiinosti. Osnovni polozhennia* [State Standard 2860-94. Reliability engineering. Reliability analysis. Main principles]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 1995. 33 p.
7. DSTU 2862-94. *Nadiinist tekhniky. Metody rozrakhunkiv pokaznykiv nadiinosti. Zahalni vymohy* [State Standard 2862-94. Reliability engineering. Methods of calculation of reliability indices. General requirements]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 1995. 39 p.
8. DSTU 2864-94. *Nadiinist tekhniky. Eksperymentalne otsiniuvannia ta kontrol nadiinosti. Osnovni polozhennia* [State Standard 2860-94. Reliability engineering. Experimental evaluation and control reliability. The main principles]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 1995. 32 p.
9. DSTU 2860-94. *Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia* [State Standard 2860-94. Reliability engineering. Terms and definitions]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 1995. 91 p.
10. Dutaev Kh.Kh. *Osobennosti ustroystva, ukladki, soderzhaniya i remonta besстыkovogo puti na kontsevykh uchastkakh relsovykh pletey i s ikh uchetom razrabotka tekhnicheskikh resheniy*. Avtoreferat Diss. [Device features, laying, maintenance and repair of continuous welded railway track on the end portions of rail length and with their account development of technical solutions. Author's abstract]. Rostov-on-Don, 2006. 24 p.
11. Zhuravlev I.N. *Otsenka vliyaniya geomaterialov na napryazhenno-deformirovannoye sostoyanie zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna*. Avtoreferat Diss. [Assessing the impact of geological materials on the stress-strain state of the railway roadbed. Author's abstract]. Saint-Petersburg, 2005. 24 p.
12. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy TsP-0269* [Instructions for ordering and maintenance of railways track of Ukraine. TsT-0269]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2012. 456 p.
13. *Instruktsii z utrymannia zemlianooho polotna zaliznyts Ukrainy. TsT-0072* [Instructions for the maintenance of the roadbed for Ukrzaliznytsia in Ukraine. TsT-0072]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2001. 104 p.
14. *Klasyfikatsiia ta katalog defektiv i poskodzhen elementiv strilochnykh perevodiv na zaliznytsiakh Ukrainy. Klasyfikatsiia ta katalog defektiv i poskodzhen reiook na zaliznytsiakh Ukrainy. TsT-0284* [Classification and catalogue of defects and damages in turnout elements of railways in Ukraine. Classification and catalogue of defects and damages of rails in Ukraine. TsT-0284]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2013. 194 p.
15. *Normy dopustymykh shvydkostei rukhu rukhomoho skladu po zaliznychnykh koliiakh derzhavnoi administratsii zaliznychnoho transportu Ukrainy shyrynoi 1520 mm. TsT-0235* [Norms of permissible speeds of rolling stock for railways state administration of railway of Ukrainian transport, width 1520 mm. TsT-0235]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2010. 53 p.
16. Filippov V.M., Kamenskiy V.B., Isayev B.V., Sedelkin Yu.A. *Osobennosti realizatsii instruktsii: TsP-515 v sisteme izmereniy KBL i avtomatizirovannoy otsenki sostoyaniya puti* [Realization features of instruction CP-515 in the measurement system KBL and automated assessment of the way]. *Informatsionnyye tekhnologii v transportnykh sistemakh i upravleniye predpriyatiyami* [Information technologies in transport systems management of enterprises]. Moscow, 2000, pp. 111-117.
17. Pevzner V.O., Gromova T.I. *Neobkhodimost primeneniya kompleksnoy otsenki puti dlya otsenki sostoyaniya zemlyanogo polotna na slabykh osnovaniyakh bolshoy moshchnosti* [Application importance of comprehensive assessment of roadbed on weak grounds of high power]. *Trudy VIII nauchno-tekhnicheskoy mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennyye problemy proektirovaniya, stroitelstva i ekspluatatsii»* [Proc. of 8th Sci. and Technical Conf. «Contemporary problems of design, construction and operation»]. Moscow, 2011, pp. 187-190.
18. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robot na zaliznytsiakh Ukrainy: TsP-0113* [Regulations on planned preventive repair and track work on the railways of Ukraine. TsT-0113]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2004. 32 p.
19. *SN 449-72. Ukazaniya po proyektirovaniyu zemlyanogo polotna zheleznykh i avtomobilnykh dorog* [Building norms. BN 449-72. Design information of roadbeds of railways and roads]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 114 p.
20. Varyzgin Ye.S., Bondarenkov B.N., Margotev A.N., Fedulov V.F. *Soderzhaniye ballastnoy prizmy zheleznodorozhnogo puti* [The content of the ballast section of a railway track]. Moscow, Transport Publ., 1978. 142 p.
21. *Tekhnichni vkazivky shchodo provedennia vkhidnoho kontroliu pryimannia materialiv verkhnoi budovy kolii: TsP-0192* [Technical instructions about incoming inspection of material acceptance in the upper structure of a track. TsP-0192]. Kyiv, Ukrzaliznytsia Publ., 2008. 90 p.
22. Jovanovic S. *Railway Track Quality Assessment and Related Decision Making*. Proc. of IEEE Intern. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (10.10-13.10.2004), 2004, vol. 6, pp. 5038-5043. doi: 10.1109/icsmc.2004.1400992.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

23. Kumar S. A Study of the Rail Degradation Process to Predict Rail Breaks, Licentiate Thesis, Division of Operation and Maintenance Engineering, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden. 2006. 93 p.
24. Railway applications–Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). P. 3: Guide to the application of IEC 62278 for rolling stock RAM. Intern. Electrotechnical Commission Technical Report 62278-3. Geneva, Switzerland, 2010. 8 p.
25. Railway applications–The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS). P. 1: Generic RAMS process EN 50126-1:2012 E. Netherlands, CENELEC, 2012. 12 p.

Prof. V. D. Petrenko, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. D. V. Laukhin, D. Sc. (Tech.) (Ukraine)
recommended this article to be published

Received: Jan. 15, 2015

Accepted: May 16, 2015

УДК 625.1.033.34:629.4.016.54

Д. М. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (0560 373 15 42, ел. пошта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД КОЛЕСА НА РЕЙКУ ДЛЯ ШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ

Мета. На основі теоретичних передумов та експериментальних досліджень у роботі передбачається обґрунтування вибору факторів, що є визначальними для формування динамічного навантаження на колію від сучасного рухомого складу в умовах швидкісного та високошвидкісного руху. У результаті буде надана методика визначення вертикальної розрахункової сили, що діє від колеса на рейку. **Методика.** Сучасна тенденція розвитку транспортних мереж передбачає впровадження на залізницях України саме швидкісного, а в перспективі – й високошвидкісного руху пасажирських поїздів. Принципові конструкційні зміни у таких поїздах та суттєве зростання швидкості руху призводять до необхідності перегляду методик розрахунку дії рухомого складу на залізничну колію, співвідношення середньоквадратичних відхилень різних динамічних сил, оцінки впливу різних факторів для різних швидкостей руху. В роботі також досліджено зміну динамічного навантаження за результатами експериментальних вимірювань. **Результати.** Отримано залежності середньої та розрахункової сил від швидкості руху для сучасних пасажирських поїздів. Із використанням факторного дисперсійного аналізу отримані чисельні характеристики впливу різних факторів на значення вертикальної сили дії колеса на рейку та встановлені ступені цього впливу на його формування. ґрунтуючись на результатах експериментальних та теоретичних досліджень, показана необхідність перегляду методики визначення розрахункової сили для практичних розрахунків колії на міцність в умовах руху пасажирських поїздів із високими швидкостями. **Наукова новизна.** На основі теоретичних досліджень та проведеного аналізу статистичних даних експериментальних вимірювань встановлено, що основним фактором збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів є коливання системи «колесо-рейка» або так зване «проходження колесом динамічної рейкової нерівності». **Практична значимість.** Існуючі методики розрахунку динамічної складової вертикальних сил потребують оперування таким показником, як приведена маса колії. Отримані в дослідженні результати показують, що такий параметр є штучним та може застосовуватися тільки для низьких швидкостей руху на рівні статичних схем розрахунку.

Ключові слова: розрахунок колії на міцність; верхня будова колії; швидкісний рух; напруження в колії; динамічна сила; динамічна нерівність

Вступ

Розрахунки колії на міцність виконують для вирішення таких задач, як визначення напружень і деформацій в елементах залізничної колії від впливу рухомого складу, обґрунтування конструкції та оцінка потужності колії щодо встановлених умов експлуатації, розрахунки допустимих швидкостей руху за умовами міцності колії, встановлення температурного режиму експлуатації безстикової колії тощо. Їх методика має довгу історію, яку можна відслідкувати, починаючи ще з XIX сторіччя. В розвиток цього напрямку свій вклад внесли багато відомих вітчизняних та закордонних вчених. Сучасним діючим документом є галузева ін-

струкція – «Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» ЦП-0117 [5].

Одне з основних питань, що вирішується практичними розрахунками колії на міцність, – це визначення максимально імовірних напружень в елементах колії, що є показником її міцності. Тому зрозуміло, що основна увага приділялася «важким» вантажним одиницям рухомого складу, переважно локомотивам для вантажних поїздів. Але їх швидкість руху, як правило, не перевищує 80–90 км/год. Навіть з урахуванням пасажирського руху використання методики розрахунку згідно з ЦП-0117 [5] обмежено швидкістю 160 км/год.

Сучасна тенденція розвитку транспортних мереж передбачає впровадження на залізницях України саме швидкісного та високошвидкіс-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ного руху пасажирських поїздів [6, 16]. Принципові конструкційні зміни у таких потягах та суттєве зростання швидкості руху приводить до необхідності перегляду методик розрахунку їх дії на залізничну колію [15, 14].

Під час конструювання високошвидкісного рухомого складу знайшли застосування дві концепції тягового привода: локомотивна (зосереджена тяга) – з тяговими двигунами, встановленими на електровозах, які у високошвидкісних поїздах, як правило, розміщуються по одному в головній і хвостовій частинах поїзда (виключення становлять, наприклад, високошвидкісні поїзди Х2000 (Швеція) і ICE2 (Німеччина), що мають по одному електровозу, або поїзд АРТ-Р (Великобританія), у якому два електровози розташовуються посередині состава), і моторвагонна (розподілена тяга) – з відносно рівномірним розміщенням тягових засобів уздовж поїзда.

На високошвидкісних лініях використовуються рухомий склад з різними конструкціями обпирання кузовів на візки: зчленована, коли два суміжних вагони опираються на один візок, і незалежна, при якій кожний з вагонів підтримується двома індивідуальними візками. Суперництво конструкторів, що дотримуються однієї із двох концепцій, триває. Так, наприклад, міжнародний концерн Alstom випускає поїзди сімейства TGV тільки зі зчленованими вагонами, у той же час проміжні одноосові візки використовуються в поїздах зі зчленованими вагонами Talgo [17].

Вважається, що зменшення жорсткості ресорного підвішування за інших рівних умов сприятливо позначається на плавності руху залізничних екіпажів. Тому існуючі тенденції, спрямовані на поліпшення плавності ходу, у першу чергу характеризуються зниженням жорсткості ресорного підвішування й відповідним збільшенням статичного прогину. Застосування гідравлічних приладів з комп'ютерним керуванням взагалі не вкладається в тотожний перехід до показників пружинно-механічних систем, закладених в існуючих розрахункових методиках.

Мета

На основі теоретичних передумов та експериментальних досліджень обґрунтувати вибір

факторів, що є визначальними для формування динамічного навантаження на колію від сучасного рухомого складу для умов швидкісного та високошвидкісного руху. В результаті надати методику визначення вертикальної розрахункової сили, що діє від колеса на рейку.

Методика

Основним напрямком адаптації розрахунків колії на міцність для високих швидкостей руху треба вважати адекватність врахування динаміки процесу. Що стосується прогину рейки, то приймається, що він відбувається миттєво, а за обрис вигину рейки під впливом динамічного навантаження приймається лінія вигину від статичного навантаження, чисельно рівного значенню динамічної сили в даний момент часу (гіпотеза Н. П. Петрова). Межі застосування такого припущення було розглянуто в роботі [8]. Динамічне навантаження враховується через відповідне визначення розрахункової сили, за яку приймається максимальна вірогідна сила з імовірністю неперевищення 0,994, що складається із статичного навантаження та комплексу динамічних добавок

$$P_{\text{розр}} = \bar{P} + 2,5S, \quad (1)$$

де $\bar{P}$ – середнє значення сили, що діє від колеса на рейку; S – середньоквадратичне відхилення сили, що діє від колеса на рейку.

В практичних розрахунках колії на міцність [4, 5] показники сили, що діють від колеса на рейку, визначаються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{P} &= P_{\text{ст}} + \bar{P}_{\text{р}}; \\ S &= \sqrt{S_{\text{р}}^2 + S_{\text{рн}}^2 + 0,05S_{\text{інк}}^2 + 0,95S_{\text{онк}}^2}; \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де $P_{\text{ст}}$ – вага екіпажа, віднесена до одного колеса (статичне навантаження); $\bar{P}_{\text{р}}$ – середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа; $S_{\text{р}}$ – середньоквадратичне відхилення сили від коливань надресорної ваги екіпажа; $S_{\text{рн}}$ – середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю; $S_{\text{інк}}$ – середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі ізолюваної нерівності; $S_{\text{онк}}$ – середньоквадратичне відхилення сили

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

від наявності на колесі безперервної нерівності.

Максимальне значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа (кузова) можна визначити деякими засобами: через максимальний прогин ресор, через статичний прогин ресор або через коефіцієнт вертикальної динаміки

$$P_{p(\max)} = k_d (P_{ст} - q_k), \quad (3)$$

де k_d – коефіцієнт вертикальної динаміки; q_k – вага необресореної частини екіпажа, віднесена до одного колеса, кН.

Середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа приймається як 75 % від її максимального значення, а середньоквадратичне відхилення – 8 %.

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_p &= 0,75 P_{p(\max)} \\ S_p &= 0,08 P_{p(\max)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Середньоквадратичне відхилення сили від перекочування колеса по рейці з нерівністю визначається за формулою

$$S_{pn} = 1,81 \cdot 10^{-7} \alpha_1 \beta \varepsilon \gamma l \sqrt{\frac{U q_k}{k}} \bar{P} V, \quad (5)$$

де α_1 – коефіцієнт, що залежить від типу шпал (враховує вагу верхньої будови колії, що бере участь у взаємодії з колесом); β – коефіцієнт, що враховує тип рейок (залежить від моменту інерції рейки); ε – коефіцієнт, що залежить від типу шпал; γ – коефіцієнт, що залежить від виду баласту; l – відстань між осями шпал, см; U – модуль пружності підрейкової основи, МПа; k – коефіцієнт відносної жорсткості, см¹; V – швидкість руху, км/год.

Середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі ізолюваної нерівності визначається за формулою

$$S_{инк} = 0,05 \alpha_0 \xi e_0 \frac{U}{k}, \quad (6)$$

де α_0 – коефіцієнт, що залежить від типу шпал; ξ – безрозмірний прогин (відношення додаткового прогину рейки, що виникає внаслідок наявності на колесі ізолюваної нерівності, до глибини цієї нерівності); e_0 – глибина ізолюваної нерівності на колесі, см.

Середньоквадратичне відхилення сили від наявності на колесі безперервної нерівності визначається за формулою

$$S_{бнк} = \frac{1,63 \cdot 10^{-2} \alpha_0 U \sqrt{q_k} V^2}{d^2 \sqrt{kU - 32k^2 q_k}}, \quad (7)$$

де d – діаметр колеса, см.

Як видно з наведених формул, динамічні складові сили, що діє від колеса на рейку, мають складні залежності від багатьох параметрів. Виконані дослідження показали, що для більшості різновидів сучасних одиниць швидкісного та високошвидкісного рухомого складу характерна залежність внеску кожної динамічної добавки у загальне значення сили. Визначальними вихідними даними можна вважати швидкість руху і модуль пружності підрейкової основи. На рис. 1 наведено приклад зміни значень середньоквадратичних відхилень чотирьох динамічних сил, що входять до практичних розрахунків на міцність, залежно від швидкості руху для модуля пружності підрейкової основи 50 МПа.

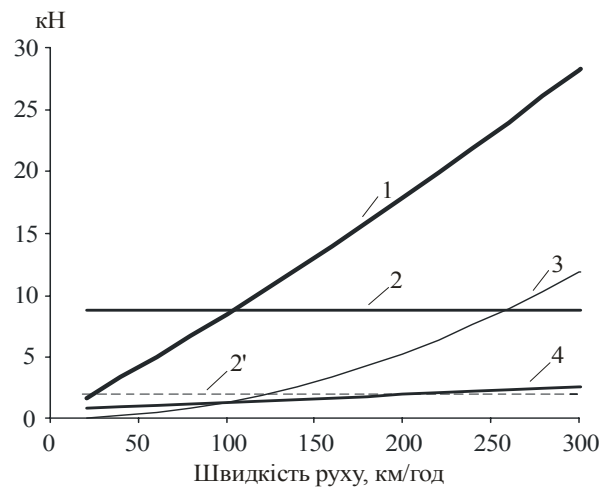


Рис. 1. Зміна середньоквадратичних відхилень динамічних сил від швидкості руху:

1 – S_{pn} ; 2 – $S_{инк}$; 2' – $S_{инк}$ з урахуванням припущення про 5 % таких коліс; 3 – $S_{бнк}$; 4 – S_p

Fig. 1. Change in the standard deviation of the dynamic forces on the velocity of motion:

1 – S_{pn} ; 2 – $S_{инк}$; 2' – $S_{инк}$ take into account about 5 % of such wheels; 3 – $S_{бнк}$; 4 – S_p

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

З виконаного аналізу, приклад якого можна дослідити на рис. 1, видно, що співвідношення середньоквадратичних відхилень різних динамічних сил, а відповідно й вплив різних факторів, для різних швидкостей руху не однаковий. Так можна відокремити зону з швидкостями руху до 80–100 км/год (особливо важливо для вантажних поїздів і детально досліджено в діючих розрахунках колії на міцність) та зон зі швидкістю руху 120–250 км/год і більше 250 км/год.

На рис. 2 наведена залежність складових розрахункової сили (загального середньоквадратичного відхилення і середнього значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа) залежно від швидкості руху. З рисунка видно, що при швидкостях руху до 40–60 км/год середнє значення сили від коливань надресорної ваги екіпажа не поступає за рівнем двом з половиною середньоквадратичним відхиленням, а, відповідно, має суттєвий вплив на остаточне значення розрахункової сили. Зі збільшенням швидкості руху цей вплив швидко зменшується.

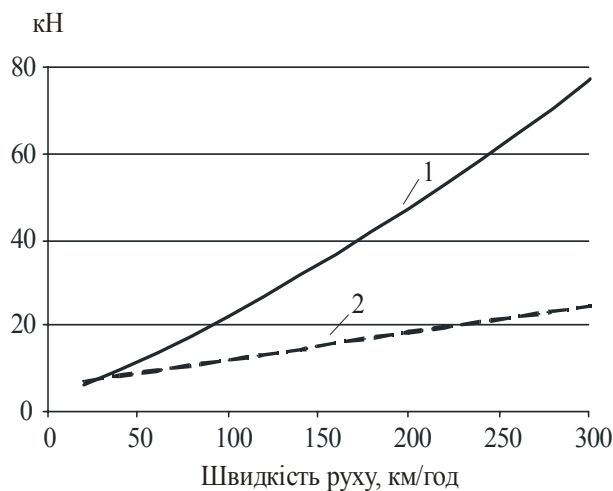


Рис. 2. Зміна складових розрахункової сили залежно від швидкості руху:

$$1 - 2,5S; 2 - \bar{P}_p$$

Fig. 2. The changing of computational power depending on speed:

$$1 - 2,5S; 2 - \bar{P}_p$$

Також можна дослідити зміну динамічного навантаження за результатами експериментальних вимірювань. На рис. 3–6 наведено залежності середньої і розрахункової сил від швид-

кості руху для пасажирських поїздів Talgo і Skoda. Експериментальні вимірювання виконувались Колієвипробувальною галузевою науково-дослідною лабораторією ДНУЗТу. Значення вертикальної сили, що діє від колеса на рейку, визначалися за результатами вимірювань напружень в рейках. Експериментальні випробування відбувалися на прямих ділянках колії без відхилень в утриманні більше ніж другий ступінь [12], верхня будова колії обох дослідних ділянок складалася з безстикової пліти рейок Р65, залізобетонних шпал, щебеневого баласту та відповідала вимогам конструкції колії I категорії [10]. Поїзд Talgo складався з локомотива KZ4A та зчленованих пасажирських вагонів з суміжним обпиранням на одновісні візки. Поїзд Skoda складався з моторних та причіпних вагонів з окремим обпиранням на двовісні візки.

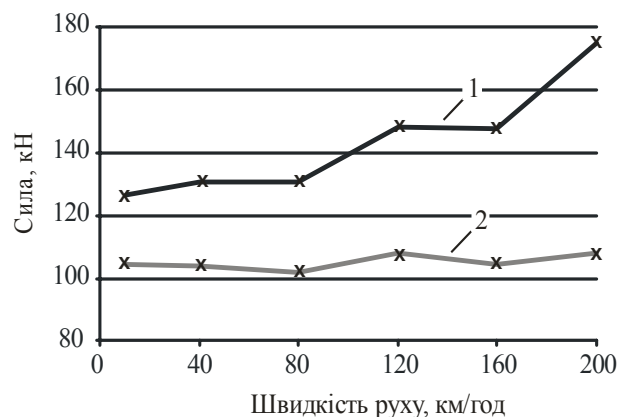


Рис. 3. Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для локомотива KZ4A поїзда Talgo ($P_{ст} = 105,5$ кН):

1 – середнє значення сили; 2 – розрахункове значення сили

Fig. 3. The dependence of the average and calculated vertical force on the speed for the locomotive KZ4A, train Talgo ($P_{ст} = 105,5$ kN):

1 – average force; 2 – calculated value of the force

Наведені значення середньої і розрахункової (1) сил визначалися за результатами статистичної обробки даних.

За наявності достатньої кількості вимірювань для експериментального поїзда Talgo було виконано факторні дисперсійні аналізи [3, 11] для отримання чисельних характеристик впливу різних факторів на значення вертикальної сили дії колеса на рейку.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

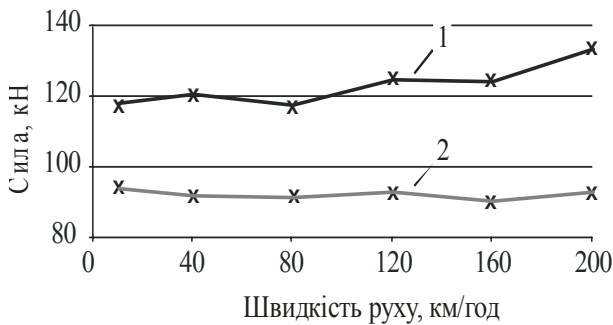


Рис. 4. Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для пасажирського вагона поїзда Talgo ($P_{\text{ст}}=85$ кН):
1 – середнє значення сили; 2 – розрахункове значення сили

Fig. 4. The dependence of the average and the calculated vertical force on speed for passenger train Talgo ($P_{\text{ст}}=85$ кН):

1 – the average force; 2 – calculated value of force

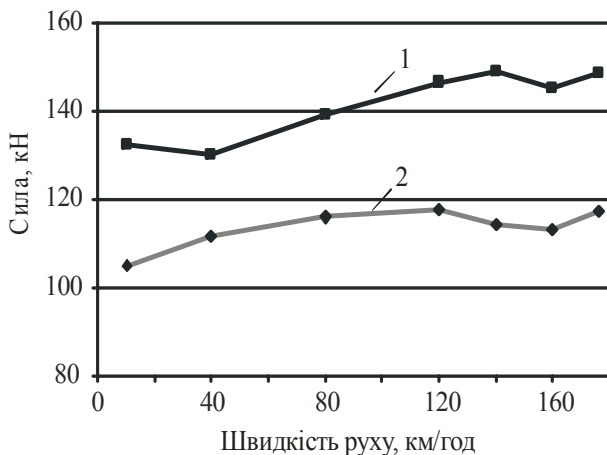


Рис. 5. Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для моторного вагона поїзда Skoda ($P_{\text{ст}}=99$ кН):
1 – середнє значення сили; 2 – розрахункове значення сили

Fig. 5. The dependence of the average and calculated vertical force on the velocity of motion for the engine car, train Skoda ($P_{\text{ст}}=99$ кН):

1 – the average force; 2 – the calculated value of force

Так було проаналізовано вплив номера осі (розглянуто 8 осей пасажирських вагонів з приблизно однаковим навантаженням), що характеризує вплив коливань кузова і нерівностей на колесах.

Також було проаналізовано вплив місця перерізу рейки (розглянуто 8 перерізів на обох

нитках з різними відстанями на ділянці з загальною довжиною 42 метри без наявності суттєвих відхилень в утриманні), що характеризує вплив руху колеса по динамічних нерівностях колії, які виникають в результаті коливань рейки.

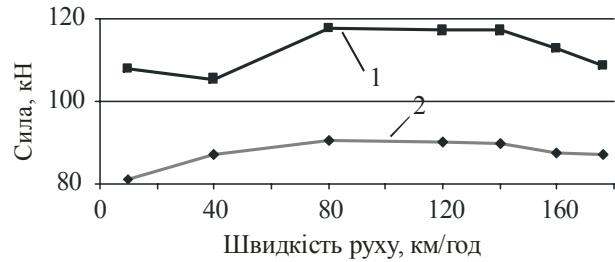


Рис. 6. Залежність середньої і розрахункової вертикальної сили від швидкості руху для причипного вагона поїзда Skoda ($P_{\text{ст}}=84$ кН):
1 – середнє значення сили; 2 – розрахункове значення сили

Fig. 6. The dependence of the average and the calculated vertical force on the speed of movement of a towed wagon, train Skoda ($P_{\text{ст}}=84$ кН):
1 – the average force; 2 – the calculated value of force

Загальна кількість вимірювань в матриці спостережень коливалась для різних рівнів швидкості руху, наприклад, для швидкості руху 200 км/год склала 560 значень. Отримані результати підпорядковуються нормальному закону розподілення. На рис. 7 наведено приклади законів розподілення, отриманих за експеримент-тальними даними, для швидкостей руху 80 і 200 км/год з кроком дискретизації 12,5 кН.

Для швидкості руху 200 км/год було отримано ступінь впливу (за коефіцієнтом Фішера) номера осі вагона на рівні 1,696; ступінь впливу номера перерізу рейки – 122,4 при рівні критичного значення коефіцієнта Фішера 2,02. Для інших значень швидкості руху співвідношення наведених показників принципово не змінюється. Наприклад, при швидкості руху 80 км/год отримано коефіцієнти Фішера 0,296 і 120,1 для номера осі і перерізу рейки відповідно.

Таким чином можна зробити висновок, що коливання кузова в сучасних пасажирських вагонах якісно гасяться і не приводять до суттєвого збільшення вертикальної сили тиску колеса на рейку. Основним фактором збурення динамічної сили можна вважати проходження колесом динамічної нерівності колії, яка утво-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

рюється навіть за відсутності суттєвих геометричних нерівностей внаслідок коливань рейки на пружній підрейковій основі.

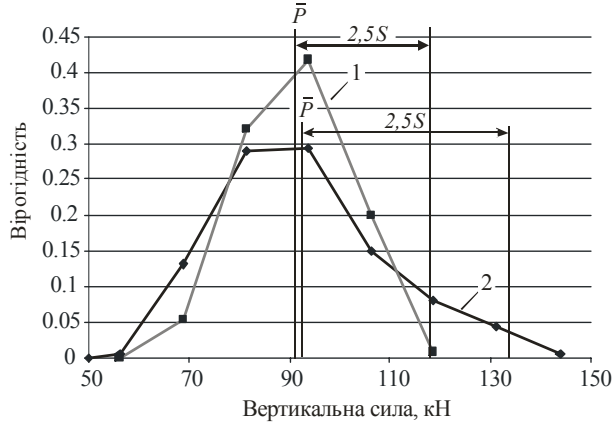


Рис. 7. Закон розподілення вертикальної сили від колеса на рейку за експериментальними вимірюваннями для пасажирського вагона поїзда Talgo:
1 – швидкість руху 80 км/год; 2 – швидкість руху 200 км/год

Fig. 7. The distribution law of the vertical force of the wheel on the rail by experimental measurements for passenger train Talgo:
1 – speed of 80 km/h; 2 – speed of 200 km/h

Тому доцільно переглянути методику визначення саме динамічної сили від проходження колеса по рейковій нерівності. В первинному вигляді формулу (5) можна подати так

$$S_{\text{рн}} = 0,707\alpha_0 \frac{\pi^2}{\sqrt{2g}} \sqrt{\frac{Uq_k}{k}} Vi, \quad (8)$$

де 0,707 – коефіцієнт переходу від максимального значення сили до її середньоквадратичного відхилення, що відповідає тригонометричній функції, яка закладається для опису гармонічних коливань; g – прискорення вільного падіння; i – динамічний ухил рейкової нерівності; α_0 – коефіцієнт, який увійшов у формулу згодом, визначається відношенням маси колеса і маси колії, приведених до точки їх контакту.

Формула (8) є результатом обробки даних рішення диференційного рівняння коливань механічної пари «колесо-рейка», первинно отримана для підрейкової основи з дерев'яними шпалами [2, 4, 13]. Для залізобетонних шпал було запропоновано іншу формулу [1, 13]

$$S_{\text{рн}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-3} \bar{P} V \sqrt{q_k}}{\sqrt[8]{EIU^3}}, \quad (9)$$

де E – модуль пружності рейкової сталі; I – момент інерції рейки.

Однак в сучасних практичних розрахунках колії на міцність [5] використовується формула (5), отримана з формули (8) з відповідними коефіцієнтами, які враховують насамперед зміну параметрів динамічної нерівності при застосуванні залізобетонних шпал, викликану збільшенням жорсткості підрейкової основи та зміною приведеної маси колії

$$\left. \begin{aligned} i &= A\alpha_1\beta\epsilon\gamma l\bar{P} \\ A &= \frac{1,788 \cdot 10^{-4} \sqrt{2g}}{\pi^2 \alpha_0} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

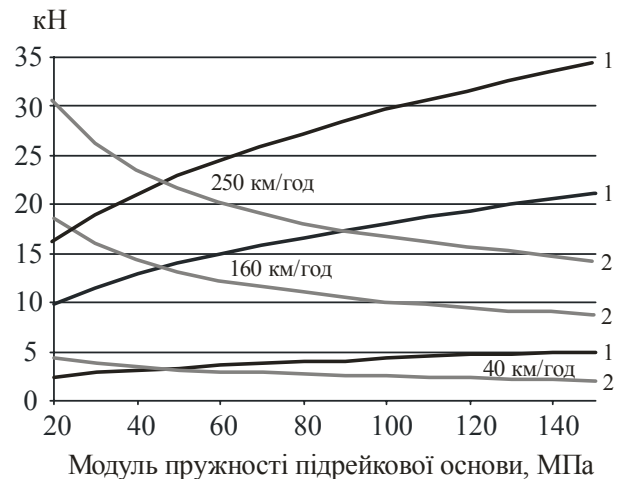


Рис. 8. Залежність середньоквадратичного відхилення сили від проходження колеса по рейковій нерівності відносно модуля пружності підрейкової основи:

1 – за формулою (5); 2 – за формулою (9)

Fig. 8. The dependence of the standard deviation forces from passing wheels on rail inequality relatively elastic modulus of under rail bases:
1 – according to the formula (5);
2 – according to the formula (9)

На рис. 8 наведено приклад залежностей середньоквадратичного відхилення сили від проходження по рейковій нерівності від модуля пружності підрейкової основи, розрахованих за формулами (5) і (9), для декількох рівнів швидкостей руху: 40, 160 і 250 км/год. При низьких швидкостях руху розбіжність в розрахунках незначна. Для модуля пружності підрейкової осно-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ви біля 50 МПа результати збігаються. Суттєве збільшення модуля пружності призводить до розходження результатів, яке стає особливо відчутним при високих швидкостях руху. Причому за формулою (5) збільшення модуля пружності збільшує силу: більш жорстка колія – більш важка (особливо у порівнянні дерево – залізобетон), а значить – більша приведена маса колії. За формулою (9) збільшення модуля пружності зменшує силу: більш жорстка колія тієї самої конструкції (літній залізобетон – зимовий залізобетон) має меншу довжину і глибину прогину, а значить – менша приведена маса колії.

В цьому дослідженні не передбачається вирішувати задачу визначення приведеної маси колії. Навпаки, наведені міркування показують, що такий параметр є штучним і може застосовуватися тільки для низьких швидкостей руху на рівні статичних схем розрахунку [7].

Результати

Проаналізовано результати статистичної обробки даних експериментальних досліджень руху сучасних пасажирських поїздів із швидкостями руху до 200 км/год щодо рівня динамічної вертикальної сили дії колеса на рейку. Встановлено ступені впливу різних факторів на формування значення цієї сили. Отримано як експериментальне, так і теоретичне обґрунтування необхідності перегляду методики визначення розрахункової сили для практичних розрахунків колії на міцність в умовах руху пасажирських поїздів з високими швидкостями. Напевно, такий перегляд повинен полягати не тільки в корегуванні існуючих методів, а й у формуванні нових підходів на основі сучасних математичних моделей або відповідних статистичних даних. Наприклад, один із закордонних варіантів вирішення поставленої задачі [9] передбачає визначення розрахункової сили, як суми статичного навантаження і динамічної добавки, яка визначається залежно від стану колії і швидкості руху

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{розр}} &= P_{\text{ст}} + sP_{\text{ст}} \\ s &= n\varphi \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

де n – коефіцієнт, що враховує стан колії: $n=0,1$ – відмінний стан, $n=0,2$ – гарний стан, $n=0,3$ – поганий стан; φ – коефіцієнт, який залежить від швидкості руху:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi &= 1, V \leq 60 \text{ км/год}; \\ \varphi &= 1 + 0,5 \frac{V-60}{190}, 60 < V \leq 300 \text{ (пас. поїзд)}; \\ \varphi &= 1 + 0,5 \frac{V-60}{80}, 60 < V \leq 140 \text{ (вант. поїзд)}. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Такий підхід приховує вплив детальних характеристик колії та рухомого складу на формування динамічної сили, але дає змогу отримувати адекватні чисельні значення для відповідних розрахунків міцності залізничної колії.

Наукова новизна та практична значимість

Наведені результати надають подальший розвиток науковій задачі щодо створення сучасних методів розрахунків напружено-деформованого стану залізничної колії для високих швидкостей руху. На основі теоретичних досліджень і виконаного аналізу статистичних даних експериментальних вимірювань встановлені фактори збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів. Отримані рекомендації удосконалюють існуючі розрахунки колії на міцність, вирішуючи практичну задачу їх застосування для швидкостей руху більше 160 км/год.

Висновки

Значення розрахункової вертикальної сили, що діє від колеса на рейку, залежить від багатьох факторів. При практичних розрахунках колії на міцність цей показник формується з декількох складових, вплив яких на різних швидкостях руху не однаковий. За аналізом результатів аналітичних розрахунків встановлено, що за впливовістю різних динамічних складових можна відокремити такі швидкісні зони: до 80–100 км/год, 120–250 км/год, більше 250 км/год.

Як теоретичні дослідження, так і аналіз статистичних даних експериментальних вимірювань показують, що основним фактором збудження динамічної складової вертикальної сили для сучасних пасажирських поїздів, що рухаються з швидкістю 120 км/год і більше, є коливання системи «колесо-рейка» або так зване проходження колесом динамічної рейко-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

вої нерівності. Існуючі методи розрахунку таких сил потребують оперувати таким показником, як приведена маса колії. Наведені дослідження показують, що такий параметр є штучним і може застосовуватися тільки для низьких швидкостей руху на рівні статичних схем розрахунку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вериги, М. Ф. Основные положения методики расчета сил, действующих на железобетонные шпалы / М. Ф. Вериги // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1963. – Вып. 257. – С. 5–39.
2. Взаимодействие пути и подвижного состава / Е. М. Бромберг, М. Ф. Вериги, В. Н. Данилов, М. А. Фришман. – Москва : Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.
3. Гурский, Е. И. Теория вероятностей с элементами математической статистики / Е. И. Гурский. – Москва : Высш. шк., 1971. – 328 с.
4. Даніленко, Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом : підруч. для вищ. навч. закл. : у 2 т. / Е. І. Даніленко. – Київ : Інпрес, 2010. – Т. 2. – 456 с.
5. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Транспорт України, 2004. – 64 с.
6. Крашенінін, О. С. Напрямки удосконалення системи утримання моторвагонного рухомого складу / О. С. Крашенінін, В. А. Гогаєв // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2014. – № 4 (52). – С. 119–126. doi: 10.15802/stp2014/27360.
7. Курган, Д. Модель напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути на основе волновой теории распространения напряжений / Д. Курган, И. Бондаренко // Problemy Kolejnictwa. – 2013. – Vol. 159. – P. 99–111.
8. Курган, Д. М. Особливості сприйняття навантаження елементами залізничної колії при високих швидкостях руху / Д. М. Курган // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2015. – № 2 (56). – С. 136–145. doi: 10.15802/stp2015/42172.
9. Лихтбергер, Б. Железнодорожный путь : справочник / Б. Лихтбергер. – Гамбург : DVV Media Group GmbH, 2010. – 434 с.
10. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП-0287 / А. Бабенко, Г. Линник, К. Мойсеєнко [та ін.]. – Київ : Де-валта, 2014. – 45 с.
11. Рибкін, В. В. Надійність залізничної колії : навч. посіб. / В. В. Рибкін, І. О. Бондаренко, Д. М. Курган. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2013. – 154 с.
12. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0267 / О. М. Патласов, В. В. Рибкін, Ю. В. Палейчук, С. О. Соломаха, П. В. Панченко. – Київ : Поліграфсервіс, 2012. – 46 с.
13. Чернышов, М. А. Практические методы расчета пути / М. А. Чернышов. – Москва : Транспорт, 1967. – 236 с.
14. André, José Maria C.S. A railway steering system guided by a reference ahead of the train / José Maria C.S. André // Vehicle System Dynamics. – 2013. – Vol. 51. – Iss. 3. – P. 481–496. doi: 10.1080/00423114.2012.757333.
15. Roanes-Lozano, E. The Geometry of Railway Geometric Overthrow Revisited Using Computer Algebra Methods / E. Roanes-Lozano // Mathematics in Computer Science. – 2013. – Vol. 7. – Iss. 4. – P. 473–485. doi: 10.1007/s11786-013-0164-7.
16. Stukalina, O. Problems of rail connections between Ukraine and its neighboring countries / O. Stukalina, A. Dzhaleva-Chonkova // Mechanics Transport Communications. – 2012. – Vol. 10. – Iss. 3/2. – P. 3.4–3.8.
17. Talgo 250 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 8. 04.2015.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Д. Н. КУРГАН^{1*}

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТ КОЛЕСА НА РЕЛЬС ДЛЯ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

Цель. На основе теоретических предпосылок и экспериментальных исследований в работе предусматривается обоснование выбора факторов, которые являются определяющими для формирования динамической нагрузки на путь от современного подвижного состава в условиях скоростного и высокоскоростного движения. В результате будет получена методика определения вертикальной расчетной силы, которая действует от колеса на рельс. **Методика.** Современная тенденция развития транспортных сетей предусматривает внедрение на железных дорогах Украины скоростного, а в перспективе – и высокоскоростного движения пассажирских поездов. Принципиальные конструкторские изменения в таких поездах и существенное увеличение скорости движения приводят к необходимости пересмотра методик расчета воздействия подвижного состава на железнодорожный путь, соотношения среднеквадратических отклонений различных динамических сил, оценки воздействия различных факторов для разных скоростей движения. В работе также исследовано изменение динамической нагрузки по результатам экспериментальных измерений. **Результаты.** Получены зависимости средней и расчетной сил от скорости движения для современных пассажирских поездов. С использованием факторного дисперсионного анализа получены численные характеристики влияния разных факторов на значение вертикальной силы действия колеса на рельс и установлены степени этого влияния на его формирование. Опираясь на результаты экспериментальных и теоретических исследований, обоснована необходимость пересмотра методики определения расчетной силы для практических расчетов пути на прочность в условиях движения пассажирских поездов с высокими скоростями. **Научная новизна.** На основе теоретических исследований и проведенного анализа статистических данных экспериментальных измерений установлено, что основным фактором возбуждения динамической составляющей вертикальной силы для современных пассажирских поездов являются колебания системы «колесо–рельс» или так называемое «прохождение колесом динамической неровности пути». **Практическая значимость.** Существующие методики расчета динамической составляющей вертикальных сил нуждаются в таком показателе, как приведенная масса пути. Полученные в исследовании результаты показывают, что такой параметр является искусственным и может использоваться только для низких скоростей движения на уровне статичных схем расчета.

Ключевые слова: расчет пути на прочность; верхнее строение пути; скоростное движение; напряжение в рельсе; динамическая сила; динамическая неровность

D. M. KURHAN^{1*}

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

DETERMINATION OF DYNAMIC LOADS FROM THE WHEEL ON THE RAIL FOR HIGH-SPEED TRAINS

Purpose. On the basis of theoretical assumptions and experimental studies the paper provides the choice of the factors for the formation of dynamic load on the track of modern rolling stock in the conditions of high-speed. This results in a calculation method of determining a vertical force which acts on the wheels on the rails. **Methodology.** The current trend of development of transport networks is the introduction to Ukrainian railways speed, and in the future – high-speed, passenger trains. Fundamental structural changes in these trains, and a significant increase in speed results in a need to revise the calculation methods of action of rolling stock on the railway track, the ratio of the standard deviations of various dynamic forces, assess the impact of different factors for different speeds. In the work investigated the change in the dynamic load on the results of experimental measurements. **Findings.** The de-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

pendences of the average and the calculated forces on the speed of modern passenger trains were obtained. Using factor analysis of variance obtained numerical characteristics of the influence of different factors on the value of the vertical force acts on the wheel rail and the degrees of influence of various factors on its deformation were determined. Based on the results of experimental and theoretical research, the necessity of revising the methodology for determining the estimated power for practical calculations the way to strength in terms of passenger trains at high speeds was grounded. **Originality.** On the basis of theoretical research and analysis of statistical data of experimental measurements it was found that the main factor driving the dynamic vertical force component for modern passenger trains are the vibrations of the «wheel-rail» system or so-called «dynamic wheel passing the rough ways». **Practical value.** Existing methods of calculating the dynamic component of the vertical forces need such indicators as the reduced mass of the way. The obtained results in the study indicate that a parameter is artificial and can only be used for low speeds at the level of static calculation schemes.

Keywords: railways calculation for strength; permanent way; high-speed train; tension in a rail; dynamic force; dynamic irregularity

REFERENCES

1. Verigo M.F. Osnovnyye polozheniya metodiki rascheta sil, deystvuyushchikh na zhelezobetonnyye shpaly [Basic methods of calculating the forces acting on concrete sleepers]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Proc. of All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport]. Moscow, 1963, vol. 257, pp. 5-39.
2. Bromberg Ye.M., Verigo M.F., Danilov V.N., Frishman M.A. *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava* [The interaction between the track and rolling stock]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1956. 280 p.
3. Gurskiy Ye.I. *Teoriya veroyatnostey s elementami matematicheskoy statistiki* [Probability theory with elements of mathematical statistics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971. 328 p.
4. Danilenko E.I. *Zaliznychna koliia. Ulashtuvannia, proektuvannia i rozrakhunky, vzaemodiia z rukhomym skladom* [Railway track. Arrangement, design and calculations, interaction with rolling stock]. Kyiv, Inpres Publ., 2010, vol. 2. 456 p.
5. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stikist. TsP-0117* [The terms of payment of railway track for strength and stability. TsP-0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2004. 64 p.
6. Krasheinin O.S., Hohaiev V.A. Napriamky udoskonalennia systemy utrymannia motorvahonnoho rukhomoho skladu [Improvement directions of maintenance system of multiple unit]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 4 (52), pp. 119-126. doi: 10.15802/stp2014/27360.
7. Kurgan D., Bondarenko I. Model napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zheleznodorozhnogo puti na osnove volnovoy teorii rasprostraneniya napryazheniy [Model the stress-strain state of railway track based on the wave propagation of theory stresses]. *Problemy Kolejnictwa*, 2013, vol. 159, pp. 99-111.
8. Kurhan D.M. Osoblyvosti spryiniattia navantazhennia elementamy zaliznychnoi kolii pry vysokyykh shvydkostiakh rukhu [Features of perception of loading elements of the railway track at high speeds of the movement]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 2 (56), pp. 136-145. doi: 10.15802/stp2015/42172.
9. Likhtberger B. *Zheleznodorozhnyy put* [Railway track]. Hamburg, DVV Media Group GmbH Publ., 2010. 434 p.
10. Babenko A., Lynnyk H., Moiseienko K. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robot na zaliznytsiakh Ukrainy. TsP-0287* [Regulations on safety planning and track repair work on the railways of Ukraine. TsP-0287]. Kyiv, Devalta Publ., 2014. 45 p.
11. Rybkin V.V., Bondarenko I.O., Kurhan D.M. *Nadiinist zaliznychnoi kolii* [Reliability of railway track]. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian Publ., 2013. 154 p.
12. Patlasov O.M., Rybkin V.V., Paleichuk Yu.V., Solomakha S.O., Panchenko P.V. *Tekhnichni vkazivky shchodo otsinky stanu reikovo kolii za pokaznykamy koliievymiriuvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovo kolii. TsP-0267* [Technical guidelines for the assessment of rail track by track measuring performance cars and to ensure traffic safety during the retreat from the norms of maintenance of a rail track. TsP-0267]. Kyiv, Polihrafservis Publ., 2012. 25 p.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

13. Chernyshov M.A. *Prakticheskiye metody rascheta puti* [Practical methods for calculating the track]. Moscow, Transport Publ., 1967. 236 p.
14. André José Maria C.S. A railway steering system guided by a reference ahead of the train. *Vehicle System Dynamics*, 2013, vol. 51, issue 3, pp. 481-496. doi: 10.1080/00423114.2012.757333.
15. Roanes-Lozano E. The Geometry of Railway Geometric Overthrow Revisited Using Computer Algebra Methods. *Mathematics in Computer Science*, 2013, vol. 7, issue 4, pp. 473-485. doi: 10.1007/s11786-013-0164-7.
16. Stukalina O., Dzhaleva-Chonkova A. Problems of rail connections between Ukraine and its neighboring countries. *Mechanics Transport Communications*, 2012, vol. 10, issue 3/2, pp. 3.4-3.8.
17. Talgo 250. Available at: http://www.talgo.com/pdf/t250_250H_en.pdf (Accessed 8 April 2015).

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна); к.т.н., доц. В. П. Гнатенком (Україна)

Надійшла до редколегії 15.03.2015

Прийнята до друку 29.05.2015

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 539.43:669.141.25-026.56

И. В. АКИМОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Композиционные материалы и технологии», Запорожский национальный технический университет,
ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (061) 769 83 91, эл. почта tmzntu@gmail.com,
ORCID 0000-0001-6076-0149

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТОЙ ГРАФИТИЗИРОВАННОЙ СТАЛИ

Цель. Благодаря наличию многих ценных свойств (низкая себестоимость, высокие технологичность и демпфирующая способность, теплопроводность, жидкотекучесть и др.), графитизированные чугуны находят широкое применение для деталей, работающих в условиях статических и циклических нагрузок, в условиях износа – при сухом трении и в условиях агрессивных сред – при повышенных температурах. В то же время, по причине значительного содержания графитной фазы в структуре, чугуны обладают сравнительно низкими механическими свойствами. В этой связи обращают на себя внимание графитизированные стали, особенность которых заключается в наличии графитовых включений в структуре, придающих этим материалам специфические свойства чугуна. Но, в отличие от чугунов, содержание графита в них в 2–3 раза меньше, что положительно сказывается на показателях механических и служебных свойств. Данная работа посвящена оптимизации состава литой графитизированной стали, обладающей высокими показателями механических свойств. **Методика.** В работе использовали метод планирования эксперимента, на основании которого выплавляли опытные сплавы и исследовали их механические свойства. Полученные результаты подвергали регрессионной обработке, после чего получили зависимости влияния компонентов сплава на его свойства. Используя метод графической оптимизации, определяли оптимальный состав стали с высокими показателями механических свойств. **Результаты.** Установлено, что наиболее значительное влияние на прочность и циклическую выносливость графитизированных сталей оказывают углерод и кремний. В работе был предложен химический состав литой графитизированной стали с высокими показателями статической и циклической прочности. **Научная новизна.** С применением методов математического планирования эксперимента получены зависимости, описывающие влияние углерода, кремния и меди на показатели статической и циклической прочности и позволяющие оптимизировать составы графитизированных сталей. **Практическая значимость.** Использование графитизированных сталей оптимизированного состава в машиностроении позволит расширить их область применения с обеспечением повышения надежности и долговечности деталей, работающих в условиях как статических, так и циклических нагрузок.

Ключевые слова: графитизированная сталь; структура; механические свойства; оптимизация состава

Введение

Как известно, графитизированные стали представляют собой железоуглеродистые сплавы, в которых углерод частично находится в виде графитовых включений. Благодаря более низкому по сравнению с чугунами содержанию углерода (1,2–1,8 %) и, соответственно, графита,

эти сплавы сочетают в себе, с одной стороны, положительные качества чугунов (высокая демпфирующая способность, низкая чувствительность к концентраторам напряжений, высокие технологические свойства, невысокая стоимость, и др.) [1, 11, 18, 17], с другой, более высокие по сравнению с чугунами механиче-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ские свойства [8, 10, 13]. Детали машин, для которых графитизированные стали могли бы использоваться как конструкционные материалы (коленчатые валы, шатуны, сепараторы и вкладыши подшипников и т.п.) работают в достаточно разнообразных условиях нагружения, включающих как статические, так и циклические нагрузки с широкими диапазонами частот [16, 19]. Так, по данным Пойды А. А. и Хуторянского Н. М. [14] частота рабочих колебаний коленчатого вала из высокопрочного чугуна ВЧ50-2 для дизеля ПД1М, несущего шесть цилиндровых масс и массу генератора, может достигать 22 000 колебаний в минуту). Учитывая этот факт, можно сказать, что одним из определяющих факторов выбора для таких изделий материала является высокий уровень его статической и циклической прочности как при низких, так и высоких частотах нагружения. В то же время, сопротивление графитизированных сталей разрушению при циклических нагрузках, как альтернативного материала для указанных изделий, изучено недостаточно. Имеются лишь отдельные сведения по малоцикловой усталости [2] и циклической вязкости разрушения [15] при частоте нагружения, не превышающих 15 Гц.

В этой связи, исследование сопротивления разрушению графитизированных сталей при статических и циклических нагрузках в условиях высоких частот нагружения, как потенциального конструкционного материала для тяжело нагруженных изделий ответственного назначения, представляет научный и практический интерес.

Цель

Цель работы – оценка влияния углерода и кремния как элементов, наиболее сильно влияющих на процессы графитизации и меди, которая согласно [12] является элементом, способствующим графитизации вторичного цемента, улучшающим распределение графитовых включений и повышающим механические свойства графитизированных сплавов на формирование структуры металлической основы, графитной фазы и свойств графитизированных сталей. А также определение оптимального содержания указанных химических элементов для получения высоких показателей статической и циклической прочности исследуемых сталей.

Методика

Выплавку различных составов сталей проводили с использованием метода планирования эксперимента, где в качестве независимых переменных было выбрано содержание углерода (0,5–1,9 %) и кремния (0,6–2,6 %), а также меди (0–4,0 %). Содержание остальных химических элементов составляло: 0,60–0,70 % Mn; 0,15–0,18 % Cr; 0,22–0,25 % Al и до 0,02 % S и 0,03% P. В качестве зависимых переменных были приняты статическая σ_b и циклическая σ_{-1} прочности сплава. Используя метод планирования эксперимента [4] в работе был реализован полный факторный эксперимент второго порядка 2^3 (табл. 1), включающий в себя восемь основных опытов, а также опыты на «звездном» и нулевом уровнях.

Таблица 1

Table 1

Центральный композиционный план 2^3 **Central composite plan 2^3**

Интервал варьирования и уровни факторов	Изучаемые факторы		
	X_1 (C, %)	X_2 (Si, %)	X_3 (Cu, %)
Нулевой уровень: $X_0 = 0$	1,2	1,6	2,0
Интервал варьирования	1,0	0,4	0,6
	1,682	0,7	1,0
Нижний уровень: $X = -1,0$	0,8	1,0	0,8
Верхний уровень: $X = +1,0$	1,6	2,2	3,2
Звездные точки	$X = -1,682$	0,5	0,6
	$X = 1,682$	1,9	2,6
			4,0

По составленной матрице планирования в индукционной печи выплавляли опытные сплавы, которые разливали в сухие песчано-глинистые формы. Из полученных слитков изготавливали испытательные образцы и исследовали их механические свойства. Временное сопротивление σ_b и относительное удлинение δ определяли в соответствии с ГОСТ 1497–84. Испытания на усталость сталей при высокочастотном знакопеременном нагружении проводили

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ли, руководствуясь ГОСТ 25.502-79, на исследовательских комплексах Белорусского государственного технологического университета при частоте 18,0 кГц, с определением характеристик сопротивления металла формированию очагов разрушения [5]. Фазовый состав и размер структурных элементов сталей определяли, используя методики количественной металлографии [6]. Полученные результаты подвергали регрессионной обработке, в результате чего получали зависимости влияния компонентов сплава на его свойства. Используя метод графической оптимизации, предложенный Ковшовым В.Н. [9], определяли оптимальный состав стали с высокими показателями механических свойств.

Результаты

Результаты металлографического анализа полученных сплавов в литом (не термообработанном) состоянии показали разнородность микроструктур, главным образом, в зависимости от содержания углерода и кремния [3].

Для улучшения структуры и свойств опытных сталей полученные отливки подвергали закалке (нагрев до 860 °С, выдержка 1 час, охлаждение в масле) с последующим средним отпуском (500 °С, 2 часа). Такая термообработка способствовала образованию сорбита отпуска в структуре металлической основы и практически не изменила количество, форму и распределение графитовых включений в ней.

Из полученных термообработанных слитков вырезали образцы для механических испытаний, результаты которых приведены в табл. 2. Их анализ показал, что все исследуемые характеристики проявляли значительную чувствительность к структуре. Так наиболее высокими показателями статической и циклической прочности характеризовалась сталь, содержащая по варьируемым элементам 0,72 % С; 2,17 % Si и 3,25 % Cu (см. табл. 2, вар. 7), что объясняется как благоприятной – компактной формой графитовых включений, так и мелкодисперсной сорбитной структурой, способствующей повышению прочностных характеристик [7]. Обращает на себя внимание сталь, обладающая наибольшей пластичностью (см. табл. 2, вар. 9). В ее структуре было наименьшее количество графитной фазы и наи-

большее – высокопластичной ферритной фазы, что в целом способствовало повышению относительного удлинения δ до 22 %. Наиболее низкими показателями прочности и пластичности характеризовалась сталь вар. 10 (см. табл. 2), что можно объяснить наибольшим содержанием в ее составе углерода, а, следовательно, и графитной, не компактной фазы в структуре, снижающей механические свойства.

Регрессионная обработка полученных результатов механических свойств позволила получить ряд уравнений, описывающих зависимости механических свойств от содержания углерода, кремния и меди.

Таблица 2

Table 2

Механические свойства опытных сплавов

Mechanical properties of experimental alloys

№ опыта	Химический состав					
	С, %		Si, %		Cu, %	
	р.	ф.	р.	ф.	р.	ф.
1	0,8	0,78	1,0	1,01	0,8	0,84
2	1,6	1,54		1,07		0,85
3	0,8	0,78	2,2	2,18		0,92
4	1,6	1,73		2,29		0,87
5	0,8	0,74	1,0	1,01	3,2	3,17
6	1,6	1,74		1,04		3,15
7	0,8	0,72	2,2	2,17		3,25
8	1,6	1,78		2,25		3,19
9	0,5	0,48	1,6	1,66	2,0	1,90
10	1,9	1,95		1,66		1,94
11	1,2	1,23	0,6	0,62		1,95
12		1,26		2,55		2,09
13		1,23	1,6	1,61	0	0,02
14		1,21		1,69	4,0	3,95
15		1,27		1,65	2,0	2,01

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Окончание табл. 2
Continuation of table 2

№ опыта	Механические свойства		
	σ_B , МПа	δ , %	σ_{-1} , МПа
1	820	19	384
2	760	12	315
3	915	15	385
4	778	8	312
5	970	17	389
6	880	10	322
7	1 280	12	409
8	990	6	336
9	720	22	361
10	443	5	264
11	874	15	384
12	730	8	360
13	745	14	355
14	721	10	342
15	887	12	358

Примечание: р. и ф. – расчетный и фактический составы варьируемых элементов соответственно, согласно табл. 1.

После проверки адекватности моделей и перехода к натуральным переменным были получены уравнения второго порядка:

$$\sigma_{-1} = 397 + 126C - 76Si - 7Cu - 5CSi + CCu + 6SiCu - 83C^2 + 21Si^2; \quad (1)$$

$$\sigma_B = 312 + 1029C - 63Si + 37Cu - 144CSi - 48CCu + 53SiCu - 372C^2 + 52Si^2 - 4Cu^2; \quad (2)$$

$$\delta = 36,7 - 19,8C - 2,3Si - Cu + 0,5CSi + 0,3CCu - 0,2SiCu + 3,4C^2 - 0,5Si^2. \quad (3)$$

Проведенный графический анализ полученных уравнений показал, что кривые зависимости статической и циклической прочности от содержания углерода проходят через максимум в области его содержания 0,8–1,0 % С.

О влиянии кремния и меди на показатели сопротивления статическому и усталостному разрушению можно сказать, что отдельное влияние этих элементов незначительно повышало пределы прочности и выносливости стали.

Для определения состава, обеспечивающего оптимальное сочетание свойств статической и циклической прочности графитизированной стали, выполняли графическую оптимизацию содержания углерода и меди при исходном содержании кремния 2,2 %. Для определения оптимального содержания указанных элементов был построен график двумерных сечений поверхностей отклика по двухфакторному полиному, в который предварительно было введено наиболее желательное числовое значение исследуемых параметров: $\sigma_B = 1\,000\text{--}1\,200$ МПа и $\sigma_{-1} = 1\,000\text{--}1\,200$ МПа. Результатом оптимизации было определение зоны оптимальных содержаний углерода 0,8–1,1 % и меди 3,0–3,2 % (рис. 1, заштрихованная область).

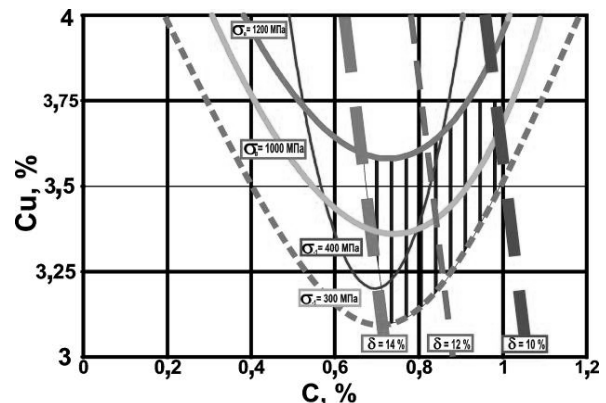


Рис. 1. Графическая оптимизация состава высокопрочной графитизированной стали по углероду и меди при Si=2,2 %

Fig. 1. Graphical optimization of the high strength of graphitized carbon steel and copper when Si=2,2 %

Научная новизна и практическая значимость

В работе с применением методов математического планирования эксперимента получены зависимости, описывающие влияние углерода, кремния и меди на показатели статической и циклической прочности, позволяющие оптимизировать составы графитизированных сталей.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Выводы

Результаты проведенных экспериментов показали, что наиболее благоприятное сочетание свойств: $\sigma_b=1000-1200$ МПа; $\delta=10-14$ %; $\sigma_{-1}=300-400$ МПа имела графитизированная сталь состава: 0,8–1,0 % C; 2,2–2,4 % Si; 3,0–3,2 % Cu; 0,60–0,70 % Mn; 0,15–0,18 % Cr; 0,22–0,25% Al и до 0,02 % S и 0,03 % P. По показателям статической и циклической прочности ГС указанного состава превосходят высокопрочные чугуны марок ВЧ40–ВЧ50 и ряд марок углеродистых сталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.с. 1793001 СССР, МКИ С 22 С 38/34. Графитизированная сталь / И. П. Волчок, О. Б. Колотилкин, С. А. Уваров (СССР). – № 4910094 ; заявл. 11.02.91 ; опубл. 07.02.93, Бюл. № 5. – 2 с.
2. Акімов, І. В. Підвищення високотемпературної витривалості графітізованих сталей / І. В. Акімов, І. П. Волчок // FIDES. : Intern. Forum for the Development of Education and Science Proc. – Norway : Lulu Press Inc., 2010. – Р. 61.
3. Акимов, И. В. Усталостное разрушение графитизированных сталей при высоких частотах нагружения / И. В. Акимов, И. П. Волчок // Стрво, материаловедение, машиностроение : сб. научн. трудов / ПГАСА. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 74. – С. 66–71.
4. Босов, А. А. Математичне моделювання планування експериментів / А. А. Босов, В. В. Артемчук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 25. – С. 118–121.
5. Вакуленко, І. О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2012. – 152 с.
6. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
7. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
8. Жураковский, В. М. Организация трансформируемой структуры и обеспечение заданных свойств графитсодержащей стали : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / Жураковский Василий Максимилианович ; Белорус. политехн. ин-т. – Минск, 1985. – 40 с.
9. Ковшов, В. Н. Методические указания к постановке эксперимента при выполнении курсовых научно-исследовательских работ / В. Н. Ковшов. – Днепропетровск : НМетАУ, 1999. – 50 с.
10. Колмыков, В. И. Особенности формирования графитсодержащих диффузионных слоев при двухступенчатой нитроцементации конструкционных сталей / В. И. Колмыков, И. Н. Росляков, О. В. Летова // Технология металлов. – 2008. – № 11. – С. 22–24.
11. Савченко, В. А. Термостойкость графитизированной стали / В. А. Савченко // Наука та прогр. трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 4 (52). – С. 95–100. doi: 10.15802/stp2014/27333.
12. Сильман, Г. И. Влияние меди на структурообразование в чугуне / Г. И. Сильман, В. В. Камынин, А. А. Тарасов // Металловедение и терм. обработка металлов. – 2003. – № 7. – С. 15–20.
13. Скворцов, А. И. Магнитные и демпфирующие свойства графитизированных сталей после изотермической закалки / А. И. Скворцов, Л. И. Агапова // Металловедение и терм. обработка металлов. – 1993. – № 5. – С. 9–10.
14. Пойда, А. А. Тепловозы. Механическое оборудование. Устройство и ремонт : учебн. для техн. школ / А. А. Пойда, Н. М. Хуторянский, В. Е. Кононов. – Москва : Транспорт, 1988. – 320 с.
15. Akimov, I. Wear resistance of graphitized steels / I. Akimov, S. Byelikov, I. Volchok // Archives of Metallurgy and Materials. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 813–816. doi: 10.2478/amm-2013-0077.
16. Control of Carbides and Graphite in Cast Irons Type Alloy's Microstructures for Hot Strip Mills / S. V. Bravo, K. Yamamoto, H. Miyahara, K. Ogi // J. of Metallurgy. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1–6. doi: 10.1155/2012/438659.
17. Pat. US5830285 Japan, C21D1/26; C21D1/84, C21D8/06, C22C38/12, C22C38/60. Fine Graphite uniform dispersion steel excellent in gold Machinability, Cuttability and Hardenability, and production method for the same / S. Katayama, T. Tarui, M. Toda, K.-I. Naito. – № US19960700355 ; filed 23.08.96, publ. 03.11.98.
18. Pat. 5,139,583 USA, C22C38/00. Graphite Precipitated hot-rolled Steel plate having workability and hardenability and method therefore / Y. Kawabata, M. Morita, F. Togashi. – № US19920822649 ; filed 21.01.92 ; publ. 18.08.92.
19. Rounaghi, S.-A. Microstructure evolution in hypereutectoid graphitic steel / S.-A. Rounaghi, A. Kiani-Rashid // Intern. J. of Materials Research. – 2011. – Vol. 102. – Iss. 10. – P. 1242–1246. doi: 10.3139/146.110586.

І. В. АКИМОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Композиційні матеріали та технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769 85 32, ел. пошта tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0001-6076-0149

ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИТОЇ ГРАФІТИЗОВАНОЇ СТАЛІ

Мета. Завдяки наявності багатьох цінних властивостей (низька собівартість, високі технологічні властивості та демпфуюча здатність, теплопровідність, рідиноплинність та ін.), графітізовані чавуни знаходять широке застосування для деталей, що працюють в умовах статичних і циклічних навантажень, в умовах зношування – при сухому терті та в умовах агресивних середовищ – при підвищених температурах. Проте, з причини значного вмісту графітної фази в структурі, чавуни володіють порівняно низькими механічними властивостями. У зв'язку з цим звертають на себе увагу графітізовані сталі, особливістю яких є наявність графітових включень у структурі, що надає цим матеріалам специфічних властивостей чавунів. Але, на відміну від чавунів, вміст графіту в них у 2–3 рази менше, що позитивно впливає на показники механічних та службових властивостей. Ця робота присвячена оптимізації складу литої графітізованої сталі з високими показниками механічних властивостей. **Методика.** У роботі використовували метод планування експерименту, на підставі якого виплавляли сплави й досліджували їх механічні властивості. Отримані результати піддавали регресійній обробці, після чого отримували залежності впливу компонентів сплаву на його властивості. Використовуючи метод графічної оптимізації, визначали склад сталі з високими показниками механічних властивостей. **Результати.** Встановлено, що найбільш значний вплив на статичну та циклічну міцність графітізованих сталей здійснюють вуглець та кремній. У роботі був запропонований хімічний склад литої графітізованої сталі з високими показниками статичної та циклічної міцності. **Наукова новизна.** Із застосуванням методів математичного планування експерименту отримані залежності, що описують вплив вуглецю, кремнію та міді на показники статичної й циклічної міцності та дозволяють оптимізувати склад графітізованих сталей. **Практична значимість.** Використання графітізованих сталей оптимізованого складу в машинобудуванні дозволить розширити їх область застосування із забезпеченням підвищення надійності та довговічності деталей, котрі працюють як в умовах статичних, так і циклічних навантажень.

Ключові слова: графітізована сталь; структура; механічні властивості; оптимізація хімічного складу

І. V. AKIMOV^{1*}

^{1*}Dep. «Composite Materials and Technologies», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. + 38 (061) 769 85 32, e-mail tmzntu@gmail.com, ORCID 0000-0001-6076-0149

INCREASING OF MECHANICAL PROPERTIES OF CAST GRAPHITIZED STEEL

Purpose. Due to the presence of many essential properties (low prime cost, high manufacturability and damping ability, heat conductivity, fluidity and others), the graphitized cast irons are widely applied for parts operating under the conditions of static and cyclic loads, wear at dry friction and aggressive media at elevated temperatures. At the same time because of significant content of the graphite phase in the structure, the cast irons possess relatively low mechanical properties. Thereby the attention is drawn to graphitized steels, the peculiarity of which consists in the presence of graphite inclusions in the structure, which appoints specific cast iron's properties to these materials. But unlike cast irons, the graphite content in them is in 2...3 times lower and it affects positively on mechanical and service properties indices. This work deals with the optimization of the composition of cast graphitized steel, which has high mechanical properties indices. **Methodology.** The experimental design technique was used in this work. Alloys prototypes were smelted and their mechanical properties were investigated on the basis of these techniques. Findings were exposed to regression processing, and the dependences of the alloys components influence on its properties were obtained. By means of graphical optimization the optimal composition of steel with high mechanical properties indices has been determined. **Findings.** It has been established that carbon and silicon have the most significant influence on the strength and cyclic endurance of graphitized steels. The chemical composition of the cast graphitized steel with high static and cyclic strength indices was suggested in this work. **Originality.** With the use of

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

mathematical experimental design techniques the dependences describing the influence of carbon, silicon and copper on the static and cyclic strength indices were obtained. They allow optimizing compositions of graphitized steels. **Practical value.** Using the graphitized steels with optimized composition in mechanical engineering will allow expanding their application areas along with providing reliability and durability of the parts operating under the conditions of static and cyclic loads.

Keywords: graphitized steel; structure; mechanical properties; optimization of the composition

REFERENCES

1. Volchok I.P., Kolotilkin O.B., Uvarov S.A. *Grafitizirovannaya stal* [Graphitized steel]. Inventor's Certificate USSR, 1993, no. 4910094, 2 p.
2. Akimov I.V., Volchok I.P. *Pidvyshchennia vysokotemperaturnoi vytryvalosti hrafityzovanykh stalei* [Improving the high-temperature resistance of graphitized steels]. FIDES. Intern. Forum for the Development of Education and Science Proc. Norway, Lulu Press Inc. Publ., 2010. P. 61.
3. Akimov I.V., Volchok I.P. Ustalostnoye razrusheniye grafitizirovannykh stalei pri vysokikh chastotakh nagruzheniya [Fatigue failure of graphitized steels at high loading frequencies]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye: sbornik nauchnykh trudov* [Proc. of building, materials science, mechanical engineering]. Dnepropetrovsk, Pridneprovskaya gosudarstvennaya akademiya stroitelstva i arkhitektury Publ., 2014, issue 74, pp. 66-71.
4. Bosov A.A., Artemchuk V.V. Matematychni modeliuvannia planuvannia eksperymentiv [Mathematical modeling of experiments planning]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 25, pp. 118-121.
5. Vakulenko I.O. *Vtoma metalevykh materialiv v konstruktsiakh rukhomoho skladu* [Fatigue of metallic materials in the construction of rolling stock]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2012. 152 p.
6. Vakulenko I.O. *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi* [Structural analysis in materials science]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2010. 124 p.
7. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [The morphology of the structure and strain hardening of steel]. Dnepropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2008. 196 p.
8. Zhurakovskiy V.M. *Organizatsiya transformiruyemoy struktury i obespecheniye zadannykh svoystv grafitisoderzhashchey stali*. Avtoreferat Diss. [Organization of transformed structure and ensuring the desired properties of steel graphite. Author's abstract.]. Minsk, 1985. 40 p.
9. Kovshov V.N. *Metodicheskiye ukazaniya k postanovke eksperimenta pri vypolnenii kursovykh nauchno-issledovatel'skikh rabot* [Methodical instructions for the experiment during the course of research works]. Dnipropetrovsk, Natsionalna metalurhichna akademiia Ukrainy Publ., 1999. 50 p.
10. Kolmykov V.I., Roslyakov I.N., Letova O.V. Osobennosti formirovaniya grafitisoderzhashchikh diffuzionnykh sloev pri dvukhstupenchatoy nitrotsementatsii konstruktsionnykh stalei [Features of formation of graphite-bearing diffusion layers in two-stage carbonitriding structural steels]. *Tekhnologiya metallov – Metal Technology*, 2008, no. 11, pp. 22-24.
11. Savchenko V.A. Termostoykost grafitizirovannoy stali [Heat resistance of graphitized steel]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 52, pp. 95-100. doi: 10.15802/stp2014/27333.
12. Silman G.I., Kamynin V.V., Tarasov A.A. Vliyanie medi na strukturoobrazovaniye v chugune [The effect of copper on the structure formation in cast iron]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metallography and Heat Treatment of Metals*, 2003, no. 7, pp. 15-20.
13. Skvortsov A.I., Agapova L.I. Magnitnyye i dempfiruyushchiye svoystva grafitizirovannykh stalei posle izotermicheskoy zakalki [Magnetic and damping properties of graphitized steels after isothermal hardening]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metallography and Heat Treatment of Metals*, 1993, no. 5, pp. 9-10.
14. Poyda A.A., Khutoryanskiy N.M., Kononov V.Ye. *Teplovozy. Mekhanicheskoye oborudovaniye. Ustroystvo i remont* [The locomotives. The mechanical equipment. The device and repair]. Moscow, Transport Publ., 1988. 320 p.
15. Akimov I., Byelikov S., Volchok I. Wear resistance of graphitized steels. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 58, issue 3, pp. 813-816. doi: 10.2478/amm-2013-0077.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

16. Bravo S.V., Yamamoto K., Miyahara H., Ogi K. Control of Carbides and Graphite in Cast Irons Type Alloy's Microstructures for Hot Strip Mills. *Journal of Metallurgy*, 2012, vol. 2012, pp. 1-6. doi: 10.1155/2012/438659.
17. Katayama S., Tarui T., Toda M., Naito K.-I. Fine Graphite uniform dispersion steel excellent in gold Machinability, Cuttability and Hardenability, and production method for the same. 1998. No. US19960700355.
18. Kawabata Y., Morita M., Togashi F. Graphite Precipitated hot-rolled Steel plate having workability and hardenability and method therefore. 1992. No. US19920822649.
19. Rounaghi S.A, Kiani-Rashid A. Microstructure evolution in hypereutectoid graphitic steel. *Intern. Journal of Materials Research*, 2011, vol. 102, issue 10, pp. 1242-1246. doi: 10.3139/146.110586.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. И. А. Вакуленко (Украина);
д.т.н., проф. А. В. Овчинниковым (Украина)

Поступила в редколлегию 30.03.2015

Принята к печати 05.06.2015

UDK 669.15-194.57:620.179.16:539.43

I. A. VAKULENKO^{1*}, YU. L. NADEZH DIN², V. A. SOKYRKO³, SIU SIA KHA I⁴^{1*}Dep. «Technology of Materials», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916²Dep. «Technology of Materials», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail 7435892@gmail.com, ORCID 0000-0003-1805-4616³DS Ltd, Scientific-industrial company, B. Morskay St., 63, Mykolaiv, Ukraine, 54001, tel. +38 (0512) 35 44 83, e-mail ds@mksat.net, ORCID 0000-0002-0338-5976⁴China machinery investment group Ltd, Anli Road, 60, Chaoyang District, Beijing, China, 100101, tel. 86 106 482 7530, e-mail xxhai2004@163.com, ORCID 0000-0001-7051-6254SPEED DEPENDENCE OF ACOUSTIC VIBRATION PROPAGATION
FROM THE FERRITIC GRAIN SIZE IN LOW-CARBON STEEL

Purpose. It is determining the nature of the ferrite grain size influence of low-carbon alloy steel on the speed propagation of acoustic vibrations. **Methodology.** The material for the research served a steel sheet of thickness 1.4 mm. Steel type H18T1 had a content of chemical elements within grade composition: 0, 12 % C, 17, 5 % Cr, 1 % Mn, 1, 1 % Ni, 0, 85 % Si, 0, 9 % Ti. The specified steel belongs to the semiferitic class of the accepted classification. The structural state of the metal for the study was obtained by cold plastic deformation by rolling at a reduction in the size range of 20-30 % and subsequent recrystallization annealing at 740 – 750 ° C. Different degrees of cold plastic deformation was obtained by pre-selection of the initial strip thickness so that after a desired amount of rolling reduction receives the same final thickness. The microstructure was observed under a light microscope, the ferrite grain size was determined using a quantitative metallographic technique. The using of X-ray structural analysis techniques allowed determining the level of second-order distortion of the crystal latitude of the ferrite. The speed propagation of acoustic vibrations was measured using a special device such as an ISP-12 with a working frequency of pulses 1.024 kHz. As the characteristic of strength used the hardness was evaluated by the Brinell's method. **Findings.** With increasing of ferrite grain size the hardness of the steel is reduced. In the case of constant structural state of metal, reducing the size of the ferrite grains is accompanied by a natural increasing of the phase distortion. The dependence of the speed propagation of acoustic vibrations up and down the rolling direction of the ferrite grain size remained unchanged and reports directly proportional correlation. **Originality.** On the basis of studies to determine the direct impact of the proportional nature of the ferrite grain size on the rate of propagation of sound vibrations in the low-carbon alloy steel. The directly proportional nature of influence of ferrite grain size on the speed propagation of acoustic vibrations in low-carbon alloy steel on the basis of the conducted researches is defined. The paper is shown that at increasing in the size of the recrystallized ferrite grain the degree of influence the texture from the previous cold plastic deformation by rolling increases. **Practical value.** The received results on nature determination of influence of ferrite grain size on the speed propagation of acoustic vibrations can be the useful by development of techniques of non-destructive testing of metal materials quality. The special value the specified technique of measurement acquires in the conditions of line production of metal constructions.

Key words: hardness index; grain size; ferrite; phase distortion; speed propagation of acoustic vibration

Introduction

In modern conditions of the industry development, the intensification of production is impossible without the development of automated control systems of technological processes [1, 10].

Based on this, the requirements are quite reasonably increasing on the accuracy and speed evaluation of the metallic material properties [2], or the degree defectiveness during the using of the product [9], in

which is necessary for the timely adjustment of parameters of technological processes. These automated systems in most cases based on the use of non-destructive methods for determining the properties of metals and alloys [6]. The numerical technique for modeling the propagation of elastic waves in materials received the application [12], methods for measuring physical properties of metallic materials, which include methods of acoustic measurement [13, 14], acoustic emission, magnetic [11], and other properties.

The state of the question

To some of the known acoustic methods for assessing the properties of metals and alloys include the method of measuring the speed propagation of acoustic vibration (V) [8]. These specifications are structure-sensitive value to the internal structure of the metallic material. By the results of research show the sensitivity of the speed propagation of acoustic vibration to changes in the strength characteristics [13], the structural state of metal [14]. On the other hand, for example, carbon steel the same level of strength can be achieved by varying the ratio of morphology and dispersion of particles of the minor phase, the grain size of the metal matrix, the presence of substructure [4] and others. Based on this, rather complex overall impact of structural components in multiphase alloys magnitude to speed propagation of acoustic vibration [8] indicates the necessity for continued research. Making a detailed analysis of the nature of the expected dependency rate speed propagation of acoustic vibration from the characteristics of the internal structure of the metal may be useful for the development of non-destructive testing methods, particularly in the difficult conditions of loading system "wheel – rail" of railway transport [7].

Purpose

It is determining the nature of the ferrite grain size influence of low-carbon alloy steel on the speed propagation of acoustic vibrations.

Methodology

The material for the research served a steel sheet of thickness 1.4 mm. Steel type H18T1 had a content of chemical elements within grade composition: 0, 12 % C, 17, 5 % Cr, 1 % Mn, 1, 1 % Ni, 0, 85 % Si, 0, 9 % Ti. The specified steel belongs to the semiferritic class on the accepted classification.

The specified steel belongs to the semiferritic class on the accepted classification. The structural state of the metal for the study was obtained by cold plastic deformation by rolling at a reduction in the size range of 20-30 % and subsequent recrystallization annealing at 740 – 750 ° C. Different degrees of cold plastic deformation was obtained by pre-selection of the initial strip thickness so that after a desired amount of rolling reduction receives

the same final thickness.

The microstructure was observed under a light microscope, the ferrite grain size was determined using a quantitative metallographic technique. [3]. In order to understand the mechanism of ferrite grain size influence propagation of acoustic vibration in the metal determined the parameters of its fine crystal structure. The using of X-ray structural analysis techniques [5] allowed determining the level of second-order distortion of the crystal latitude of the ferrite.

The speed propagation of acoustic vibrations was measured using a special device such as an ISP-12 with a working frequency of pulses 1.024 kHz [8]. As the characteristic of strength used the hardness was evaluated by the Brinell's method. [3].

Findings and discussion

During the cold plastic rolling deformation draft the increasing of shrinkage accompanied by a steady rising in the number of accumulated defects in the crystal structure. With further annealing at the expense of recrystallization processes is the formation of homogeneous microstructure of ferrite grain size structure (d), which are inversely proportional to the degree of plastic deformation [4].

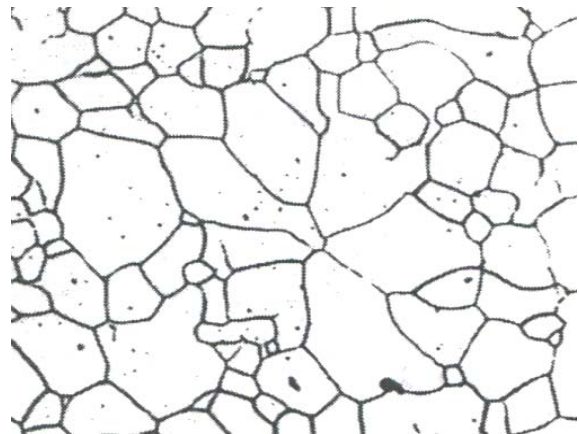


Fig.1. The microstructure of steel H18T1 after cold plastic flow by the rolling and annealing at a temperature of 750 °C. Magnification is 100.

The magnitude of the grain size varied in the range 43-65 μm . The typical microstructure of investigated steel is shown on Figure 1. Normal distribution of grains in size is a confirmation of the completion process of building recrystallization.

With increasing ferrite grain size the steel hard-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ness, like most of the strength characteristics [4,15], decreases (Fig.2). The shown dependence is well obeys the equation of Hall-Petch type relation

$$HB = HB_0 + kd^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

where HB_0 – the steel hardness at the infinitely large ferrite grain size, k – the angular dependency ratio. From the analysis of the ratio (Fig.2) were determined constant of equation (1), which amounted to the value $HB_0 = 8 \frac{kg}{mm^2}$, and

$k \approx 45 \frac{kg}{mm^{1,5}}$. Comparative analysis of the obtained characteristics with known parameters for most steels shows that HB_0 in absolute values approaching the shear stress of the ferrite crystal lattice, whereas similar magnitude exceeds by more than an order of magnitude [4]. Elevated values k are likely due to different stress state of the metal. Thus, measuring the hardness under the indenter is formed volumetric stress state, whereas in most studies devoted to the analysis of diagrams of the Hall-Petch relation, the tests were carried out in the uniaxial stress state at tensile.

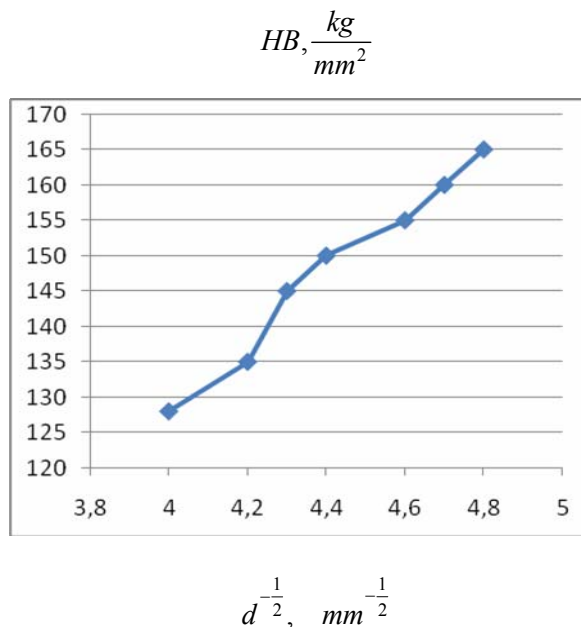


Fig.2. The dependence of the steel hardness from the ferrite grain size

Experimental studies determined that under certain conditions during heat treatment in the steel structure of the specified can remain the volume

fraction of residual austenite. To assess the possible influence of austenite on the steel hardness, determined the size of the lattice phase distortions for ferrite (μ). The comparative analysis of the magnitude μ of the steel hardness showed the existence of the directly-proportional ratio between them (Fig.3).

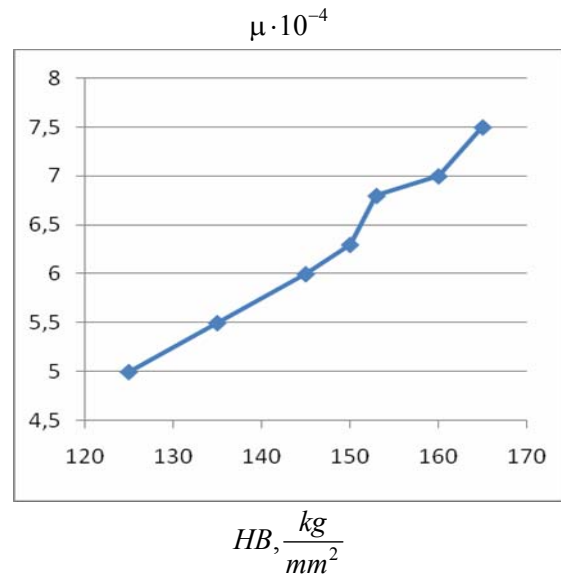


Fig.3. Mutual change of size μ and hardness.

Given the persistent structural state of metal ferrite grain size reduction is accompanied by quite natural growth of phase distortions. On this basis, it can be assume that for investigated the structural state of metal structure in the presence of austenitic phase does not lead to violations of the nature of ferrite grain size influence to the hardness and phase distortions.

The measurement of the velocity of propagation of sound vibrations in the metal from the grain size (Fig.4) showed the existence of influence the texture of cold plastic deformation by rolling. From the comparative analysis of the given correlations can determine that the dependence of the velocity of sound waves along (V_{vp}) and across (V_{pp}) in the direction from d remained unchanged and is accountable directly proportional to the ratio:

$$V = V_0 + \alpha d \quad (2)$$

where V_0 – the constant value and α – angular dependency ratio.

The influence of texture is reflected not only on the absolute values of the speed propagation of acous-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

tic vibrations, but also on the angular change of the dependency ratio.

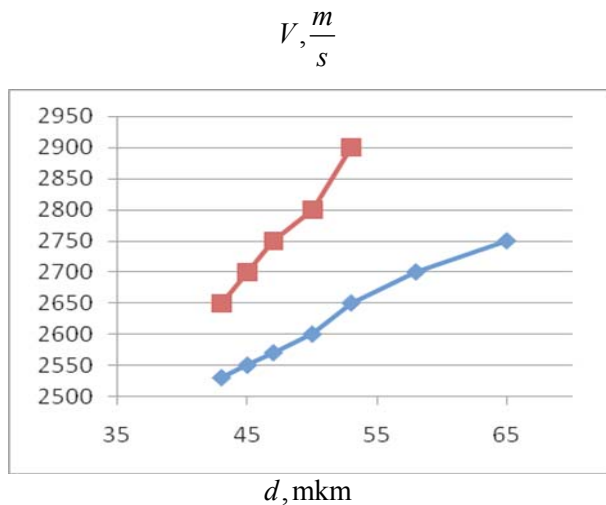


Fig.4. The dependence of the speed propagation acoustic vibrations from the grain size and the rolling direction: ■ - V_{vp} ♦ and ♦ - V_{pp}

Indeed, assessing the sensitivity of the speed propagation of acoustic vibrations in the steel prior to the change of grain size of ferrite in angular ratio $V = f(d)$ (fig. 4), it can be determine that the propagation of acoustic vibrations in the direction of rolling the magnitude of the sensitivity to changes d ($\alpha_1 = \frac{\Delta V_{vp}}{\Delta d}$) about in 2.5 times exceeds the similar characteristic to the rolling direction transversely ($\alpha_2 = \frac{\Delta V_{pp}}{\Delta d}$). The result is additional evidence of the impact of rolling texture on the value V of the tested metal. Although based on microstructural studies the influence after rolling recrystallization texture is difficult to define (fig.1). This is due by formed almost homogeneous microstructure of grain structure with no signs of forced orientation of the grains.

Thus, only a negligible impact from parts of the texture that is left after recrystallization, can be determined by measuring the speed propagation of acoustic vibrations. The analysis of experimental results confirmed the given situation that the influence of the remnants of the texture of cold rolling and subsequent annealing of increasing ferrite grain size is reflected in the change V to a greater extent.

On the basis of numerous experimental data it

is known that with increasing degree of cold plastic deformation occurs progressive increase in the number of centers of nucleation recrystallising grains. On this basis, it is quite clear that expectation of grain refinement of ferrite during annealing. On the other hand, by reducing the degree of cold plastic deformation significantly increases the likelihood of development of processes of polygonization subsequent heating [4]. For this reason, after an inadequate level of plastic deformation may develop processes of polygonization could greatly complicate the formation of germ recrystallising grains.

Thus, for the investigated steel the influence of texture from preliminary cold plastic deformation by rolling with the growth of the grain size must be manifested to a greater degree. As shown in the diagram it should be considered that the smaller degree of plastic deformation is subjected to the metal, the larger the grain size will be obtained after recrystallization annealing and will be more retained by the influence of cold rolling texture. For the purpose of determining the absence of the influence of the rolling texture you need to use the dependencies V_{vp} and V_{pp} from the ferrite grain size (fig.4). Extrapolation of these dependencies in the area of small grain size to the point of intersection (when $V_{vp} \approx V_{pp}$) allows you to define the grain size, below which it should expect from the lack of influence of the rolling texture. The ferrite grain size has roughly equal 30-33mkm. Thus, to achieve almost complete absence of anisotropy properties after recrystallization annealing before cold-rolled is necessary to increase the degree of cogging. In this case, the processes of recrystallization will occur more fully and, as a consequence, there will be a more short-grain structure. To justify the submitted proposals were used constructed value correlation V_{vp} and V_{pp} from the steel hardness (fig.5). Implementation of extrapolation in areas of high hardness values just as it was done for according to the ferrite grain size (Fig.4), the moment when $V_{vp} \approx V_{pp}$ metal hardness value

should be at level $190-195 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$. If apply specified hardness value deducted for experimental dependence HB from grain size (fig.2),

$$HB, \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$$

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

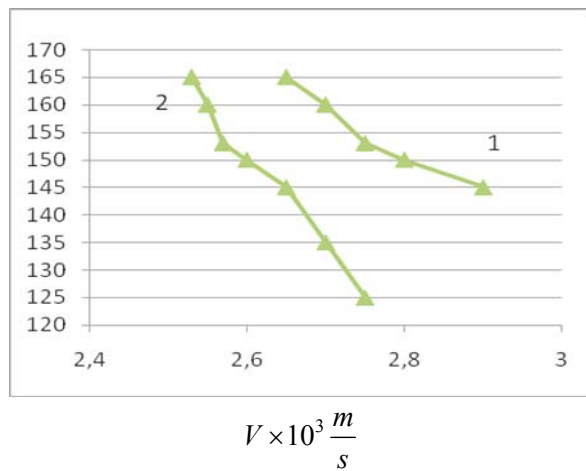


Fig.5. The correlation of the steel hardness and the propagation velocity of sound vibrations

(V_{vp-1} , V_{pp-2}).

get $d^{-\frac{1}{2}} \approx 5,8 \text{ mm}^{-\frac{1}{2}}$, that actually corresponds 30–33mkm. A similar grain size values obtained from the analysis of dependencies which are shown on figure 4.

Thus, in terms of the engineering industry applications of the measuring method of speed propagation of acoustic vibrations will allow to evaluate the degree of anisotropy of the properties of metallic materials, without costly testing the mechanical properties.

Originality and practical value

1. On the basis of research defined directly proportional to the impact of ferrite grain size on the propagation of acoustic vibrations in the low-carbon alloy steel.

2. It is shown that at increasing in size of recrystallising ferrite grain, the degree of texture influence from preliminary cold plastic deformation by rolling is grown up.

The results obtained by the determination of the ferrite grain size influence on the speed propagation of acoustic vibrations may be useful in the development of methods of nondestructive testing of metallic materials. The particular value is the specified method of measurement of gains in the ongoing manufacture of metal structures.

Conclusions

1. Analysis of the hardness dependence of steel from the ferrite grain size showed that the hardness

component, which determines the state of a solid solution substantially equal to the shear stress of the crystal lattice of the ferrite.

2. The angular dependency ratio of steel hardness from the ferrite grain size is determined by the influence of the remnants of the rolling texture after annealing recrystallization.

3. Shredding ferrite grain lowers the effect textures of rolling low carbon alloy steel after recrystallization annealing.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Акустический аспект шероховатости рельсов и колес // Ж.-д. дороги мира. – 2010. – № 12. – С. 71–74.
2. Басов, Г. Г. Анализ систем неразрушающего контроля при изготовлении подвижного состава железных дорог / Г. Г. Басов, А. Н. Киреев // Локомотив – Информ. – 2010. – № 11. – С. 30–42.
3. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
4. Вакуленко, І. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / І. А. Вакуленко, В. І. Большаков. – Днепропетровск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
5. Гинье, А. Рентгенография кристаллов. Теория и практика / А. Гинье. – Москва : Физматгиз, 1961. – 604 с.
6. Контроль осей колесных пар по методу компании ННА // Ж.-д. дороги мира. – 2010. – № 12. – С. 53–58.
7. Куліченко, А. Я. Оцінка якісних показників контактування поверхневих шарів трибологічної системи «колесо–рейка» / А. Я. Куліченко, М. О. Кузін, І. О. Вакуленко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 3 (45). – С. 44–52. doi: 10.15802/stp2013/14529.
8. Муравьев, В. В. Исследование процесса распада пересыщенного твердого раствора в алюминиевом сплаве Д16 / В. В. Муравьев, М. Р. Ноева, А. В. Шарко // Физика металлов и металловедение. – 1978. – Т. 46, Вып. 4. – С. 746–749.
9. A damage parameter for HCF and VHCF based on hysteretic damping / Y. Lage, H. Cachão, L. Reis [et al.] // Intern. J. of Fatigue. – 2014. – Vol. 62. – P. 2–9. doi: 10.1016/j.jfatigue.2013.10.010.
10. Comprehensive Study of Thermal Transport and Coherent Acoustic-Phonon Wave Propagation in Thin Metal Film–Substrate by Applying Picosecond Laser Pump–Probe Method / M. Weigang, M.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Tingting, X. Zhang [et al.] // J. Phys. Chem. C. – 2015. – 119 (9). – P. 5152–5159. doi: 10.1021/jp512735k.
11. Langman, R. A. Estimation of Residual Stresses in Railway Wheels by Means of Stress Induced Magnetic Anisotropy / R. A. Langman, P. J. Mutton // NDT&E Intern. – 1993. – Vol. 26. – № 4. – P. 195–205. doi: 10.1016/0963-8695(93)90474-9.
 12. Numerical simulations of elastic wave propagation using graphical processing units – Comparative study of high-performance computing capabilities / P. Packo, T. Bielak, A. B. Spencer [et al.] // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2015. – Vol. 290. – P. 98–126. doi:10.1016/j.cma.2015.03.002.
 13. Ultra-sonic Resonance Method with EMAT for Stress Measurement in Thin Plates / H. Fukuoka, M. Higaro, T. Yamasaki [et al.] // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 1993. – № 12. – P. 2129–2136. doi:10.1007/978-1-4615-2848-7_273.
 14. Ultra-sonic Set-Up to Characterize Stress States in Rims of Railroad Wheels. / R. Herzer, H. Frotscher, K. Schillo [et al.] // Nondestructive Characterization of Materials VI. – 1994. – P. 699–706. doi: 10.1007/978-1-4615-2574-5_89.
 15. Vakulenko, I. A. The Influence Mechanism of Ferrite Grain Size on Strength Stress at the Fatigue of Low-carbon Steel / I. A. Vakulenko, S. V. Proydak // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 1 (49). – С. 97–104. doi: 10.15802/stp-2014/22668.

І. О. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. НАДЕЖДИН², В. А. СОКІРКО³, СЮ СЯ ХАЙ⁴

^{1*}Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта 7435892@gmail.com, ORCID 0000-0003-1805-4616

³ДС ЛТД, Науково-виробнича компанія, вул. Велика Морська, 63, Миколаїв, Україна, 54001, тел. +38 (0512) 35 44 83, ел. пошта ds@mksat.net, ORCID 0000-0001-7051-6254

⁴Китайська машинобудівна інвестиційна група ЛТД, вул. Анли, 60, Пекін, Китайська народна республіка, 100101, тел. 86 10 64827530, ел. пошта xxhai2004@163.com, ORCID 0000-0002-0338-5976

ЗАЛЕЖНІСТЬ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ВІД РОЗМІРУ ЗЕРНА ФЕРИТУ В НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ

Мета. Робота спрямована на визначення характеру впливу розміру зерна фериту низьковуглецевої легированої сталі на швидкість розповсюдження звукових коливань. **Методика.** Матеріалом для досліджень була обрана листовая сталь товщиною 1,4 мм. Сталь типу X18T1 мала вміст хімічних елементів у межах марочного складу: 0,12 % С, 17,5 % Cr, 1 % Mn, 1,1 % Ni, 0,85 % Si, 0,9 % Ti. За прийнятою класифікацією вказана сталь відноситься до напівферитного класу. Структурний стан металу для дослідження отримували в результаті холодної пластичної деформації прокату на величину обтискування в інтервалі 20–30 % і подальшого рекристалізаційного відпалу при температурах 740–750 °С. Різний ступінь холодної пластичної деформації отримували (завдяки попередньому підбору похідної товщини прокату) таким чином, щоб після прокатки на потрібну величину обтискування отримати однакову кінцеву товщину. Мікроструктуру досліджували під світловим мікроскопом, розмір зерна фериту визначали, використовуючи методики кількісної металографії. Застосування методик рентгенівського структурного аналізу дозволило визначити рівень викривлень кристалічної решітки другого роду фериту. Швидкість розповсюдження звукових коливань вимірювали спеціальним приладом типу ІСП-12 із робочою частотою проходження імпульсів 1,024 кГц. В якості характеристики міцності використовували твердість, яку оцінювали за методом Брінеля. **Результати.** При збільшенні розміру зерна фериту твердість сталі знижується. Приведена залежність підпорядковується рівнянню типу Хола-Петча. За умов незмінного структурного стану металу зменшення розміру зерна фериту супроводжується закономірним зростанням викривлень другого роду. Характер залежності швидкості розповсюдження звукових коливань уздовж й уперек напрямку прокатки від розміру зерна фериту залишається незмінним та підпорядковується прямо пропорційному співвідношенню. **Наукова новизна.** На основі проведених досліджень визначений прямо пропорційний характер впливу роз-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

міру зерна фериту на швидкість розповсюдження звукових коливань у низькоуглецевій легованій сталі. В роботі показано, що при зростанні розміру рекристалізованого зерна фериту ступінь впливу текстури від попередньої холодної пластичної деформації прокаткою збільшується. **Практична значимість.** Отримані результати з визначення характеру впливу розміру зерна фериту на швидкість розповсюдження звукових коливань можуть бути корисними при розробці методик неруйнівного контролю якості металевих матеріалів. Особливого значення вказана методика вимірювання набуває в умовах поточного виготовлення металевих конструкцій.

Ключові слова: твердість; розмір зерна; ферит; викривлення другого роду; швидкість розповсюдження звукових коливань

И. А. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. НАДЕЖДИН², В. А. СОКИРКО³, СЮ СЯ ХАЙ⁴

^{1*}Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt_texmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта 7435892@gmail.com, ORCID 0000-0003-1805-4616

³ДС Лтд, Научно-производственная компания, ул. Большая Морская, 63, Николаев, Украина, 54001, тел. +38 (0512) 35 44 83, эл. почта ds@mksat.net, ORCID 0000-0001-7051-6254

⁴Китайская машиностроительная инвестиционная группа Лтд, ул. Анли, 60, Пекин, Китайская народная республика, 100101, тел. 86 10 64827530, эл. почта xxhai2004@163.com, ORCID 0000-0002-0338-5976

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТ РАЗМЕРА ЗЕРНА ФЕРРИТА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель. Работа направлена на определение характера влияния размера зерна феррита низкоуглеродистой легированной стали на скорость распространения звуковых колебаний. **Методика.** Материалом для исследований служила листовая сталь толщиной 1,4 мм. Сталь типа X18T1 имела содержание химических элементов в пределах марочного состава: 0,12 % C, 17,5 % Cr, 1 % Mn, 1,1 % Ni, 0,85 % Si, 0,9% Ti. Указанная сталь относится к полуферритному классу по принятой классификации. Структурное состояние металла для исследования получали в результате холодной пластической деформации прокаткой на величину обжатия в интервале 20—30 % и последующего рекристаллизационного отжига при температурах 740–750 °С. Различную степень холодной пластической деформации получали (благодаря предварительному подбору исходной толщины проката) таким образом, чтобы после прокатки на требуемую величину обжатия получалась одинаковая конечная толщина. Микроструктуру исследовали под световым микроскопом, размер зерна феррита определяли, используя методики количественной металлографии. Применение методик рентгеновского структурного анализа позволило определить уровень искажений второго рода кристаллической решетки феррита. Скорость распространения звуковых колебаний измеряли специальным прибором типа ИСП-12 с рабочей частотой прохождения импульсов 1,024 кГц. В качестве характеристики прочности использовали твердость, которую оценивали по методу Бринелля. **Результаты.** При увеличении размера зерна феррита твердость стали снижается. Приведенная зависимость подчиняется уравнению типа Холла-Петча. В случае неизменного структурного состояния металла уменьшение размера зерна феррита сопровождается закономерным ростом искажений второго рода. Характер зависимости скорости распространения звуковых колебаний вдоль и поперек направления прокатки от размера зерна феррита остается неизменным и подчиняется прямопропорциональному соотношению. **Научная новизна.** На основе проведенных исследований определен прямопропорциональный характер влияния размера зерна феррита на скорость распространения звуковых колебаний в низкоуглеродистой легированной стали. В работе показано, что при увеличении размера рекристаллизованного зерна феррита степень влияния текстуры от предыдущей холодной пластической деформации прокаткой возрастает. **Практическая значимость.** Полученные результаты по определению характера влияния размера зерна феррита на скорость распространения звуковых колебаний могут быть полезными при разработке методик неразрушающего контроля качества металлических материалов. Особенное значение указанная методика измерения приобретает в условиях поточного производства металлических конструкций.

Ключевые слова: твердость; размер зерна; феррит; искажение второго рода; скорость распространения звуковых колебаний

REFERENCES

1. Akusticheskiy aspekt sherokhovatosti relsov i koles [Acoustic aspect of rails and wheels roughness]. *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the World*, 2010, no. 12, pp. 71-74.
2. Basov G.G., Kireyev A.N. Analiz sistem nerazrushayushchego kontrolya pri izgotovlenii podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [Systems analysis of non-destructive control in the manufacture of railway rolling stock]. *Lokomotiv-Inform – Lokomotiv-Inform*, 2010, no. 11, pp. 30-42.
3. Vakulenko I.O. *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi* [Structural analysis in materials science]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2010. 124 p.
4. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [The morphology of the structure and strain hardening of steel]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
5. Gine A. *Rentgenografiya kristallov. Teoriya i praktika* [X-ray analysis of crystals. Theory and practice]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1961. 604 p.
6. Kontrol osey kolesnykh par po metodu kompanii NNA [The control axes of the wheel pairs by method of the company NNA]. *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the World*, 2010, no. 12, pp. 53-58.
7. Kulichenko A.Ya., Kuzin M.O., Vakulenko I.O. Otsinka yakisnykh pokaznykiv kontaktuvannia poverkhnivnykh shariv trybolohichnoi systemy «koleso – reika» [Evaluation of quality indicators contacting the surface of the tribological system «wheel – rail»]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 3 (45), pp. 44-52. doi: org/10.15802/stp2013/14529.
8. Muravyev V.V., Noyeva M.R., Sharko A.V. Issledovaniye protsessa raspada peresyschennogo tverdogo rastvora v aluminiiyevom splave D16 [Study of the process of decomposition of the supersaturated solid solution in the aluminum alloy D16]. *Fizika metallov i metallovedeniye – Physics of Metals and Metallography*, 1978, vol. 46, no. 4, pp. 746-749.
9. Lage Y., Cachão H., Reis L. A damage parameter for HCF and VHCF based on hysteretic damping. *Intern. Journal of Fatigue*, 2014, vol. 62, pp. 2-9. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.010.
10. Weigang M., Tingting M., Zhang X. Comprehensive Study of Thermal Transport and Coherent Acoustic-Phonon Wave Propagation in Thin Metal Film–Substrate by Applying Picosecond Laser Pump–Probe Method. *Journal of Physical Chemistry*, 2015, no. 119 (9), pp. 5152-5159. doi: 10.1021/jp512735k.
11. Langman R.A., Mutton P.J. Estimation of Residual Stresses in Railway Wheels by Means of Stress Induced Magnetic Anisotropy. *NDT&E Intern*, 1993, vol. 26, no. 4, pp. 195-205. doi: 10.1016/0963-8695(93)90474-9.
12. Packo P., Bielak T., Spencer A.B. Numerical simulations of elastic wave propagation using graphical processing units–Comparative study of high-performance computing capabilities. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2015, vol. 290, pp. 98-126. doi:10.1016/j.cma.2015.03.002.
13. Fukuoka H., Higaro M., Yamasaki T. Ultra-sonic Resonance Method with EMAT for Stress Measurement in Thin Plates. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1993, no. 12, pp. 2129-2136. doi: 10.1007/978-1-4615-2848-7_273.
14. Herzer R., Frotscher H., Schillo K. Ultra-sonic Set-Up to Characterize Stress States in Rims of Railroad Wheels. *Nondestructive Characterization of Materials VI*, 1994, pp. 699-706. doi: 10.1007/978-1-4615-2574-5_89.
15. Vakulenko I.A., Proydak S.V. The Influence Mechanism of Ferrite Grain Size on Strength Stress at the Fatigue of Low-carbon Steel. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 1 (49), pp. 97-104. doi: 10.15802/stp2014/22668.

PhD, Acc. Prof. S. V. Proydak (Ukraine); PhD, Acc. Prof. O. O. Chaikovskiy (Ukraine) recommended this article to be published

Accessed: Feb. 20, 2015

Received: May 08, 2015

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

УДК [517.5:519.8:004.9]-047.58

А. А. БОСОВ¹, В. М. ИЛЬМАН², Н. В. ХАЛИПОВА^{3*}

¹Каф. «Прикладная математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 36, эл. почта AABosov@i.ua, ORCID 0000-0002-5348-2205

²Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 35, эл. почта valeriy.ilman@ukr.net, ORCID 0000-0003-0983-8611

^{3*}Каф. «Транспортные системы и технологии», Университет таможенного дела и финансов, ул. Дзержинского, 2/4, Днепропетровск, Украина, 49000, тел. +38 (056) 46 95 98, эл. почта khalipov@rambler.ru, ORCID 0000-0001-5605-6781

МНОЖЕСТВЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ

Цель. Развитие сложных технологий производственных и управленческих процессов, систем информатики, прикладных объектов теории систем и др. требует усовершенствования математических методов, новых подходов для исследований прикладных систем. А многообразие и разнородность предметных систем делают необходимым разработку модели, обобщающей классические множества и их развитие – множества множеств. Множественные объекты, в отличие от множеств, конструируются множественной структурой и сами представляются структурой и содержанием. Целью работы является анализ множественной структуры, порождающей множественные объекты, дальнейшее развитие операций над такими объектами в прикладных системах. **Методика.** Для достижения целей исследования множественная структура объектов представляется конструктивной тройкой, состоящей из носителя, сигнатуры и аксиоматики. Множественный объект определяется структурой и содержанием, а также представляется гибридной суперпозицией, составленной из множеств, мультимножеств, упорядоченных множеств (списков) и неоднородных множеств (последовательностей, кортежей). **Результаты.** В работе рассмотрены свойства и характеристики компонентов гибридных множественных объектов сложных систем, предложены оценки их сложности, приведены правила выполнения внутренних и внешних операций на объектах. Введены отношения произвольного порядка над множественными объектами, определено понятие функции и отображения на объектах множественной структуры. **Научная новизна.** В настоящей работе рассмотрены вопросы развития множественной структуры, порождающей множественные объекты. **Практическая значимость.** Переход от абстрактной множественной структуры к предметной структуре требует трансформации системы и множественных объектов. Трансформация предполагает три последовательных этапа: спецификацию (привязку к предметной области), интерпретацию (множественных объектов) и конкретизацию (цели). Предложенный подход описания систем на основе гибридных множеств может быть использован во многих прикладных системах для структурного и содержательного анализа. Приведен пример применения гибридных множеств для моделирования логистических систем.

Ключевые слова: конструктивная множественная структура; гибридные множественные объекты; моделирование; сложные системы; множества; списки; мультимножества; кортежи; логистическая система

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Введение

Развитие сложных технологий производственных и управленческих процессов, систем информатики, прикладных объектов теории систем и др. требует усовершенствования математических методов, новых подходов для исследований прикладных систем [7].

Примером сложной системы является железная дорога, включающая совокупности: станций, вагонных и локомотивных депо, вокзалов, подвижного состава и пр. Для моделирования сложных систем обычно используют структурный подход, задавая их элементы связанными множествами [9, 10]. Анализ работы железной дороги на основе структурного моделирования приведен в монографии [1].

Возможности и особенности применения методологии системного анализа при решении проблем транспортных узлов рассмотрены в монографии [12].

Описание систем с помощью конечных множеств и отношений выполнено в работе [21] и структур в статье [2]. Такие сложные объекты, как станции, депо следует представлять упорядоченными по определенному критерию (подчинения, места положения и др.) элементами списков, поезда представлять как мультимножества вагонов и т.д. Таким образом, в моделях реальных систем возникают разнообразные гибридные конструкции множественных объектов, аппарат которых требует развития. Кроме того, развитие аппарата множественных объектов приведет к совершенствованию задач исследования операций, представления абстрактных структур данных информатики и др. [23].

В работе [3] предложен математический подход исследований на основе множественной структуры (множество множеств, множество списков, функций множеств) и дано его применение к прикладным задачам инженерии.

Цель

В работе рассмотрены вопросы дальнейшего развития множественной структуры, порождающей множественные объекты. Множественная структура объектов задается конструктивной тройкой, состоящей из носителя, сигнатуры и аксиоматики. Сам же множественный объект определяется двумя компонентами –

структурой и содержанием. Множественный объект представляется гибридной суперпозицией, составленной из множеств, мультимножеств, упорядоченных множеств (списков) и неоднородных множеств (последовательностей, кортежей). Рассмотрены свойства и характеристики компонент множественных объектов, предложены оценки их сложности, приведены правила выполнения внутренних и внешних операций на объектах. Введены отношения произвольного порядка над множественными объектами, определено понятие функции и отображения на объектах множественной структуры.

Методика

Представление и задание множественных объектов. Как правило, объекты как классической, так и конструктивной математики создаются на ее базисных элементах, таких как множество, мультимножество, упорядоченное множество (список), неоднородное множество (кортеж), отношение, операция и другое. Основой определения части этих элементов является множество, которое в математике определяется аксиоматически, а в прикладной математике – понятийно [18].

Конструктивно под множеством понимается свободный набор различных однотипных элементов. Элементы в наборе свободны в том смысле, что во множество они входят в произвольном порядке. Изменяя свойства набора и элементов множественной структуры, получим другие объекты. Если во множестве снять ограничение по различным элементам, то получим мультимножество. Не свободный однотипный набор различных элементов по некоторому отношению образует упорядоченное множество (списочное множество), в случае повторяемости элементов в наборе имеем мультисписок. Если набор разнотипный, то соответственно он образует неоднородную упорядоченную или неупорядоченную последовательности или кортежи, мультикортеж упорядоченный или неупорядоченный. Таким образом, рассмотренные объекты задаются на единой множественной структуре M с помощью отношений: тождества, порядка, неоднородности и пр. Формально эта структура может быть представлена как специализация обобщенной порождающей структуры [5, 19]:

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$$M = (N, \Sigma, \Lambda), \quad (1)$$

где $N = G \cup F$ – носитель структуры, на компоненте G которого строятся множественные объекты и $F = (\{, \}, [,], \rangle, (,), \cdot, \langle, \mathbb{I}, \mathbb{I}\rangle)$ – алфавит специальных символов; Σ – сигнатура отношений $\phi_i, i = \overline{1, 4}$ и операции суперпозиции ψ ; Λ – конструктивная аксиоматика, задающая определения, свойства, правила конструирования объектов и пр.

Интерпретация структуры (1) может быть выполнена для определенной задачи предметной области, например, при проектировании логистических цепей поставки товаров [16, 17], при моделировании в задачах взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути [15].

Рассмотрим состав аксиоматики Λ множественной структуры M .

Аксиоматика базисных объектов:

- компонента $G = G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_n$ носителя неоднородна,
- $G_i, i = \overline{1, n}$ однородны (однотипны);
- $\#G_i$ – мощность содержания подкомпоненты;
- если $\#G_i = 0$, то подкомпонента пустая, и обозначается как $G_i = o$;
- элемент $s \in G$, если $\exists G_i \subset G, s \in G_i$;
- любой элемент $s \in G$ неделим (атомарный).

Определение 1. Отношение ϕ_1 на наборе $(s_1, s_2, \dots, s_r) \subseteq G_i^r$ задает множество, если элементы в наборе различны и любое бинарное отношение ϕ , через которое представляется отношение

$$\phi_1(s_1, s_2, \dots, s_r) = \phi(s_{k_1}, s_{k_2}) \oplus \phi(s_{k_2}, s_{k_3}) \oplus \dots \oplus \phi(s_{k_{r-1}}, s_{k_r}) \quad (2)$$

обладает свойством $\phi(s_{k_i}, s_{k_j}) = \phi(s_{k_j}, s_{k_i})$.

Здесь $\oplus$ – операция свертки де Моргана бинарных отношений.

Определение 2. Отношение ϕ_2 на наборе $(s_1, s_2, \dots, s_r) \subseteq G_i^r$ определяет мультимножество, если это отношение задает множество и элементы в наборе $(s_1, s_2, \dots, s_r)$ не все различны.

Определение 3. Отношение ϕ_3 , представленное в виде (2) через отношение некоторого порядка ϕ , задает упорядоченное множество по определению 1 или частично упорядоченное мультимножество по определению 2.

Определение 4. Отношение ϕ_4 по представлению (2) определения 1 задает неоднородное множество (мультимножество) и по определению 3 – неоднородное частично упорядоченное множество.

Определение 5. Заданные определениями 1 – 4 множества назовем базисными множественными объектами O_j^0 нулевого уровня.

Для распознавания объектов и отражения отношения на них используем обозначения: $\{\}$ – множество, $[\cdot]$ – упорядоченное множество, $\mathbb{I}[\cdot]$ – неоднородное множество, $\langle \cdot \rangle$ – мультимножество. Здесь символ « $\cdot$ » предполагает наличие содержания $S = (s_1, s_2, \dots, s_r)$ объекта O_j^0 , возможно пустого.

Объект O_j^0 , порожденный множественной структурой M , будем записывать так $O_j^0 \downarrow M$.

Конкретное содержание $S \subset G$ базисного объекта задается перечислением его элементов $s_j \in S$ или иным способом.

Если объект имеет пустое содержание (пустой объект), то он представляется $(o, o, \dots, o)$ или (o) , где под круглыми скобками подразумеваются любые из скобок объектов.

Аксиоматика множественных объектов. На множественной структуре M , конструктивно с помощью операции суперпозиции ψ можно задать более сложные объекты разных уровней сложности. Например, нулевой уровень сложности определяют базисные объекты, первый уровень сложности: множества множеств, списки списков и так далее, второй уровень – списочные множества списков и пр.

Объект O_i^k k -го уровня сложности, порожденный множественной структурой M , определяется рекурсивно:

- 1) $O_j^0 \downarrow M$;
- 2) $O_i^1 = \psi(O_j^0), O_i^1 \downarrow M$;

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$$3) O_i^2 = \psi(O_{j_0}^0, O_{j_1}^1), O_i^2 \lhd M;$$

$$4) k+1) O_i^k = \psi(O_{j_0}^0, O_{j_1}^1, \dots, O_{j_{k-1}}^{k-1}), O_i^k \lhd .$$

Рекурсія виконується над об'єктами з пустим содержанием и об'єкту на последнем уровне приписывается необходимое содержание.

Любой объект $O_i^k \in E$ имеет определенное *строение-структуру и содержание*.

Структура порожденного объекта отражает иерархическую подчиненность дочерних объектов родительскому множественному объекту.

Структура сложного объекта гибридная. Она включает в себя структуры подчиненных объектов разных типов и упорядоченная по этим типам.

Структура $C(O_i^k)$ объекта O_i^k задается *структурным деревом* или *структурной формой*, составленной из элементарных форм $l \in \{\{\}, \square, \square\square, \square\square\square\}$.

Так структура объекта O_i^4 , представленная структурной формой, может иметь вид

$$C(O_i^4) = \langle [\square\square, \{\}, \{\}, \square\square], \{\{\}, \{\}\}, \langle [\square\square, \{\}, \{\}, \square\square], \{\{\}, \{\}\}, \square\square \rangle. \quad (3)$$

В структуре (3) внешние скобки $\langle \rangle$ (*основная форма*) соответствуют родительскому объекту O_i^4 , а формы первого уровня ($\square\square, \{\}, \{\}, \square\square$) также как и других старших уровней – дочерние. Отметим, что местоположение любой элементарной формы в структурной форме, в общем случае, определяется уровнем, местом на нем и положением в месте уровня. Например, для первого уровня и первого места на нем $\square\square$ имеем

первую или четвертую форму $\square\square$.

В структурном дереве вершинами являются элементарные формы, а дуги отражают подчиненность форм объектов по уровням. Вершине дерева (основной форме) соответствуют скобки родительского объекта нулевого уровня, а его листьям вершины, не имеющие подчинения. На рис. 1 приведено структурное дерево, отображающее представленную выражением (3) структуру.

Содержание сложного множественного объекта определяется содержанием (S_j) базисных объектов O_j^0 .

Содержание D объекта O_i^k определим последовательностью содержаний (S_j) , листьев в структуре $C(O_i^k)$. Например, для объекта O_i^4 со структурой (3) его содержание задается выражением $D(O_i^4) = (\square\square, \{\}, \{\}, \square\square)$ или $D(O_i^4) = (S_1; S_2; \dots; S_{13})$. В первом случае явно указаны типы содержания, во втором случае тип содержания определяется по структуре объекта.

По структуре $C(O_i^k)$ и содержанию $D(O_i^k)$ однозначно задается множественный объект O_i^k , т.е.:

– любой множественный объект O_i^k задается упорядоченной парой $O_i^k = (C, D)$;

– объект без содержания $O_i^k = (C, (o))$ – пустой и его структура – схема.

Объект, имеющий одно содержание и структуру нулевого уровня – базисный.

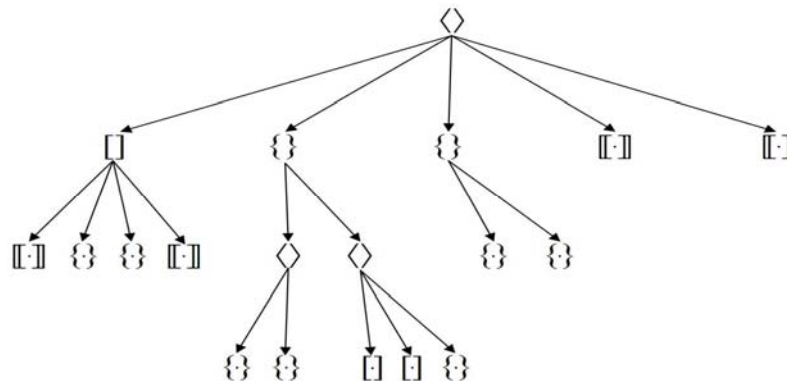


Рис. 1 Структурное дерево $C(O_i^4)$

Fig. 1 Structure tree $C(O_i^4)$

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Класс объектов E множественной структуры M представляется упорядоченной парой классов структур E_C и содержаний E_D , т.е. $E = (E_C, E_D)$.

Рассмотрим теперь подобъекты множественных объектов и их составляющих.

Подсодержания, подструктуры и подобъекты множественных объектов. Важным для множественных объектов является понятие принадлежности или непринадлежности ему некоторого элемента x . Так как множественный объект определяется его структурой и содержанием, то можно ставить этот вопрос по отношению к содержанию или по отношению к объекту. При этом возможны случаи:

- 1) если $x \in D(O_i^k)$ и $k = 0$, тогда $x \in O_i^0$;
- 2) если $x \in O_i^0$, то $x \in D(O_i^0)$;
- 3) если $x \in D(O_i^k)$ и $k \geq 1$, то $x \in O_i^k$ или $x \notin O_i^k$;
- 4) если $x \in O_i^k$, то $x \in D(O_i^k)$.

Отношения принадлежности элемента содержанию и множественному объекту имеют свои особенности. Рассмотрим особенности принадлежности содержанию.

Так как содержание множественного объекта определяется через содержание базисных объектов разного типа, которые могут быть упорядочены или неупорядочены, то отношение принадлежности $s \in (S)$ есть множественным или списочным. Отношение принадлежности и порожденные им классы подмножеств, включений и прочее изложены в теории множеств [18]. Отношения списочной принадлежности как упорядоченных множеств рассмотрено в работах [3, 14.]. В общем случае отношение $s \in D(O_i^k)$ предполагает наличие места в последовательности содержаний базисных объектов, которым принадлежит данный элемент s .

Определение 6. D_1 есть подсодержанием содержания D объекта O_i^k , если $\forall s \in (S) \subset D_1$ и это записывается так $D_1 \subset D(O_i^k)$.

Структура объекта $C(O_i^k)$ представляет самостоятельный интерес. Исследования структуры объекта проведем с помощью путей подчинения.

Определение 7. Путем подчинения в структуре $C(O_i^k)$ называется последовательность связанных подчинением дочерних форм объекта O_r^m , т.е. $h_{rj} = (l_r, l_{r_1}, \dots, l_j)$. Форма l_r называется *префиксом*, а форма l_j – *суффиксом* пути.

Пути подчинения множественной структуры объекта O_i^k покрывают всю структуру и их мультимножество обозначим символом $H(O_i^k)$.

Длина пути подчинения $|h_{ij}|$ определяется как количество связей подчинений между составляющими пути h_{ij} . Путь подчинения h_{ij} , длина которого равна нулю, есть *вырожденный*. Путь с длиной один называется *элементарным путем*.

Структура объекта пустая $C = (o) \in H$, если длина любого ее пути $|h_{ij}| = 0$.

Очевидно, что любой путь $h \in H$ составлен из вырожденных или элементарных путей.

Всякий путь мультимножества H может оканчиваться базисным объектом $(\cdot)$ или не оканчиваться ним. В первом случае путь назовем порождающим некоторый множественный объект, во втором – непорождающим.

Определение 8. Порождающий путь в мультимножестве $H(O_i^k)$ называется *полным* $\bar{h}$, если его префикс есть объектом нулевого уровня структуры $C(O_i^k)$.

Введем алгебру на мультимножестве путей $H(O_i^k)$ так, что $A = (H, \Xi)$ и пусть сигнатура Ξ задается множествами операциями и отношениями $\{=, <, \subset\}$.

Два пути $h_1, h_2 \in H$ одинаковы ($h_1 = h_2$), если совпадают их последовательности связанных подчинением одинаковых форм. Одинаковые пути присутствуют в мультимножестве H с определенной кратностью.

Для любого невырожденного пути $h_{mj} \in H$ и элементарного пути $h_{r,r+1}$ имеет место $h_{r,r+1} < h_{mj}$ или $h_{r,r+1} \nless h_{mj}$.

Определение 9. Путь h_1 есть *подпутем* пути

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

h , т.е. $h_1 \subset h$, если $\forall h_{r,r+1} \prec h_1$, то справедливо $h_{r,r+1} \prec h$.

Рассмотрим правило выполнения операции $\cup \in \Xi$.

Если подпуть h_j является суффиксом пути h_1 и префиксом для h_2 , то $h_1 \cup h_2 \in H$.

Очевидно, что имеет место теорема.

Теорема 1. Любой путь мультимножества H можно дополнить до полного пути.

Пусть h_k есть некоторый подпуть полного пути $\bar{h}_i \in H$ и $\{h_{ij}\} \subset H$ множество путей дополняющих h_k до пути $\bar{h}_i$.

Определение 10. Классом, образованным путем $\bar{h}_i$ и путями $\{h_{ij}\}$, дополняющими подпути $h_k \subset \bar{h}_i$ до пути $\bar{h}_i$, называется $K_i = \{\bar{h}_i, \{h_{ij}\}\}$.

Теорема 2. Множество путей H разбивается на классы K_i так, что $H = \bigcup_i K_i$.

Данная теорема является следствием теоремы алгебры разбиения множества на классы [8, 9].

Определение 11 Структура C_r есть подструктурой множественной структуры $C(O_i^k)$, $C_r \subset C(O_i^k)$, если $\forall h_r \prec C_r$, то справедливо $h_r \prec C(O_i^k)$.

Определение 12. Подструктура $C_r \subset C(O_i^k)$ называется порождающей, если в ней найдется хотя бы один порождающий путь подчинения.

Подструктуры $C_1, C_2 \subset C(O_i^k)$ одинаковы ($C_1 = C_2$), если $\forall h(C_1), \exists h(C_2), h(C_1) \prec h(C_2)$ и наоборот $\forall h(C_2), \exists h(C_1), h(C_2) \prec h(C_1)$.

Объекты $O_1^i, O_2^i \in E$ эквивалентны $O_1^i \sim O_2^i$, если $D(O_1^i) = D(O_2^i)$ и $C(O_1^i) = C(O_2^i)$.

Множество эквивалентных объектов $O_j^r \sim O_i^k$ образуют класс эквивалентности $Q(O_i^k)$.

Объект $O_i = (C_i, D_i)$ назовем *подобъектом* ($O_i \subset O_i^k$) множественного объекта $O_i^k = (C, D)$, если $C_i \subset C$ и $D_i \subset D$. Множество всех подобъектов объекта $O_i^k \in E$ образуют

класс подобъектов $\wp(O_i^k)$. При этом для класса подобъектов справедливы свойства:

- 1) $\wp \subset E$;
- 2) префиксы полных путей структур подобъектов и объекта могут не совпадать;
- 3) $\forall O_1 \in \wp, \exists O_2 \in \wp, D_1(O_1) = D_2(O_2)$ и $C_1(O_1) \not\subset C_2(O_2)$ или $C_2(O_2) \not\subset C_1(O_1)$;
- 4) пустые объекты $(C, (o)), ((o), (o)) \in \wp$, здесь C – схема подчинения;
- 5) базисный объект $((\cdot), (S)) \in \wp$;
- 6) $\wp_0 = \{((o), (o))\} = \emptyset \subset \wp_i$.

Сложность множественных объектов. Обычные множества характеризуются единственным показателем сложности – мощностью. Для множественных объектов одним показателем мощности невозможно обойтись, так как объекты задаются сложнее.

Если сложность $\wp(O_i^k)$ множественного объекта O_i^k , то из его задания следует представление сложности $\wp$ через сложности θ структуры и содержания объекта, т.е. сложность объекта определяется парой $\wp(O_i^k) = (\theta(C_i), \theta(D_i))$.

В общем, категория сложности $\wp$ любого множественного объекта удовлетворяет четырем аксиомам сложности систем из пяти [7]:

– если $O_i \subset O_i^k$, то $\wp(O_i^k) \geq \wp(O_i)$, здесь отношение $(\geq)$ над сложностями объектов понимается как отношения над сложностями их структур $\theta(C_i) \geq \theta(C_1)$ и содержаний $\theta(D_i) \geq \theta(D_1)$;

– если множество подобъектов $\{O_{rj}\} \subset \wp(O_i^k)$ вдоль полных порождающих путей $\bar{h}_{rj} \prec C(O_i^k)$, то $\wp(O_i^k) = \max_r \wp(O_{rj})$, здесь операция $\max_r \wp(O_{rj}) = (\max_r \theta(C_{rj}), \max_r \theta(D_{rj}))$;

– $\wp(O_i^k) \leq \sum_j \wp(O_{rj})$, из этой аксиомы следует, что $\theta(C_i) \leq \sum_j \theta(C_{rj})$ и $\theta(D_i) \leq \sum_j \theta(D_{rj})$;

– $\wp((o, o)) = 0$.

Последняя аксиома отражает факт существования подобъекта в классе $\wp(O_i^k)$ с пустой схемой и пустым содержанием, сложность ко-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

торого принимается нулевой.

Представление сложности множественного объекта через компоненты сложности его структуры и содержания позволяет разносторонне характеризовать множественный объект. Рассмотрим некоторые измерения сложности множественного объекта.

Объем содержания множественного объекта $O_i^k - \theta_1(D(O_i^k))$, для которого сложность измеряется количеством компонент $(S_j) \in D(O_i^k)$ или количеством листьев структурного дерева объекта. Например, для формы (3) $\theta_1(D(O_i^4)) = 13$.

Объем структуры множественного объекта $O_i^k - \theta_1(C(O_i^k))$ измеряется количеством элементарных форм структуры или количеством вершин структурного дерева. Так для формы (3) $\theta_1(C(O_i^4)) = 19$.

Объем множественного объекта $\vartheta_1(O_i^k) = (\theta_1(C_i), \theta_1(D_i))$, таким образом $\vartheta_1(O_i^4) = (19, 13)$.

Мощность содержания множественного объекта $\theta_2(D(O_i^k))$ можно измерять так: $\theta_2(D(O_i^k)) = \max\{\#S_j; S_j \in D(O_i^k)\}$ или так: $\theta_2(D(O_i^k)) = \sum_j \#S_j$.

Сложность структуры объекта можно определять числом подчинения структуры множественного объекта –

$$\theta_3(C(O_i^k)) = \min\{h_{1j}; h_{1j} \prec C(O_i^k)\},$$

избыточным числом подчинения

$$\theta_4(C(O_i^k)) = k - \theta_3(C(O_i^k)).$$

Например, для структуры (3) сложности $\theta_3(C(O_i^4)) = 2$ и $\theta_4(C(O_i^4)) = 2$, а для базисного объекта число подчинения $\theta_3((\cdot)) = 0$ и $\theta_4((\cdot)) = 0$.

Количество уровней объекта O_i^k также можно определить через измерение сложности $\theta_5(C(O_i^k)) = k = \max\{h_{1j}\} + 1$.

Очевидно, рассмотренные измерения сложности множественных объектов и их компонент удовлетворяют приведенным аксиомам сложности.

Операции над множественными объектами. Исходя из того, что множественные объекты определяются компонентами структуры и содержания, операции над объектами должны выполняться над их компонентами.

Пусть $(*)$ – некоторая бинарная операция, тогда для любых объектов O_1, O_2 можно формально записать $O_1 * O_2 = (C_1 * C_2, D_1 * D_2)$. Укажем на очевидные свойства и особенности этой операции:

– операция $(*)$ допустима к объектам O_1 и O_2 , если она применима к соответствующим структурам и содержаниям;

– правила выполнения операции зависят от структуры и содержания объектов и различны для содержания и структуры;

– операция $(*)$ в общем случае не коммутативна и не всегда ассоциативна;

– $\forall O_1, O_2 \in \wp$ – результат операции $O_1 * O_2 \in \wp$ или $O_1 * O_2 \notin \wp$, но всегда $O_1 * O_2 \in E$.

Сначала приведем основные теоретические сведения о множественных операциях над некоторыми базисными объектами O_i^0 и O_j^0 .

Известно [20, 22], что к мультимножествам применимы операции обычного объединения ($\cup$) и объединения со сложением ($\uplus$), обычного пересечения ($\cap$) и пересечения с умножением ($\cap_{\times}$), разности ($\setminus$), симметрической разности (Δ) и др., которые $\forall \langle S_i \rangle, \langle S_j \rangle \in E_D$ выполняются по правилам:

$$\begin{aligned} \langle S_i \rangle \cup \langle S_j \rangle &= \langle s; s \in \langle S_i \rangle \mid \langle S_j \rangle, m(s) = \\ &= \max\{m_{\langle S_i \rangle}(s), m_{\langle S_j \rangle}(s)\} \rangle, \\ \langle S_i \rangle \uplus \langle S_j \rangle &= \langle s; s \in \langle S_i \rangle \mid \langle S_j \rangle, m(s) = \\ &= m_{\langle S_i \rangle}(s) + m_{\langle S_j \rangle}(s) \rangle, \\ \langle S_i \rangle \cap \langle S_j \rangle &= \langle s; s \in \langle S_i \rangle \& \langle S_j \rangle, m(s) = \\ &= \min\{m_{\langle S_i \rangle}(s), m_{\langle S_j \rangle}(s)\} \rangle, \\ \langle S_i \rangle \cap_{\times} \langle S_j \rangle &= \langle s; s \in \langle S_i \rangle \& \langle S_j \rangle, m(s) = \\ &= m_{\langle S_i \rangle}(s) \cdot m_{\langle S_j \rangle}(s) \rangle, \end{aligned}$$

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$$\begin{aligned}
\langle S_i \rangle \supseteq \langle S_j \rangle, \langle S_i \rangle \setminus \langle S_j \rangle &= \\
= \langle s; s \in \langle S_i \rangle \& s \notin \langle S_j \rangle, m(s) = \\
= m_{\langle S_i \rangle}(s) - m_{\langle S_i \rangle \cap \langle S_j \rangle}(s) \rangle, \\
\langle S_i \rangle \cap \langle S_j \rangle \neq \emptyset, \langle S_i \rangle \Delta \langle S_j \rangle &= \\
= (\langle S_i \rangle \setminus \langle S_j \rangle) \cup (\langle S_j \rangle \setminus \langle S_i \rangle).
\end{aligned}$$

Здесь $m(s)$ – кратность элемента s на соответствующем мультимножестве.

Для упорядоченных множеств или мультимножеств O_1^0 и O_2^0 операции $(\cup)$ и $(\cap)$, в общем, не допустимы, т.к. отношения порядков на объектах O_1^0 и O_2^0 могут быть различными. А операции $(\oplus)$, $(\cap)$, $(\setminus)$ и (Δ) могут быть реализованы различными способами [3, 19]. Воспользуемся идеями правил этих операций из работы [3]

$$[S_i] \oplus [S_j] = \llbracket s; s \in [[S_i], [S_j]] \rrbracket,$$

$$m(s) = m_{[S_i]}(s) + m_{[S_j]}(s) \quad ;$$

$$\begin{aligned}
[S_i] \cap [S_j] &= \llbracket s; s \in [[S_i] \oplus [S_j]] \& [S_i] \& \\
&\& [S_j] \rrbracket, m(s) = m_{[S_i]}(s) + m_{[S_j]}(s) \rrbracket, \quad (4)
\end{aligned}$$

при этом $\#([S_i] \cap [S_j]) = \#([S_i] \oplus [S_j])$ и если элементы $s \notin [[S_i] \oplus [S_j]] \& [S_i] \& [S_j]$, то они заменяются в выражении $[S_i] \oplus [S_j]$ пустым символом o ;

$$\begin{aligned}
[S_i] \supseteq [S_j], \\
[S_i] \setminus [S_j] &= \left[\begin{array}{l} s; s \in [S_i] \& s \notin [S_j], m(s) = \\ = m_{[S_i]}(s) - m_{[S_i] \cap [S_j]}(s) \\ s = o; s \in [S_i] \& s \in [S_j], \end{array} \right] \quad (5)
\end{aligned}$$

здесь $\#([S_i] \setminus [S_j]) = \#[S_i]$;

$$\begin{aligned}
[S_i] \cap [S_j] &\neq \emptyset, \\
[S_i] \Delta [S_j] &= \left[\begin{array}{l} s; s \in [S_i] \oplus [S_j] \& [S_i] \setminus [S_j] \& \\ \& [S_j] \setminus [S_i], \\ s = o; s \in [S_i] \oplus [S_j] \& \\ \& s \notin [S_i] \setminus [S_j] \& s \notin [S_j] \setminus [S_i]. \end{array} \right], \quad (6)
\end{aligned}$$

при этом имеет место свойство

$$\#([S_i] \Delta [S_j]) = \#([S_i] \oplus [S_j]).$$

Операции $(\oplus)$ и $(\cap)$ могут выполняться над упорядоченными объектами разных типов, поэтому их результатом являются неоднородные объекты. А операции $(\setminus)$ и (Δ) выполнимы только над однотипными базисными объектами.

Заметим, что операция объединения со сложением допускает обобщение на универсуме E_D через декомпозицию первого места объединения. Назовем ее операцией *объединения со сложением по месту* $(\oplus_g)$ и определим ее правилом:

$$\begin{aligned}
[S_i] \oplus_g [S_j] &= [s_{i_1}, \dots, s_{i_g}, s_{i_{g+1}}, \dots, s_{i_m}] \oplus_g \\
&\oplus_g [s_{j_1}, s_{j_2}, \dots, s_{j_k}] = \\
&= \llbracket s; s \in [s_{i_1}, \dots, s_{i_g}, s_{j_1}, s_{j_2}, \dots, s_{j_k}, \\
&s_{i_{g+k+1}}, \dots, s_{i_{m+k}}] \rrbracket, \\
m(s) &= m_{[S_i]}(s) + m_{[S_j]}(s). \quad (7)
\end{aligned}$$

При этом порядок следования элементов в результирующем списке правила (7) частично меняется.

Так как правила операций $(\cap)$ и (Δ) определены через операцию объединения, то они также допускают обобщения на основе правила (7).

Из того, что содержание объекта произвольного уровня упорядочено по порядку следования его базисных объектов, над любыми содержаниями D_i и D_j множественных объектов O_i^k и O_j^r можно выполнить рассмотренные операции, приняв за элементы в правилах операций базисные объекты. Так операция $\oplus_g$ над содержаниями D_i и D_j выполняется по форме правила (7):

$$\begin{aligned}
D_i \oplus_g D_j &= (s_{i_1}, \dots, s_{i_g}, s_{i_{g+1}}, \dots, s_{i_m}) \oplus_g \\
&\oplus_g (s_{j_1}, s_{j_2}, \dots, s_{j_k}) = \\
&= (s_{i_1}, \dots, s_{i_g}, s_{j_1}, s_{j_2}, \dots, s_{j_k}, \\
&s_{i_{g+k+1}}, \dots, s_{i_{m+k}}),
\end{aligned}$$

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

а операция разности ($\setminus$) – по форме правила (5):

$$D_i \supseteq D_j,$$

$$D_i \setminus D_j = \left(\begin{array}{l} S; (S) \in D_i \& (S) \notin D_j, \\ S = (o); (S) \in D_i \& (S) \in D_j \end{array} \right),$$

где под отношением $\in$ понимается принадлежность элемента (S) содержанию D по имени или значению и по типу.

Для распространения рассмотренных операций на структуры подчинения множественных объектов необходимо ввести дополнительные операции.

Операция ($\bullet$) *прививки структуре* C элементарной формой.

Пусть $()_j, j = \overline{1, 4}$, любая элементарная форма без содержания и пусть заданная форма также без содержания – $()_{iq}^k \prec C$, расположенная на месте q уровня k , тогда операция ($\bullet$) действует по правилу:

$$() \bullet C = ()_j \bullet (()_{iq}^k \prec C) = (..., ()_{jr}, ...)_{iq}^k \prec C_1. \quad (8)$$

Правило (8) позволяет получить в структуре C_1 *привитую почку* $()_{jr}$, расположенную на месте r в форме $()_{iq}^k$, при этом $0 \leq k < n$, где n – число уровней структуры C .

Операция объединение структур $C_1 \uplus C_2$ допустима, если в структуре C_1 имеется почка, совпадающая с основной формой структуры C_2 . Поэтому эта операция выполняется конструктивно с помощью алгоритмической схемы:

1) определяется место прививки на структуре C_1 (уровень, место на нем элементарной формы и местоположение почки в выбранной форме);

2) основная форма структуры C_2 принимается за прививаемую элементарную форму;

3) выполняется операция прививки;

4) почка в структуре C_1 заменяется структурой C_2 .

Формально эта операция представляется выражением через пути подчинения структур

$$C_1 \uplus C_2 = \{h, h \prec C_1 | C_2\}, \quad (9)$$

$h \prec C_1 | C_2$ – означает, что $h \prec C_1$ или $h \prec C_2$.

Операция разности ($\bar{\setminus}$) структур C_1 и C_2 , в зависимости от поставленной цели, может конструктивно выполняться различным образом, например, через удаление их общего пути подчинения или удаления общего суффикса путей и пр.

Пусть образующие пути $\{\bar{h}_i\}, \{\bar{h}_j\}$ структур C_1 и C_2 такие, что $\{\bar{h}_j\} \subset \{\bar{h}_i\}$, тогда процесс удаления любого пути $\{\bar{h}_j\} \in \{\bar{h}_j\}$ выполняется поэтапно:

1) удаляется суффиксная форма пути в структуре C_1 ;

2) затем удаляется следующая форма (справа налево) пути в структуре C_1 ;

3) пункт 2 выполняется до тех пор, пока не будет пройден путь $\bar{h}_j$ или часть его до встречи с формой разветвления в структуре C_1 на пути $\bar{h}_i$;

4) в конец оставшейся части пути $\bar{h}_i$ прививается почка с пустым содержанием и типом начального суффикса пути $\bar{h}_i$.

Предпочтительна более простая процедура удаления общего суффикса путей $\bar{h}_i$ и $\bar{h}_j$, с последующей прививкой пустой почки типа удаленного суффикса так, что получим путь $\bar{h} = (..., (o)) \prec C_1$. При этом способе выполнения операции разности конструкция структуры C_1 сохраняется.

Отвлекаясь от технологического способа реализации операции разности структур, представим ее так

$$C_i \supset C_j,$$

$$C_i \setminus C_j = \left\{ \begin{array}{l} \bar{h}; \bar{h} \prec C_i \& \bar{h} \not\prec C_j, \\ \bar{h} = (..., (o)); \bar{h}_j \prec \bar{h}_i, \\ \bar{h}_i \prec C_i, \bar{h}_j \prec C_j \end{array} \right\}. \quad (10)$$

Операции пересечения ($\bar{\cap}$) и симметрической разности ($\bar{\Delta}$) над структурами выполняются по схеме правил (4) и (6) с использованием формул (9) и (10) и операций ($\uplus$) и ($\bar{\setminus}$).

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Теоретико-множественные операции над множественными объектами выполняются в комплексе над их структурами и содержаниями, например, объединение объектов $O_i^k(C_i, D_i)$ и $O_j^r(C_j, D_j)$ выполняется по правилу:

$$O_i^k \uplus O_j^r = (C_i \uplus C_j, D_i \uplus_g D_j),$$

в котором место g определяется местоположением прививаемой почки в структуре подчинения C_i .

Отношения над множественными объектами. Комплексные операции над составляющими объектов выполняются по разным правилам, поэтому следует ожидать этого и относительно отношений над множественными объектами. Например, если ρ отношение над объектами универсума $E = (E_C, E_D)$, а ρ_C и ρ_D отношения над составляющими этих объектов, то отношение $\rho = (\rho_C, \rho_D)$ может иметь отношения по компонентам различных типов, свойств и пр. Исходя из того, что любое отношение произвольного порядка с помощью прямой суммы представляется через бинарные отношения (см. представление (2)), то в дальнейшем сосредоточим внимание в основном – на последних.

Принимаем, что отношения $\rho_C(C_1, C_2)$ и $\rho_D(D_1, D_2)$ согласованы, если пары (C_1, D_1) и (C_2, D_2) определяют объекты O_1^k и O_2^r , на которых задается отношение $\rho = (\rho_C, \rho_D)$. Отношения ρ_C и ρ_D могут применяться различным образом. Рассмотрим вначале способы организации отношений на содержаниях.

Пусть $(S_{1i}) \subset D_1$ и $(S_{2j}) \subset D_2$, тогда отношение $\rho_D((S_{1i}), (S_{2j}))$, определенное на однотипных или разнотипных подсодержаниях, может обладать или не обладать свойством однотипности. Например, если базисные содержания (S_{1i}) и (S_{2j}) есть множества, то отношение $\rho_D(\{S_{1i}\}, \{S_{2j}\})$ также множество (свойство однотипности), так как оно задается свободным набором пар (s_{ik}, s_{jq}) , $s_{ik} \in S_{1i}$, $s_{jq} \in S_{2j}$. Если на декартовом произведении множеств задать

отношение порядка p расположения пар в произведении, тогда отношение $\rho_D^p(\{S_{1i}\}, \{S_{2j}\})$ есть разнотипное, так как отношение ρ_D^p задает упорядоченное множество.

Для однотипных отношений или отношений с разными компонентами содержания (S_{1i}) и (S_{2j}) возможны свойства эквивалентности, толерантности и др.

В общем случае отношение $\rho_D(D_1, D_2)$ определяется суперпозицией пар $((S_{1i}), (S_{2j}))$ и (s_{ik}, s_{jq}) , т.е.

$$\rho_D(D_1, D_2) = (s_{ik}, s_{jq}) \circ ((S_{1i}), (S_{2j})), \quad (11)$$

поэтому можно принять, что свойства отношения $\rho_D(D_1, D_2)$ по необходимости переносятся и на отношения этих пар и наоборот – одинаковые свойства пар приписываются отношению $\rho_D(D_1, D_2)$. То есть, если отношения на парах $((S_{1i}), (S_{2j}))$ и (s_{ik}, s_{jq}) обладают свойством рефлексии, то этим же свойством обладает и их суперпозиция. Очевидно, при наличии определенных свойств одной из составляющих отношения $\rho_D(D_1, D_2)$ следует говорить о частичном свойстве этого отношения.

Исходя из того, что множественные структуры объектов определяются упорядоченными системами образующих их полных путей подчинения $\bigcup_i \bar{h}_{1i} = C_1$, $\bigcup_j \bar{h}_{1j} = C_2$, то под декартовым произведением структур понимается произведение полных путей. Таким образом,

$$\rho_C(C_1, C_2) = \rho_C(\{\bar{h}_{1i}\}, \{\bar{h}_{2j}\}). \quad (12)$$

И теперь отношения на множественных объектах через формулы (11) и (12), определяются выражением:

$$\rho(O_1^k, O_2^r) = (\rho_C(C_1(O_1^k), C_2(O_2^r)),$$

$$\rho_D(D_1(O_1^k), D_2(O_2^r))).$$

Обобщение бинарного отношения на отношение m -го порядка для множественных объектов $O_i^{k_i} \in E$, $i = \overline{1, m}$ представляется как

$$\rho(O_1^{k_1}, O_2^{k_2}, \dots, O_m^{k_m}) = (\rho_C(C_1, C_2, \dots, C_m),$$

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$$\rho_D(D_1, D_2, \dots, D_m)). \quad (13)$$

Функции множественных объектов. Отношение (13) допускает обобщение посредством нагружения связей отношения операциями, алгоритмами действий и пр., поэтому порождает обобщенное отображение части универсума E множественных объектов

$$F(E_1) = (F_C(E_{C_1}), F_D(E_{D_1}))$$

или на классе подобъектов

$$\wp(O_i^k). F(\wp) = (F_C(\wp), F_D(\wp))$$

и определяет функции множественных объектов

$$F = (F_C, F_D): O_1^{k_1} \times O_2^{k_2} \times \dots \times O_m^{k_m} \rightarrow O_j^r.$$

Область определения и значений функции F могут быть различными: это сами объекты O_i^q и O_j^r или их подобъекты из класса $\wp(O_i^k)$ и способы получения результата функций также могут быть разными, в зависимости от структурной функции F_C и функции содержания F_D .

Структурная функция выделяет подструктуры объектов O_i^q , пути подчинения для доступа к содержаниям объектов, выполняет действия над выделенными структурами для получения структуры объекта O_j^r и др. А функция F_D выполняет действия над отдельными составляющими содержания и их подмножествами, под списками и пр. [3] или над гибридными комплексами содержания.

Рассмотрим несколько примеров задания функций.

Пример 1. Пусть функция определена на множественном подобъекте $O_j^q \subset O_i^k$ таким, что $O_j^q = (\bar{h}_j, (S_j))$, правилом

$$F(O_j^q) = (\bar{h}_j, \sum_{s \in A((S_j))} f(s)),$$

где $A((S_j))$ – класс подсодержаний базисного числового содержания (S_j) и функция f – числовая. Очевидно, функция F задает множе-

ственный объект $O_i^q = (\bar{h}_j, (S_j))$, для которого $\#S_j' = 1$.

Пример 2. Если множественный объект $O_i^k = (C, D)$, то функцию можно задать так

$$F(O_s^k) = (C, D'),$$

где содержание

$$D' = (D \setminus S_j) \uplus \sum_{s \in A((S_j))} f(s)$$

и функция f взята из примера 1.

Пример 3. Пусть словарная функция определена на множественном объекте по закону конкатенации $F_{\otimes}(C, D) = (f_{\otimes}(C), f_{\otimes}(D))$ так, что $f_{\otimes}(C) = \otimes(h_C^1, h_C^2) = h_C^3$, где h_C^1 и h_C^2 пути структурной схемы C , а результирующий схемный путь новой структуры задается выражением:

$$h_C^3 = \begin{cases} () \otimes () = (), & \text{если типы форм одинаковы} \\ () \otimes () = 0, & \text{если типы форм различны.} \end{cases}$$

И функция $f_{\otimes}(D) = (l_k)$, значение которой совокупность содержательных цепочек, задаваемых рекуррентным выражением:

- 1) $l = s_i \otimes s_j$,
- 2) $l = l \otimes s_{j,i} \mid s_{i,j} \otimes l$,
- 3) $l_k = l$.

Здесь $s_i \in S^1 \subset D$ и $s_j \in S^2 \subset D$, а подсодержания S^1 и S^2 порождены путями $\bar{h}^1$ и $\bar{h}^2$ структуры подчинения C .

Возможны определения более сложных словарных функций путем задания конструктивных произведений на грамматических порождающих структурах [19].

Результаты

Пример приложения множественных объектов. Во многих случаях прикладных исследований приходится принимать решения опираться на структуру предметной области, ее содержательную часть, функциональные связи и пр. Например, исследования в логистике проводятся на структурированных системах [11, 13, 16, 17].

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Рассмотрим пример функционирования системы доставки грузов фирмами F_i , ($i = 1, 2, \dots, n$).

Пусть у фирм F_i имеются склады Ci_j , $j = 1, \dots, m_i$, на которых хранятся товары Ti_j , $j = 1, \dots, j_i$. Товары доставляются потребителю в контейнерах Ki_k , $k = 1, \dots, k_i$ транспортными средствами (автомобилями, железнодорожными поездами, воздушными и водными судами). Процесс доставки товаров проходит несколько этапов.

Рассмотрим простой четырехэтапный процесс:

- 1) выбор контейнеров и их загрузка товарами на складах.
- 2) выбор вида транспорта и отгрузка контейнеров со складов.
- 3) второй выбор вида транспорта и прохождение таможенного контроля.
- 4) третий выбор вида транспорта и перегрузка на выбранный транспорт для доставки товаров на склад потребителя или прямая доставка товаров на склад потребителя.

Этапы процесса могут быть зависимыми или независимыми, или частично независимыми. Например, при зависимых этапах процесс доставки товаров реализует последовательное выполнение четырех этапов, при частичной зависимости может быть исключен из процесса третий этап. Каждый из этапов процесса доставки товаров связан с технологическими операциями обработки грузов, алгоритмами выбора и принятия решений. Анализ составных частей процесса показывает, что в этом процессе используются множества разных типов: списки (склады и операции), мультимножества (контейнеры, операции, транспорт), поэтому логистические модели функционирования системы доставки товаров фирмами F_i целесообразно представлять с помощью интерпретированной множественной структуры (1).

Компонента G носителя (логистической) структуры (1) составлена из множеств: складов Ci , товаров Ti , контейнеров Ki , транспортных средств $T = \{at_q, gt_r, vt_p, ot_l\}$, используемых фирмами, операций Υ обработки грузов на определенных этапах технологического процесса, алгоритмов A_Y^X (X – входное множест-

во, Y – множество решений) выбора, принятия решений и перехода на следующий технологический этап.

Так как фирмы могут иметь разные технологические процессы доставки товаров, то соответствующие им интерпретированные множественные объекты будут также различными. Пусть для фирмы F_1 множественный объект – $O_{F_1}^8$ отражает технологию обработки товаров и грузов при международных доставках, и его структура задается формой:

$$C(O_{F_1}^8) = [\langle [T]_{1j}, [[A_{Y1}^K [A_{Y2}^T [A_{Y3}^T [A_{Y4}^T \cdot [Y_4]] \cdot [Y_3]] \cdot [Y_2]] \cdot [Y_1]]_{K1}, \\ [[K]_{K1_2}, \dots, [K]_{K1_{k1}}], \langle C1_2 \rangle, \dots, \langle C1_{m1} \rangle], \quad (14)$$

в которой обозначение $[\cdot]_1$ определяет список складов, $\langle \rangle_2$ – мультимножество их содержаний: неоднородные множества товаров $[]_3$ и списки контейнеров $[\cdot]_4$. При этом контейнер $[\cdot]_{K1}$ подвержен выбору (вида контейнера или транспортного средства), по определенным спискам алгоритмов $([]_5, []_7, []_9, []_{11})$ и упорядоченной операционной обработке на каждом технологическом этапе $([]_6, []_8, []_{10}, []_{12})$. Связь списков алгоритмов A_Y^X и соответствующих операций Υ представлена через операцию последовательного выполнения $[A_Y^T] \cdot [\Upsilon]$.

Содержанием объекта $D(O_{F_1}^8)$ являются товары, алгоритмы выбора и принятия решений, а также операции на четырех этапах технологических процессов.

Анализ структуры (14) и содержания объекта $O_{F_1}^8$ позволяет выделить $8(k+1)m$ содержательных подобъектов, определяющих товары на складах и обработку контейнеров.

Эти подобъекты можно принять за систему образующих множественного объекта $O_{F_1}^8$. Так как каждый из выделенных подобъектов зада-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ется единственным полным путем подчинения $\bar{h}$, то его суффикс определяет последовательность (маршрут) операций или алгоритмов, или мультимножество товаров. Для конкретных логистических систем можно построить содержательные маршруты, выполняя определенные операции над путями подобъектов.

Если фирма F_2 осуществляет доставку товаров отечественным потребителям, то множественный логистический объект будет семи-уровневым $O_{F_2}^7$, со структурой:

$$C(O_{F_2}^7) = [\langle [T_{1_{1j}}]_{123}, [[A_{Y1}^K [A_{Y2}^T [A_{Y3}^T [A_{Y4}^T \cdot [Y_4]]_{12} \cdot [Y_3]]_{10} \cdot [Y_2]]_8 \cdot [Y_1]]_{K1_1}, [K1_2], \dots, [K1_{K1}] \rangle, \langle C1_2 \rangle, \dots, \langle C1_{m1} \rangle]. \quad (15)$$

Реорганизация фирм F_1 и F_2 или их слияние может быть формально проведена на моделях множественных объектов и их структур (14), (15) с помощью рассмотренных операций над объектами.

Научная новизна и практическая значимость

В работе исследованы свойства и характеристики компонент гибридных множественных объектов сложных систем, предложены оценки их сложности, приведены правила выполнения внутренних и внешних операций на объектах. Введены отношения произвольного порядка над множественными объектами, определено понятие функции и отображения на объектах множественной структуры.

В статье рассмотрены вопросы развития множественной структуры, порождающей множественные объекты.

Переход от абстрактной множественной структуры к предметной структуре требует трансформации системы и множественных объектов. Трансформация предполагает три последовательных этапа: спецификацию, или же привязку к предметной области; интерпретацию, т.е. представление в форме множественного объекта, и конкретизацию путем формирования цели. Предложенный подход описания систем, на основе гибридных множеств, может быть использован во многих прикладных системах для структурного и содержательного анализа.

Выводы

Существующее многообразие и разнородность предметных систем натолкнуло нас на разработку модели, обобщающую классические множества и их развитие – множества множеств. Идеи представления и конструирования множественных объектов систем были предложены в докладе [4].

Множественные объекты, в отличие от множеств, конструируются множественной структурой и сами представляются структурой и содержанием, поэтому операции над такими объектами выполняются нетрадиционно и требуют дальнейшего развития в прикладных системах.

Переход от абстрактной множественной структуры к предметной структуре требует трансформации системы и множественных объектов. Трансформация предполагает три последовательных этапа: спецификацию (привязку к предметной области), интерпретацию (множественных объектов) и конкретизацию (цели).

Предложенный подход описания систем, на основе гибридных множеств, может быть использован во многих прикладных системах для структурного и содержательного анализа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Босов, А. А. Підвищення ефективності роботи транспортної системи на основі структурного аналізу / А. А. Босов, Н. А. Мухіна, Б. П. Піх. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2005. – 200 с.
2. Босов, А. А. Структурная сложность систем / А. А. Босов, В. М. Ильман // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 173–179.
3. Босов, А. А. Функции множеств и их приложение : монография / А. А. Босов. – Днепропетровск : Андрей, 2007. – 182 с.
4. Ильман, В. М. Атрибутивные множественные объекты / В. М. Ильман, С. П. Самойлов // Соврем. информ. технологии на трансп., в пром-сти и образовании : тез. VII междунар. науч.-практ. конф. (18.04-19.04.2013) / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 64–65.
5. Ильман, В. М. Конструктивне представлення множинних об'єктів та їх властивості [Елек-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

- тронний ресурс] : [препринт] / В. М. Ильман, В. И. Шинкаренко // Проблемы програмування. – 2014. – № 1. – Режим доступа: <http://ead-nurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/3209>. – Загл. с экрана. – Проверено : 12.05.2015.
6. Ильман, В. М. Формальні структури та їх застосування : монографія / В. М. Ильман, В. В. Скалозуб, В. І. Шинкаренко. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009. – 205 с.
 7. Касти, Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы : пер. с англ. / Дж. Касти. – Москва : Мир, 1982. – 216 с.
 8. Курош, А. Г. Лекции по общей алгебре / А. Г. Курош. – Москва : Физматлит, 1973. – 162 с.
 9. Месарович, М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара. – Москва : Мир, 1978. – 311 с.
 10. Молчанов, А. А. Моделирование и проектирование сложных систем / А. А. Молчанов. – Київ : Вища шк., 1988. – 359 с.
 11. Ногин, В. Д. Принятие решений при многих критериях : учеб.-метод. пособие / В. Д. Ногин. – Санкт-Петербург : ИТАС, 2007. – 104 с.
 12. Орловский, П. Н. Системный анализ проблем транспортных узлов / П. Н. Орловский, Г. П. Скворцов. – Київ : Основа, 2007. – 596 с.
 13. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий : пер. с англ. / Т. Саати. – Москва : Радио и связь, 1993. – 278 с.
 14. Скорняков, Л. А. Элементы теории структур / Л. А. Скорняков. – 2-е изд., доп. – Москва : Наука, 1982. – 160 с.
 15. Халипова, Н. В. Моделивання взаємодії колії та рухомого складу / Н. В. Халипова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 5 (47). – С. 58–69. doi: 10.15802/stp2013/17967.
 16. Халипова, Н. В. Обоснование применения дискретного принципа максимума в методе фаз при проектировании логистических систем доставки грузов [Электронный ресурс] / Н. В. Халипова // Universum : Техн. науки. – 2015. – № 1 (14). – Режим доступа: <http://universum.com/ru/tech/archive/item/1891>. – Загл. с экрана. – Проверено : 13.05.2015.
 17. Халипова, Н. В. Оценка эффективности функционирования международных логистических систем / Н. В. Халипова // Техн. науки – от теории к практике : сб. ст. по материалам XXXVI междунар. науч.-практ. конф. / СибАК – Новосибирск, 2014. – № 7 (32). – С. 99–115.
 18. Хаусдорф, Ф. Теория множеств / Ф. Хаусдорф. – Москва ; Ленинград : ОНТИ, 1937. – 306 с.
 19. Шинкаренко, В. И. Конструктивно-продукционные структуры и их грамматические интерпретации. I. Обобщенная формальная конструктивно-продукционная структура / В. И. Шинкаренко, В. М. Ильман // Кибернетика и систем. анализ. – 2014. – Т. 50, № 5. – С. 8–16.
 20. An Overview of the Applications of Multiset / D. Singh, A. M. Ibrahim, T. Yohanna, J. Singh // Novi Sad J. of Mathematics. – 2007. – Vol. 37, № 2. – P. 73–92.
 21. Atkin, R. H. Mathematical structure in human affairs / R. H. Atkin. – London : Heinemann, 1974. – 212 p.
 22. Blizard, W. The Development of Multiset Theory / W. Blizard // Notre Dame J. of Formal Logic. – 1989. – Vol. 30, № 1. – P. 36–66.
 23. Syropoulos, A. Mathematic of Multisets / A. Syropoulos // Multiset Processing. Lecture Notes in Computing Science. – 2001. – Vol. 2235. – P. 347–358. doi: 10.1007/3-540-45523-X_17.

А. А. БОСОВ¹, В. М. ІЛЬМАН², Н. В. ХАЛІПОВА^{3*}

¹Каф. «Прикладна математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 36, ел. пошта AAVosov@i.ua, ORCID 0000-0002-5348-2205

²Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 35, ORCID 0000-0003-0983-8611

^{3*}Каф. «Транспортні системи та технології», Університет митної справи та фінансів, вул. Дзержинського, 2/4, Дніпропетровськ, Україна, 49000, тел. +38 (056) 46 95 98, e-mail khalipov@rambler.ru, ORCID 0000-0001-5605-6781

МНОЖИННІ ОБ'ЄКТИ

Мета. Розвиток складних технологій виробничих й управлінських процесів, систем інформатики, прикладних об'єктів теорії систем та ін. вимагає вдосконалення математичних методів, нових підходів для досліджень прикладних систем. А різноманітність й різномірність предметних систем потребує розробки моделі, що узагальнює класичні множини та їх розвиток – множини множин. Множинні об'єкти, на відміну від

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

множин, конструюються множинною структурою й самі представляються структурою та змістом. Метою роботи є аналіз множинної структури, що породжує множинні об'єкти, подальший розвиток операцій над такими об'єктами в прикладних системах. **Методика.** Для досягнення цілей дослідження множинна структура об'єктів представляється конструктивною трійкою, що складається з носія, сигнатури й аксіоматики. Множинний об'єкт визначається структурою й змістом, а також представляється гібридною суперпозицією, складеною з множин, мультимножин, упорядкованих множин (списків) та неоднорідних множин (послідовностей, кортежів). **Результати.** У роботі розглянуті властивості й характеристики компонентів гібридних множинних об'єктів складних систем, запропоновані оцінки їх складності, наведені правила виконання внутрішніх і зовнішніх операцій на об'єктах. Уведено відносини довільного порядку над множинними об'єктами, визначене поняття функції й відображення на об'єктах множинної структури. **Наукова новизна.** У даній роботі розглянуті питання розвитку множинної структури, що породжує множинні об'єкти. **Практична значимість.** Перехід від абстрактної множинної структури до предметної структури вимагає трансформації системи й множинних об'єктів. Трансформація припускає три послідовних етапи: специфікацію (прив'язку до предметної області), інтерпретацію (множинних об'єктів) і конкретизацію (мети). Запропонований підхід опису систем, на основі гібридних множин, може бути використаний у багатьох прикладних системах для структурного й змістовного аналізу. Наведено приклад застосування гібридних множин для моделювання логістичних систем.

Ключові слова: конструктивна множинна структура; гібридні множинні об'єкти; моделювання; складні системи; множини; списки; мультимножини; кортежі; логістична система

A. A. BOSOV¹, V. M. ILMAN², N. V. KHALIPOVA^{3*}

¹Dep. «Applied Mathematics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 36, e-mail AABosov@i.ua, ORCID 0000-0002-5348-2205

²Dep. «Computer Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 35, ORCID 0000-0003-0983-8611

^{3*}Dep. «Transport Systems and Technologies», Academy of Customs Service of Ukraine, Dzerzhynskiy St., 2/4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 46 95 98, e-mail khalipov@rambler.ru, ORCID 0000-0001-5605-6781

MULTIPLE OBJECTS

Purpose. The development of complicated techniques of production and management processes, information systems, computer science, applied objects of systems theory and others requires improvement of mathematical methods, new approaches for researches of application systems. And the variety and diversity of subject systems makes necessary the development of a model that generalizes the classical sets and their development – sets of sets. Multiple objects unlike sets are constructed by multiple structures and represented by the structure and content. The aim of the work is the analysis of multiple structures, generating multiple objects, the further development of operations on these objects in application systems. **Methodology.** To achieve the objectives of the researches, the structure of multiple objects represents as constructive trio, consisting of media, signatures and axiomatic. Multiple object is determined by the structure and content, as well as represented by hybrid superposition, composed of sets, multi-sets, ordered sets (lists) and heterogeneous sets (sequences, corteges). **Findings.** In this paper we study the properties and characteristics of the components of hybrid multiple objects of complex systems, proposed assessments of their complexity, shown the rules of internal and external operations on objects of implementation. We introduce the relation of arbitrary order over multiple objects, we define the description of functions and display on objects of multiple structures. **Originality.** In this paper we consider the development of multiple structures, generating multiple objects. **Practical value.** The transition from the abstract to the subject of multiple structures requires the transformation of the system and multiple objects. Transformation involves three successive stages: specification (binding to the domain), interpretation (multiple sites) and particularization (goals). The proposed describe systems approach based on hybrid sets can be used in many application systems for structural and content analysis. An example of the use the hybrid sets for logistics systems modeling is shown.

Keywords: constructive multiple structure; hybrid multiple objects; modelling; complex systems; sets; lists; multi-sets; tuples; logistics system

REFERENCES

1. Bosov A.A., Mukhina N.A., Pikh B.P. *Pidvyshchennia efektyvnosti roboty transportnoi systemy na osnovi strukturnoho analizu* [Improving the efficiency of the transport system based on structural analysis]. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2005. 200 p.
2. Bosov A.A., Ilman V.M. Strukturnaya slozhnost sistem [Structural complexity of systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 173-179.
3. Bosov A.A. *Funktsii mnozhestv i ikh prilozheniye* [Set functions and their application]. Dneprodzerzhinsk, Andrey Publ., 2007. 182 p.
4. Ilman V.M., Samoylov S.P. Atributivnyye mnozhestvennyye obekty [Attribute multiple objects]. *Tezisy VII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennye informatsionnye tekhnologii na transporte, v promyshlennosti i obrazovanii (18.04-19.04.2013)»* [Proc. of the VIIth Int. Scientific and Practical. Conf. «Contemporary Information Technologies at Transport, Industry and Education»]. Dnipropetrovsk, 2013, pp. 64-65.
5. Ilman V.M., Shynkarenko V.Y. Konstruktyvne predstavleniia mnozhynykh ob'ektiv ta yikh vlastyvoli [Constructive presentation of multiple objects and their properties]. *Problemy prohramuvannia – Programming Problems*, 2014, no. 1. Available at: http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/12345_6789/3209 (Accessed 12 May 2015).
6. Ilman V.M., Skalozub V.V., Shynkarenko V.I. *Formalni struktury ta yikh zastosuvannia* [Formal structures and their applications]. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2009. 205 p.
7. Kasti Dzh. *Bolshie sistemy. Svyaznost, slozhnost i katastrofy* [Large systems. Connectivity, complexity and disasters]. Moscow, Mir Publ., 1982. 216 p.
8. Kurosh A.G. *Lektsii po obshchey algebre* [Lectures on General Algebra]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1973. 162 p.
9. Mesarovich M., Takakhara Ya. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskiye osnovy* [General Systems Theory: mathematical foundations]. Moscow, Mir Publ., 1978. 311 p.
10. Molchanov A.A. *Modelirovaniye i proyektirovaniye slozhnykh sistem* [Modeling and design of complex systems]. Kyiv, Vishcha shkola Publ., 1988. 359 p.
11. Nogin V.D. *Prinyatiye resheniy pri mnogikh kriteriyakh* [Decision-making in many criteria]. Saint-Petersburg, YuTAS Publ., 2007. 104 p.
12. Orlovskiy P.N., Skvortsov G.P. *Sistemnyy analiz problem transportnykh uzlov* [System analysis of the transport junctions problems]. Kyiv, Osnova Publ., 2007. 596 p.
13. Saati T. *Prinyatiye resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Making decisions. The hierarchy's analysis method]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993. 278 p.
14. Skornyakov L.A. *Elementy teorii struktur* [Elements of structures theory]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 160 p.
15. Khalipova N.V. Modeliuvannia vzaiemodii kolii ta rukhomoho skladu [Modeling of the track and rolling stock interaction]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 5 (47), pp. 58-69. doi: 10.15802/stp2013/17967.
16. Khalipova N.V. Obosnovaniye primeneniya diskretnogo printsipa maksimuma v metode faz pri proektirovani logisticheskikh sistem dostavki gruzov [Use justification of a discrete maximum principle method for the design phase of logistic systems delivery]. *Universum: Tekhnicheskiye nauki – Universum: Technical sciences*, 2015, no. 1 (14). Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/1891> (Accessed 13 May 2015).
17. Khalipova N.V. Otsenka effektivnosti funktsionirovaniya mezhdunarodnykh logisticheskikh system [Evaluating the effectiveness of the international logistics systems]. *Sbornik statey po materialam XXXVI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tekhnicheskiye nauki – ot teorii k praktike»* [Proc. of the XXXVIth Int. Scientific and Practical. Conf. «Technical Science – From Theory to Practise»]. Novosibirsk, 2014, no. 7 (32), pp. 99-115.
18. Khausdorf F. *Teoriya mnozhestv* [Set Theory]. Moscow, Leningrad, ONTI Publ., 1937. 306 p.
19. Shinkarenko V.I., Ilman V.M. Konstrukтивно-produktsionnyye struktury i ikh grammaticheskiye interpretatsii. I. Obobshchennaya formalnaya konstrukтивно-produktsionnaya struktura [Structurally-productions structure and their grammatical interpretation. I. Generalized formal design and production structure]. *Kibernetika i sistemnyy analiz – Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 8-16.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

20. Singh D., Ibrahim A.M, Yohanna T, Singh J. An Overview of the Applications of Multiset. *Novi Sad Journal of Mathematics*, 2007, vol. 37, no. 2, pp. 73-92.
21. Atkin R.H. Mathematical structure in human affairs. London, Heinemann Publ., 1974. 212 p.
22. Blizard W. The Development of Multiset Theory. *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 1989, vol. 30, no. 1, pp. 36-66.
23. Syropoulos A. Mathematic of Multisets. Multiset Processing. *Lecture Notes in Computing Science*, 2001, vol. 2235, pp. 347-358. doi: 10.1007/3-540-45523-X_17.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. Б. И. Морозом (Україна); д.фіз-мат.н., проф. С. О. Пічуговим (Україна) .

Надійшла до редколегії 21.01.2015

Прийнята до друку 15.04.2015

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.867.3–83

В. М. БОГОМАЗ^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРОЕКТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕВАТОРА НА ПАРАМЕТРИ ЙОГО ПРИВОДУ

Мета. Привід відноситься до основних елементів стрічкових ковшових елеваторів. Для визначення потужності приводу проводяться розрахунки за стандартними методиками, що потребує достатньо великих витрат часу. В роботі необхідно провести аналіз впливу проектних характеристик на параметри приводу швидкохідних ковшових стрічкових елеваторів та побудувати удосконалений алгоритм прискореного визначення потужності його приводу за проектними характеристиками. Цей алгоритм враховуватиме тип вантажу, висоту підйому, необхідну продуктивність, стандартні параметри ковшів та стрічки. **Методика.** Використовуючи параметричні залежності потужності приводу елеваторів від його проектних характеристик (отриманих автором раніше), запропоновано удосконалений алгоритм прискореного визначення потужності приводу швидкохідних елеваторів із глибокими та мілкими ковшами при заданих типах вантажу, продуктивності, висоті підйому. **Результати.** Запропоновано алгоритм прискореного визначення потужності приводу швидкохідних вертикальних елеваторів із глибокими та мілкими ковшами в залежності від проектних параметрів. Розглянуто приклад застосування такого алгоритму для елеватора, призначеного для транспортування цементу. Визначено аналітичні залежності потужності приводу такого елеватора від продуктивності та висоти підйому. Побудовано відповідні графічні залежності та встановлено характер зміни потужності приводу при зміні величини кожної із проектних характеристик. **Наукова новизна.** Вперше побудовано удосконалений алгоритм визначення потужності приводу елеватора при заданих проектних характеристиках (типі вантажу, висоті підйому, продуктивності), який враховує стандартні розміри й параметри ковшів та стрічок. **Практична значимість.** Використання запропонованого алгоритму розрахунку дає можливість відносно швидкого визначення орієнтовного значення потужності приводу вертикальних швидкохідних елеваторів із глибокими та мілкими ковшами. Також можливим є побудування графічних залежностей потужності приводу від значень продуктивності та висоти підйому при конкретному типі вантажу, що сприяє якісному підбору його основних елементів для конкретних проектних характеристик. Такий алгоритм дає можливість значно економити час на розрахунки в процесі проектування елементів елеваторів.

Ключові слова: елеватор; ківш; привід; потужність; продуктивність; вантаж; висота підйому; алгоритм

Вступ

Транспортуючі машини сьогодні широко використовуються в будь-якій галузі промисловості. Машини безперервного транспорту, як різновид транспортуючих машин, є одним із

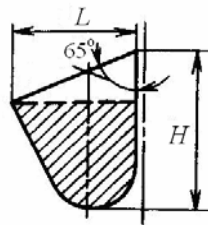
засобів комплексної механізації навантажувально-розвантажувальних робіт виробничих процесів, які суттєво підвищують продуктивність, ефективність та рентабельність виробництва. Одним з видів машин безперервного транспорту з гнучким тяговим органом є ков-

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

шові стрічкові елеватори. Елеватори за своєю конструкцією та призначенням є підйомниками вертикальної дії і використовуються для вертикального та крутопохилого (під кутом 60–82°) переміщення насипних і штучних вантажів без проміжного завантаження і розвантаження. Такі типи машин застосовуються на підприємствах хімічної, металургійної, машинобудівної промисловості, у виробництві будівельних матеріалів, на вуглезбагачувальних фабриках, на харчових комбінатах, в зерносховищах.

Елеватори поділяються на швидкохідні та тихохідні. В цій роботі розглядаються перші з них, які характеризуються відцентровим розвантаженням. На таких елеваторах використовують лише глибокі та мілкі ковші. Глибокі ковші мають пологий обріз передньої кромки та підвищену глибину (рис. 1, а) та застосовуються для сухих, легкосипучих пилоподібних, зернистих та дрібнокускових вантажів (наприклад, зерна, піску, землі, дрібного вугілля). Мілкі ковші мають крутий обріз передньої кромки та малу глибину (рис. 1, б), що допомагає кращому розвантаженню. Такі ковші застосовують для транспортування вологих та поганосипучих, зернистих та дрібнокускових насипних вантажів.

а–а



б–б

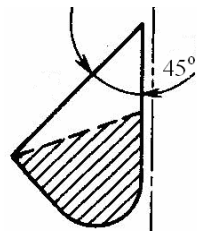


Рис. 1. Типи ковшів:

а – глибокий з циліндричним днищем;

б – мілкий з циліндричним днищем

Fig. 1. Types of scoops:

a – deep with a cylindrical bottom;

b – shallow with a cylindrical bottom

Основними публікаціями, які описують будову, конструктивні особливості, експлуатаційні та розрахункові параметри таких елеваторів, є [1, 4, 5, 7, 9, 10]. Для визначення параметрів приводу елеватора, зокрема його потужності, потрібно виконати розрахунок його барабанів, тягового органу (стрічки), тяговий розрахунок та виконати підбір основних елементів приводу. Порядок виконання таких розрахунків детально описаний в роботах [7, 8]. Використовуючи таку методику розрахунку приводу елеваторів, витрачається досить багато часу. Тому задача удосконалення алгоритму визначення потужності приводу елеваторів для конкретних проектних характеристик та якісного підбору його основних елементів є досить актуальною в процесі проектування елеваторів.

Мета

Метою роботи є дослідження впливу проектних характеристик ковшових стрічкових елеваторів на параметри його приводу, зокрема потужність, а також – побудова прискореного алгоритму визначення потужності приводу елеватора за його проектними характеристиками, який враховує тип вантажу, висоту підйому, необхідну продуктивність, стандартні параметри ковшів та стрічки.

Методика

Основні типи вантажів, для транспортування яких використовують швидкохідні ковшові стрічкові елеватори з глибокими та мілкими ковшами, та відповідні їм рекомендовані за джерелом [8] види ковшів та розрахункові параметри елеваторів наведені в табл. 1.

Діаметр привідного барабана залежить від швидкості руху та способу розвантаження ковшів. Враховуючи те, що робота присвячена швидкохідним елеваторам, яким притаманне відцентрове розвантаження, то діаметр барабана визначається за формулою

$$D \leq 0,204v^2, \quad (1)$$

де v – швидкість руху стрічки, м/с (обирається за табл. 1).

Таблиця 1

Типи вантажів та відповідні їм характеристики елеваторів

Table 1

Types of loads and descriptions of elevators corresponding to them

Насипний вантаж	Тип ковша	Середній коефіцієнт заповнення ковша	Швидкість стрічки, м/с	Щільність матеріалу, т/м ³
Цемент	Г	0,8	1,25–1,8	1,0–1,8
Земля	М	0,6	1–2	1,1–1,6
Пісок сухий	М	0,6	1–2	1,4–1,65
Крейда з порошку	М	0,6	1–2	0,95–1,2
Деревна тирса	Г	0,8	1,25–2,0	0,16–0,32
Суша глина	Г	0,8	1,25–2,0	0,7–1,5
Торф фрезерний	Г	0,8	1,25–2,0	0,33–0,4
Дрібне вугілля	Г	0,8	1,25–2,0	0,8–1,0

Примітка: Типи ковшів: Г – глибокий, М – мілкий.

Розраховане значення округлюється до найближчого зі стандартних з ряду: 250, 400, 500, 630, 800, 1 000, 1 250 мм.

За тяговий орган в ківшевих елеваторах використовують стрічки згідно з ГОСТ 23831-79, ГОСТ 20-85. Для визначеності подальших досліджень приймаємо в якості тягового органу ківшевого елеватора стрічку конвеєрну гумовотканинну за ГОСТ 20-85 типу БКНЛ-150. Кількість прокладок такої стрічки становить від 3 до 6.

Кількість прокладок стрічки визначається за формулою:

$$i = \frac{D}{125 \dots 150}. \quad (2)$$

Розраховане значення має бути не менше, ніж $i_{\min} = 3$ та не перевищувати $i_{\max} = 6$. Це пояснюється тим, що такий тип стрічок має від 3 до 6 прокладок.

Тяговий розрахунок стрічкового ківшевого елеватора виконується методом обходу за контуром, основний принцип якого полягає у виявленні характерних точок траси, де відбувається зміна натягу стрічки. Схема ківшевого стрічкового елеватора з розставленими ковшами наведена на рис. 2.

Для подальших досліджень введемо до роз-

гляду такі коефіцієнти, які враховують властивості вантажу, що транспортується:

$$\alpha = 3,6 \nu \rho \psi \text{ т} \cdot \text{м} / \text{л} \cdot \text{год}, \quad (3)$$

$$\alpha \beta = \rho \psi g \text{ Н} / \text{м}^3, \quad (4)$$

де ψ – коефіцієнт заповнення ковшів (відповідно до фізико-механічних властивостей вантажу, табл. 1); ρ – щільність вантажу, т/м³; ν – швидкість руху стрічки, м/с; g – прискорення вільного падіння, Н/кг.

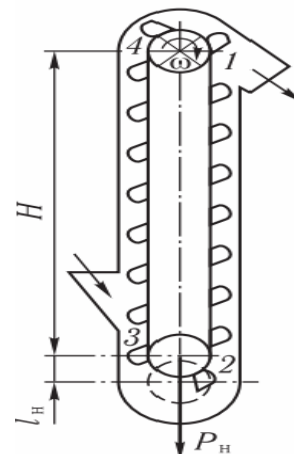


Рис. 2. Схема елеватора з розставленими ковшами

Fig. 2. A chart of elevator with placed scoops

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Для визначеності в подальших дослідженнях будемо далі приймати швидкість руху стрічки та щільність матеріалу, як середнє значення між двома границями інтервалу. Для таких значень швидкості із врахуванням даних табл. 1 наведено величини коефіцієнтів α та $\alpha\beta$ в табл. 2.

Як відомо, максимальне зусилля в стрічці виникає в кінці робочої гілки, тобто у точці 4 (див. рис. 2). В попередній роботі автора [2] побудовано параметричну залежність значень зу-

силь у точці 4 та потужності приводу ківшевих стрічкових елеватора від його проектної продуктивності, що дало можливість отримувати необхідне значення потужності приводу із врахуванням типу та фізико-механічних властивостей вантажів, величини висоти підйому та проектної продуктивності, залучаючи для розрахунку лише одну формулу. Залежності зусилля в точці 4 від коефіцієнтів α та $\alpha\beta$, висоти підйому, будови та розміру ковша, побудовані автором в роботі [2], наведені в табл. 3 та 4.

Таблица 2

Розрахункові параметри вантажу та елеватора

Table 2

Calculated parameters of load and elevator

Тип ковша	Насипний вантаж	Коефіцієнт заповнення ковша Ψ	Щільність вантажу, т/м^3	Рекомендована швидкість руху стрічки v , м/с	Значення коефіцієнтів	
					α , т·м/л·год	$\alpha\beta$, Н/м ³
Глибокий	Цемент	0,8	1,4	1,5	6,05	10,98
	Деревна тирса	0,8	0,24	1,6	1,39	1,88
	Суша глина	0,8	1,1	1,6	5,07	8,62
	Торф фрезерний	0,8	0,36	1,6	1,66	2,82
	Дрібне вугілля	0,8	0,9	1,6	4,15	7,06
Мілкий	Земля	0,6	1,4	1,5	4,54	8,23
	Пісок сухий	0,6	1,5	1,5	1,35	8,82
	Крейда з порош-ку	0,6	1,1	1,5	0,99	6,47

Таблица 3

Сила натягу в точці 4 елеватора з глибокими ковшами

Table 3

Tension force in a point 4 of the elevator with deep scoops

Ширина ковша B_k , мм	Сила натягу при стрічці з $i = 3$ S_4 , Н	Сила натягу при стрічці з $i = 4$ S_4 , Н	Продуктивність елеватора, т/год
100	$37H + \alpha\beta(7,95 + H)$	$39,2H + \alpha\beta(7,95 + H)$	α
125	$36,4H + 1,3\alpha\beta(7,95 + H)$	$39H + 1,3\alpha\beta(7,95 + H)$	$1,3\alpha$
160	$47,7H + 2\alpha\beta(7,95 + H)$	$51,1H + 2\alpha\beta(7,95 + H)$	2α
200	$74,1H + 3,24\alpha\beta(7,95 + H)$	$78,4H + 3,24\alpha\beta(7,95 + H)$	$3,24\alpha$
250	$103,6H + 5\alpha\beta(7,95 + H)$	$108,8H + 5\alpha\beta(7,95 + H)$	5α
320	$138,1H + 8\alpha\beta(7,95 + H)$	$145H + 8\alpha\beta(7,95 + H)$	8α
400	$265,7H + 12,6\alpha\beta(7,95 + H)$	$274,4H + 12,6\alpha\beta(7,95 + H)$	$12,6\alpha$
500	$345,2H + 19\alpha\beta(7,95 + H)$	$356,4H + 19\alpha\beta(7,95 + H)$	19α

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Продовження табл. 3

Continuation of Table 3

Ширина ковша B_k , мм	Сила натягу при стрічці з $i = 3$ S_4 , Н	Сила натягу при стрічці з $i = 4$ S_4 , Н	Продуктивність елеватора, т/год
650	$438H + 28,6\alpha\beta(7,95+H)$	$451,8H + 28,6\alpha\beta(7,95+H)$	$28,6\alpha$
800	$443,3H + 40\alpha\beta(7,95+H)$	$460,5H + 40\alpha\beta(7,95+H)$	40α
1 000	$524,6H + 56,3\alpha\beta(7,95+H)$	$545,3H + 56,3\alpha\beta(7,95+H)$	$56,25\alpha$

Закінчення табл. 3

End of Table 3

Ширина ковша B_k , мм	Сила натягу при стрічці з $i = 5$ S_4 , Н	Сила натягу при стрічці з $i = 6$ S_4 , Н	Продуктивність елеватора, т/год
100	$41,3H + \alpha\beta(7,95+H)$	$43,5H + \alpha\beta(7,95+H)$	α
125	$41,6H + 1,3\alpha\beta(7,95+H)$	$44,2H + 1,3\alpha\beta(7,95+H)$	$1,3\alpha$
160	$54,6H + 2\alpha\beta(7,95+H)$	$58H + 2\alpha\beta(7,95+H)$	2α
200	$82,7H + 3,24\alpha\beta(7,95+H)$	$87H + 3,24\alpha\beta(7,95+H)$	$3,24\alpha$
250	$113,9H + 5\alpha\beta(7,95+H)$	$119,1H + 5\alpha\beta(7,95+H)$	5α
320	$151,1H + 8\alpha\beta(7,95+H)$	$158H + 8\alpha\beta(7,95+H)$	8α
400	$283H + 12,6\alpha\beta(7,95+H)$	$291,6H + 12,6\alpha\beta(7,95+H)$	$12,6\alpha$
500	$367,6H + 19\alpha\beta(7,95+H)$	$378,8H + 19\alpha\beta(7,95+H)$	19α
650	$465,6H + 28,6\alpha\beta(7,95+H)$	$479,4H + 28,6\alpha\beta(7,95+H)$	$28,6\alpha$
800	$477,8H + 40\alpha\beta(7,95+H)$	$495H + 40\alpha\beta(7,95+H)$	40α
1 000	$566H + 56,3\alpha\beta(7,95+H)$	$586,7H + 56,3\alpha\beta(7,95+H)$	$56,25\alpha$

За максимальним зусиллям, отриманим за розрахунками за допомогою табл. 3, 4, уточнюється кількість прокладок у стрічці за формулою:

$$i = \frac{n_c S_4}{B \sigma_p k_0}, \quad (5)$$

де n_c – коефіцієнт запасу міцності стрічки (для

бельтингової стрічки приймається $n_c = 11 \dots 12$);
 $\sigma_p = 54 \cdot 10^3$ Н/м прокладки – границя міцності для гумотканинної стрічки;
 $k_0 = 0,7 \dots 0,9$ – коефіцієнт, який враховує послаблення стрічки отворами під заклепки для кріплення ковшів.

Таблиця 4

Сила натягу в точці 4 елеватора з мілкими ковшами

Table 4

Tension force in a point 4 of the elevator with shallow scoops

Ширина ковша B_k , мм	Сила натягу при стрічці з $i = 3$ S_4 , Н	Сила натягу при стрічці з $i = 4$ S_4 , Н	Продуктивність елеватора, т/год
100	$32,1H + 0,5\alpha\beta(7,95+H)$	$34,3H + 0,5\alpha\beta(7,95+H)$	$0,5\alpha$
125	$33,4H + 0,66\alpha\beta(7,95+H)$	$36H + 0,66\alpha\beta(7,95+H)$	$0,66\alpha$
160	$41,5H + 1,17\alpha\beta(7,95+H)$	$44,9H + 1,17\alpha\beta(7,95+H)$	$1,17\alpha$
200	$61,9H + 1,87\alpha\beta(7,95+H)$	$66,2H + 1,87\alpha\beta(7,95+H)$	$1,87\alpha$
250	$79,1H + 3,5\alpha\beta(7,95+H)$	$84,3H + 3,5\alpha\beta(7,95+H)$	$3,5\alpha$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Продовження табл 4

Continuation of Table 4

Ширина ковша B_k , мм	Сила натягу при стрічці з $i = 3$ S_4 , Н	Сила натягу при стрічці з $i = 4$ S_4 , Н	Продуктивність елеватора, т/год
320	$138,1H + 5,4\alpha\beta(7,95 + H)$	$145H + 5,4\alpha\beta(7,95 + H)$	$5,4\alpha$
400	$246,1H + 8,4\alpha\beta(7,95 + H)$	$254,8H + 8,4\alpha\beta(7,95 + H)$	$8,4\alpha$

Закінчення табл. 4

End of Table 4

Ширина ковша B_k , мм	Сила натягу при стрічці з $i = 5$ S_4 , Н	Сила натягу при стрічці з $i = 6$ S_4 , Н	Продуктивність елеватора, т/год
100	$36,4H + 0,5\alpha\beta(7,95 + H)$	$38,6H + 0,5\alpha\beta(7,95 + H)$	$0,5\alpha$
125	$37,8H + 0,66\alpha\beta(7,95 + H)$	$40,4H + 0,66\alpha\beta(7,95 + H)$	$0,66\alpha$
160	$48,4H + 1,17\alpha\beta(7,95 + H)$	$51,8H + 1,17\alpha\beta(7,95 + H)$	$1,17\alpha$
200	$70,5H + 1,87\alpha\beta(7,95 + H)$	$74,8H + 1,87\alpha\beta(7,95 + H)$	$1,87\alpha$
250	$89,4H + 3,5\alpha\beta(7,95 + H)$	$94,6H + 3,5\alpha\beta(7,95 + H)$	$3,5\alpha$
320	$151,1H + 5,4\alpha\beta(7,95 + H)$	$158H + 5,4\alpha\beta(7,95 + H)$	$5,4\alpha$
400	$263,4H + 8,4\alpha\beta(7,95 + H)$	$272H + 8,4\alpha\beta(7,95 + H)$	$8,4\alpha$

В попередній роботі автора [6] побудовано параметричні залежності значення розрахункової потужності приводу стрічкового елеватора з глибокими та мілкими ковшами, які враховують тип вантажу, швидкість руху

стрічки, коефіцієнт заповнення ковша, висоту підйому вантажу та структуру стрічки (кількість прокладок). Такі залежності наведені в табл. 5, 6 для глибоких та мілких ковшів окремо.

Таблиця 5

Розрахункова потужність двигуна елеватора з глибокими ковшами

Table 5

Calculated power of elevator drive with deep scoops

Ширина ковша B_k , мм	Потужність двигуна при стрічці з $i = 3$ P , Вт	Потужність двигуна при стрічці з $i = 4$ P , Вт	Продуктивність елеватора, т/год
100	$(5,9H + \alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(6,3H + \alpha\beta(4 + 1,08H))v$	α
125	$(5,82H + 1,3\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(6,2H + 1,3\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$1,3\alpha$
160	$(7,63H + 2\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(8,2H + 2\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	2α
200	$(11,9H + 3,24\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(12,5H + 3,24\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$3,24\alpha$
250	$(16,6H + 5\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(17,4H + 5\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	5α
320	$(22,1H + 8\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(23,2H + 8\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	8α
400	$(42,5H + 12,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(43,9H + 12,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$12,6\alpha$
500	$(55,2H + 19\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(57H + 19\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	19α
650	$(70,1H + 28,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(72,3H + 28,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$28,6\alpha$
800	$(70,9H + 40\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(73,7H + 40\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	40α
1 000	$(83,9H + 56,3\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(87,2H + 56,3\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$56,25\alpha$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Закінчення табл. 5

End of Table 5

Ширина ковша B_k , мм	Потужність двигуна при стрічці з $i = 5$ P , Вт	Потужність двигуна при стрічці з $i = 6$ P , Вт	Продуктивність елеватора, т/год
100	$(6,6H + \alpha\beta(4+1,08H))v$	$(7H + \alpha\beta(4+1,08H))v$	α
125	$(6,7H + 1,3\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(7,1H + 1,3\alpha\beta(4+1,08H))v$	$1,3\alpha$
160	$(8,7H + 2\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(9,3H + 2\alpha\beta(4+1,08H))v$	2α
200	$(13,2H + 3,24\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(13,9H + 3,24\alpha\beta(4+1,08H))v$	$3,24\alpha$
250	$(18,2H + 5\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(19,1H + 5\alpha\beta(4+1,08H))v$	5α
320	$(24,2H + 8\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(25,3H + 8\alpha\beta(4+1,08H))v$	8α
400	$(45,3H + 12,6\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(46,7H + 12,6\alpha\beta(4+1,08H))v$	$12,6\alpha$
500	$(58,8H + 19\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(60,6H + 19\alpha\beta(4+1,08H))v$	19α
650	$(74,5H + 28,6\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(76,7H + 28,6\alpha\beta(4+1,08H))v$	$28,6\alpha$
800	$(76,4H + 40\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(79,2H + 40\alpha\beta(4+1,08H))v$	40α
1 000	$(90,6H + 56,3\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(93,9H + 56,3\alpha\beta(4+1,08H))v$	$56,25\alpha$

Таблица 6

Розрахункова потужність двигуна елеватора з мілкими ковшами

Table 6

Calculated power of elevator drive with shallow scoops

Ширина ковша B_k , мм	Потужність двигуна при стрічці з $i = 3$ P , Вт	Потужність двигуна при стрічці з $i = 4$ P , Вт	Продуктивність елеватора, т/год
100	$(5,1H + \alpha\beta(4+1,08H))v$	$(5,5H + \alpha\beta(4+1,08H))v$	$0,5\alpha$
125	$(5,3H + 1,3\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(5,8H + 1,3\alpha\beta(4+1,08H))v$	$0,66\alpha$
160	$(6,6H + 2\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(7,2H + 2\alpha\beta(4+1,08H))v$	$1,17\alpha$
200	$(9,9H + 3,24\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(10,6H + 3,24\alpha\beta(4+1,08H))v$	$1,87\alpha$
250	$(12,7H + 5\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(13,5H + 5\alpha\beta(4+1,08H))v$	$3,5\alpha$
320	$(22,1H + 8\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(23,2H + 8\alpha\beta(4+1,08H))v$	$5,4\alpha$
400	$(39,4H + 12,6\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(40,8H + 12,6\alpha\beta(4+1,08H))v$	$8,4\alpha$

Закінчення табл. 6

End of Table 6

Ширина ковша B_k , мм	Потужність двигуна при стрічці з $i = 5$ P , Вт	Потужність двигуна при стрічці з $i = 6$ P , Вт	Продуктивність елеватора, т/год
100	$(5,8H + \alpha\beta(4+1,08H))v$	$(6,2H + \alpha\beta(4+1,08H))v$	$0,5\alpha$
125	$(6,0H + 1,3\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(6,5H + 1,3\alpha\beta(4+1,08H))v$	$0,66\alpha$
160	$(7,7H + 2\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(8,3H + 2\alpha\beta(4+1,08H))v$	$1,17\alpha$
200	$(11,3H + 3,24\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(12H + 3,24\alpha\beta(4+1,08H))v$	$1,87\alpha$
250	$(14,3H + 5\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(15,1H + 5\alpha\beta(4+1,08H))v$	$3,5\alpha$
320	$(24,2H + 8\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(25,3H + 8\alpha\beta(4+1,08H))v$	$5,4\alpha$
400	$(42,1H + 12,6\alpha\beta(4+1,08H))v$	$(43,5H + 12,6\alpha\beta(4+1,08H))v$	$8,4\alpha$

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Отже, алгоритм визначення потужності приводу елеватора при заданих продуктивності Π , висоти підйому H , типу вантажу має такий вигляд:

1. За табл. 1 обираємо вид ковша (глибокий або мілкий) для визначеного вантажу.

2. За табл. 2 обираємо величину коефіцієнта $\alpha\beta$ та рекомендовану швидкість руху стрічки v .

3. За формулою (1) розраховуємо величину діаметра привідного барабана елеватора D та обираємо його значення зі стандартного ряду.

4. За формулою (2) розраховуємо необхідну кількість прокладок стрічки.

5. За табл. 3, 4 (залежно від конфігурації ковша, величини α (див. табл. 2) та кількості прокладок стрічки) розраховуємо для зазначеної величини продуктивності значення зусилля S_4 .

6. За отриманим значенням S_4 перевіряємо на міцність стрічку з обраною кількістю прокладок за формулою (5) (у разі потреби уточнюємо кількість прокладок, перераховуємо величину S_4 та знову перевіряємо кількість прокладок стрічки).

7. За табл. 5, 6 (залежно від конфігурації ковша, величини α (див. табл. 2) та кількості прокладок стрічки) обираємо тип параметричної залежності розрахункової потужності.

8. За обраною залежністю будуємо графічну залежність розрахункової потужності від висоти підйому вантажу $P = f(H)$.

9. Підставивши задану висоту підйому вантажу в отриману залежність $P = f(H)$, розраховуємо орієнтовне значення необхідної потужності приводу елеватора.

10. При фіксованій величині висоти підйому вантажу H визначаємо залежність значення потужності приводу від продуктивності та будуємо її графічне зображення.

Результати

Розглянемо методику побудови залежності потужності від основних параметрів (продуктивності, висоти підйому та типу вантажу) для розрахунку елеватора на прикладі:

- вантаж – цемент;
- продуктивність $\Pi = 75$ т/год;
- висота підйому $H = 10$ м.

За запропонованим вище алгоритмом виконаємо розрахунок:

1. За табл. 1 обираємо вид ковша для транспортування цементу – глибокий.

2. За табл. 2 для цементу обираємо:

– величину коефіцієнта $\alpha\beta = 10,98$ Н/м³;

– рекомендовану швидкість руху стрічки $v = 1,5$ м/с;

– величину коефіцієнта $\alpha = 6,05$ т·м/л·год.

3. За формулою (1) розраховуємо величину діаметра привідного барабана елеватора D :

$$D \leq 0,204v^2 = 0,204 \cdot 1,5^2 = 0,459 \text{ м.}$$

За розрахованим значенням обираємо стандартне значення діаметра барабана $D = 0,5$ м.

4. За формулою (2) розраховуємо необхідну кількість прокладок стрічки:

$$i = \frac{D}{125 \dots 150} = \frac{500}{125 \dots 150} = 4 \dots 3,33.$$

Приймаємо необхідну кількість прокладок стрічки $i = 4$.

5. Оскільки для транспортування цементу використовується елеватор з глибокими ковшами та стрічкою з чотирма прокладками (див. п. 4), то при фіксованому α табл. 3 буде мати нижченаведений вигляд (табл. 7):

Таблиця 7

Сила натягу в точці 4 елеватора з глибокими ковшами при транспортуванні цементу

Table 7

Tension force in a point 4 of elevator with deep scoops at transporting of cement

Ширина ковша B_k , мм	Сила натягу при стрічці з $i = 3$ S_4 , Н	Сила натягу при стрічці з $i = 4$ S_4 , Н	Продуктивність елеватора, т/год
100	$37H + \alpha\beta(7,95 + H)$	$39,2H + \alpha\beta(7,95 + H)$	6,05
125	$36,4H + 1,3\alpha\beta(7,95 + H)$	$39H + 1,3\alpha\beta(7,95 + H)$	7,87
160	$47,7H + 2\alpha\beta(7,95 + H)$	$51,1H + 2\alpha\beta(7,95 + H)$	12,1
200	$74,1H + 3,24\alpha\beta(7,95 + H)$	$78,4H + 3,24\alpha\beta(7,95 + H)$	19,6

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Закінчення табл. 7

End of Table 7

Ширина ковша B_k , мм	Сила натягу при стрічці з $i = 3$ S_4 , Н	Сила натягу при стрічці з $i = 4$ S_4 , Н	Продуктивність елеватора, т/год
250	$103,6H + 5\alpha\beta(7,95 + H)$	$108,8H + 5\alpha\beta(7,95 + H)$	30,25
320	$138,1H + 8\alpha\beta(7,95 + H)$	$145H + 8\alpha\beta(7,95 + H)$	48,4
400	$265,7H + 12,6\alpha\beta(7,95 + H)$	$274,4H + 12,6\alpha\beta(7,95 + H)$	76,2
500	$345,2H + 19\alpha\beta(7,95 + H)$	$356,4H + 19\alpha\beta(7,95 + H)$	115
650	$438H + 28,6\alpha\beta(7,95 + H)$	$451,8H + 28,6\alpha\beta(7,95 + H)$	173
800	$443,3H + 40\alpha\beta(7,95 + H)$	$460,5H + 40\alpha\beta(7,95 + H)$	242
1 000	$524,6H + 56,3\alpha\beta(7,95 + H)$	$545,3H + 56,3\alpha\beta(7,95 + H)$	340,3

Оскільки проектна продуктивність $P = 75$ т/год, тоді за табл. 7 обираємо залежність, що знаходиться у 3-ому стовбці та 7-ому рядку, тобто відповідає ширині ковша 400 мм (ширина стрічки 500мм):

$$S_4 = 274,4H + 12,6\alpha\beta(7,95 + H) =$$

$$= 274,4 \cdot 10 + 12,6 \cdot 10,98(7,95 + 10) = 5186,6 \text{ Н.}$$

6. За отриманим значенням S_4 перевіряємо на міцність стрічку з обраною кількістю прокладок за формулою (5):

$$i = \frac{n_c S_4}{B \sigma_p k_0} = \frac{11 \cdot 5186,6}{0,5 \cdot 54 \cdot 10^3 \cdot 0,7} = 3,02.$$

Тобто обрана кількість ($i = 4$) прокладок задовольняє умові міцності стрічки.

7. Оскільки для транспортування цементу використовується елеватор з глибокими ковшами та стрічкою з чотирма прокладками (див. п. 7), то при фіксованому α табл. 5 буде мати нижченаведений вигляд (табл. 8):

Таблица 8

Розрахункова потужність двигуна елеватора з глибокими ковшами при транспортуванні цементу

Table 8

Calculated power of elevator drive with deep scoops at transporting of cement

Ширина ковша B_k , мм	Потужність двигуна при стрічці з $i = 3$ P , Вт	Потужність двигуна при стрічці з $i = 4$ P , Вт	Продуктивність елеватора, т/год
100	$(5,9H + \alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(6,3H + \alpha\beta(4 + 1,08H))v$	6,05
125	$(5,82H + 1,3\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(6,2H + 1,3\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	7,87
160	$(7,63H + 2\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(8,2H + 2\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	12,1
200	$(11,9H + 3,24\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(12,5H + 3,24\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	19,6
250	$(16,6H + 5\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(17,4H + 5\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	30,25
320	$(22,1H + 8\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(23,2H + 8\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	48,4
400	$(42,5H + 12,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(43,9H + 12,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	76,2
500	$(55,2H + 19\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(57H + 19\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	115
650	$(70,1H + 28,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(72,3H + 28,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	173
800	$(70,9H + 40\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(73,7H + 40\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	242
1 000	$(83,9H + 56,3\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	$(87,2H + 56,3\alpha\beta(4 + 1,08H))v$	340,3

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Оскільки проектна продуктивність $\Pi = 75$ т/год, то за табл. 8 обираємо залежність, що знаходиться у 3 стовбці 7 рядка, тобто відповідає ширині ковша 400 мм (ширина стрічки 500мм):

$$P = (43,9H + 12,6\alpha\beta(4 + 1,08H))v. \quad (6)$$

8. За залежністю (6) будемо графічну залежність розрахункової потужності від висоти підйому вантажу $P = f(H)$.

При $\alpha\beta = 10,98$ Н/м³ та $v = 1,5$ м/с, маємо залежність:

$$P = (43,9H + 12,6 \cdot 10,98(4 + 1,08H)) \cdot 1,5 = 289,97H + 830,1. \quad (7)$$

Графічна залежність значення потужності приводу елеватора під час транспортування цементу з проектною продуктивністю $\Pi = 75$ т/год від висоти підйому зображена на рис. 3.

9. Підставивши задану висоту підйому вантажу в отриману залежність $P = f(H)$ розраховуємо орієнтовне значення необхідної потужності приводу елеватора:

$$P = 289,97 \cdot 10 + 830,1 = 3729,8 \approx 3,7 \text{ кВт}.$$

10. При фіксованій величині висоти підйому вантажу $H = 10$ м залежність значення потужності приводу від продуктивності має вигляд (рис. 3):

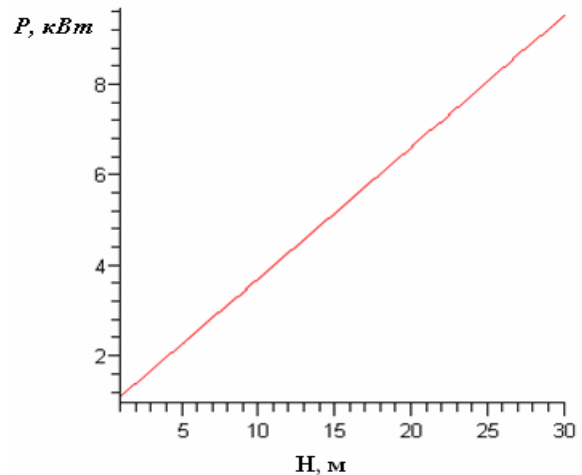


Рис. 3. Графічна залежність потужності приводу елеватора від висоти підйому

Fig. 3. Graphic dependence of power of elevator drive on the rise height

Таблиця 9

Залежність величини потужності двигуна елеватора від висоти підйому під час транспортування цементу

Table 9

Size dependence of power of the elevator drive on the rise height at transporting of cement

Ширина ковша B_K , мм	Потужність двигуна при стрічці з $i = 4$ P , Вт	Продуктивність елеватора, т/год
100	338,3	6,05
125	409,9	7,87
160	610,5	12,1
200	977,3	19,6
250	1 479,8	30,25
320	2 298	48,4
400	3 729,8	76,2
500	5 486,3	115
650	8 055,8	173
800	10 855,5	242
1 000	15 032,1	340,3

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Використовуючи дані табл. 9, побудуємо графічне зображення такої залежності.

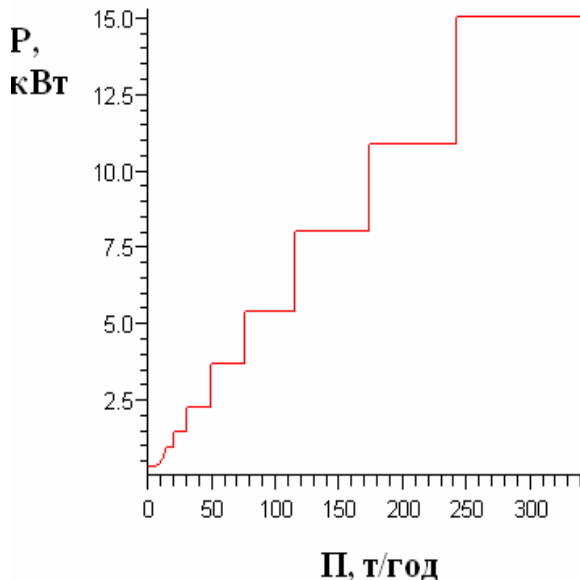


Рис. 4. Графічна залежність значення потужності приводу елеватора від продуктивності

Fig. 4. Graphic dependence of power of the elevator drive on the productivity

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано удосконалений алгоритм визначення потужності приводу швидкохідних ковшових стрічкових елеваторів з глибокими та мілкими ковшами.

Використання запропонованого алгоритму розрахунку дає можливість відносно швидко визначити орієнтовне значення потужності приводу вертикальних швидкохідних елеваторів з глибокими та мілкими ковшами та побудувати графічні залежності потужності приводу від значень продуктивності та висоти підйому у конкретному типі вантажу, що сприяє якісному підбору його основних елементів з урахуванням конкретних проектних характеристик: тип вантажу, продуктивність, висота підйому.

Висновки

Для швидкохідних ківшевих стрічкових елеваторів побудовано алгоритм прискореного розрахунку орієнтовного значення потужності

приводу від його проектних характеристик, що дає можливість досить швидкого отримання значення потужності приводу із врахуванням типу та фізико-механічних властивостей вантажів, величини висоти підйому та проектної продуктивності. Для прикладу залучення отриманих в роботі результатів розглянуто алгоритм визначення величини потужності приводу елеватора, призначеного для транспортування цементу. Для такого елеватора також побудовано графічні залежності потужності приводу від проектної продуктивності та висоти підйому вантажу. Встановлено, що функція зміни величини потужності елеватора від проектної продуктивності (при фіксованих висоті підйому, типу вантажу, швидкості руху стрічки) є кусково-сталою та монотонно зростаючою, а від висоти підйому (при фіксованих продуктивності, типу вантажу, швидкості руху стрічки) – лінійною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров, М. П. Подъемно-транспортные машины : учебник / М. П. Александров. – Москва : Высш. шк., 2000. – 522 с.
2. Богомаз, В. М. Дослідження впливу проектної продуктивності елеватору на потужність його приводу / В. М. Богомаз, К. Ц. Главацький, О. А. Мазур // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2015. – № 2 (56). – С. 189–206. doi: 10.15802/stp-2015/42178.
3. Зенков, Р. Л. Машины непрерывного транспорта : учебн. / Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, Л. Н. Колобов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 432 с.
4. Иванченко, Ф. К. Подъемно-транспортные машины : учебник / Ф. К. Иванченко. – Киев : Вища шк., 1993. – 413 с.
5. Катрюк, И. С. Машины непрерывного транспорта. Конструкции, проектирование и эксплуатация : учеб. пособие / И. С. Катрюк, Е. В. Мусияченко. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 266 с.
6. Кузьмин, А. В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин : учеб. пособие / А. В. Кузьмин. – Минск : Вышэйш. школа, 1983. – 350 с.
7. Підйомно-транспортні машини: розрахунки підймальних і транспортувальних машин : підручник / В. С. Бондарев, О. І. Дубинець, М. П. Колісник [та ін.]. – Київ : Вища шк., 2009. – 734 с.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

8. Ракша, С. В. Аналіз впливу пружних деформацій несучого каната на зусилля в тяговому канаті підвісної дороги / С. В. Ракша, Ю. К. Горячов, О. С. Куроп'ятник // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2013. – № 6 (48). – С. 110–119. doi: 10.15802/stp2013/19686.
9. Расчет и проектирование транспортных средств непрерывного действия : науч. пособие для вузов / А. И. Барышев, В. А. Будишевский, А. А. Сулима, А. М. Ткачук. – Донецк : Норд-Пресс, 2005. – 689 с.
10. Ромакин, Н. Е. Машины непрерывного транспорта : учеб. пособие / Н. Е. Ромакин. – Москва : Академия, 2008. – 432 с.
11. Jamaludin, J. Development of a self-tuning fuzzy logic controller for intelligent control of elevator systems / J. Jamaludin, N. A. Rahim, W. P. Hew // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2009. – Vol. 22. – Iss. 8. – P. 1–12. doi: 10.1016/j.engappai.2009.04.006.
12. Kim, C. S. Nonlinear robust control of a hydraulic elevator: experiment-based modeling and two-stage Lyapunov redesign / C. S. Kim, K. S. Hong, M. K. Kim // Control Engineering Practice. – 2005. – Vol. 13. – Iss. 6. – P. 789–803. doi: 10.1016/j.conengprac.2004.09.003.
13. Strakosch, G. R. The Vertical Transportation Handbook / G. R. Strakosch, R. S. Caporale. – New York : John Wiley&Sons, 2010. – 610 p. doi: 10.1002/9780470949818.

В. Н. БОГОМАЗ^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, эл. почта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕВАТОРА НА ПАРАМЕТРЫ ЕГО ПРИВОДА

Цель. Привод относится к основным элементам ленточных ковшевых элеваторов. Для определения мощности привода проводятся расчеты по стандартным методикам, что требует достаточно больших затрат времени. В работе необходимо провести анализ влияния проектных характеристик на параметры привода быстроходных ковшевых ленточных элеваторов и построить усовершенствованный алгоритм ускоренного определения мощности его привода по проектным характеристикам. Этот алгоритм будет учитывать тип груза, высоту подъема, необходимую производительность, стандартные параметры ковшей и ленты. **Методика.** Используя параметрические зависимости мощности привода элеваторов от его проектных характеристик (полученных автором ранее), предложен усовершенствованный алгоритм ускоренного определения мощности привода быстроходных элеваторов с глубокими и мелкими ковшами при заданных типах груза, производительности, высоте подъема. **Результаты.** Предложен алгоритм ускоренного определения мощности привода быстроходных вертикальных элеваторов с глубокими и мелкими ковшами в зависимости от проектных параметров. Рассмотрен пример применения такого алгоритма для элеватора, предназначенного для транспортировки цемента. Определены аналитические зависимости мощности привода такого элеватора от производительности и высоты подъема. Построены соответствующие графические зависимости и установлен характер изменения мощности привода при изменении величины каждой из проектных характеристик. **Научная новизна.** Впервые построен усовершенствованный алгоритм определения мощности привода элеватора при заданных проектных характеристиках (типе груза, высоте подъема, производительности), который учитывает стандартные размеры, параметры ковшей и лент. **Практическая значимость.** Использование предложенного алгоритма расчета предоставляет возможность относительно быстрого определения ориентировочного значения мощности привода быстроходных элеваторов с глубокими и мелкими ковшами. Также возможным является построение графических зависимостей мощности привода от значений производительности и высоты подъема при конкретном типе груза, что способствует качественному подбору его основных элементов для конкретных проектных характеристик. Такой алгоритм дает возможность значительно экономить время на расчеты в процессе проектирования элементов элеваторов.

Ключевые слова: элеватор; ковш; привод; мощность; производительность; груз; высота подъема; алгоритм

V. M. BOHOMAZ^{1*}

^{1*}Dep. «Applied Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

INFLUENCE ANALYSES OF DESIGNED CHARACTERISTICS OF THE ELEVATOR TO THE PARAMETERS OF ITS DRIVE

Purpose. A drive behaves to the basic elements of scoop band elevators. To determine the drive power calculations are carried out according to standard methods, which take plenty of time. It is necessary to conduct the analysis of influence of project characteristics on the parameters of high-speed drive in a scoop bent elevator and to build the improved algorithm of speed-up determination of its drive power on project descriptions, that will take into account the type of load, rise height, necessary productivity, standard parameters of scoops and tape. **Methodology.** Using parametric dependences of elevators drive power on its project characteristics, received by the author earlier, the improved algorithm of speed-up determination of elevators high-speed drive power with deep and shallow scoops at set type of load, productivity, rise height was offered. **Findings.** The algorithm of drive power speed-up determination of high-speed vertical elevators with deep and shallow scoops depending on project parameters was offered. The example of such algorithm application is considered for an elevator that is intended for transporting of cement. Analytical dependences of drive power of such elevator are determined on the productivity and rise height. Corresponding graphic dependences were built and character of drive power changes during the size changing of any project characteristics was determined. **Originality.** The improved algorithm of drive power elevator determination at the given project characteristics (type of load, rise height, productivity) that takes into account standard sizes, parameters of scoops and ribbons, was built at first time. **Practical value.** The use of an offered algorithm of calculation gives the possibility of relatively fast determination of reference value of high-speed elevators drive power with deep and shallow scoops, to build graphic dependences of drive power on the values of the productivity and rise height at the certain type of load, that assists the quality selection of his basic elements at certain project descriptions, such algorithm gives an opportunity to save time on calculations in the process of elevators planning.

Keywords: elevator; scoop; drive; power; productivity; load; height of rising; algorithm

REFERENCES

1. Aleksandrov M.P. *Podemno-transportnyye mashiny* [Lifting-transport machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 522 p.
2. Bohomaz V.M., Hlavatskyi K.Ts., Mazur O.A. Doslidzhennia vplyvu proektnoi produktyvnosti elevatoru na potuzhnist yoho pryvodu [Research of influencing of project descriptions of elevator on parameters of its drive]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2015, no. 2 (56), pp. 189–206. doi: 10.15802/stp2015/42178.
3. Zenkov R.L., Ivashkov I.I., Kolobov L.N. *Mashiny nepreryvnogo transporta* [Continuous transport]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1987. 432 p.
4. Ivanchenko F.K. *Pidiomno-transportni mashyny* [Lifting-transport machines]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 1993. 413 p.
5. Katryuk I.S., Musiyachenko Ye.V. *Mashiny nepreryvnogo transporta. Konstruktsii, proektirovaniye i ekspluatatsiya* [Continuous vehicles. Construction, design and operation]. Krasnoyarsk, Izdatelsko-poligraficheskiiy tsentr Krasnoyarskiy Gosudarstvennyi Tekhnicheskiiy Uuniversitet Publ., 2006. 266 p.
6. Kuzmin A.V. *Spravochnik po raschetam mekhanizmov podemno-transportnykh mashin* [Guide to calculations of the mechanisms of lifting-transport machines]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1983. 350 p.
7. Bondariev V.S., Dubynets O.I., Kolisnyk M.P. *Pidiomno-transportni mashyny: rozrakhunky pidiimalnykh i transportuvalnykh mashyn* [Lifting-transport machines: calculations of lifting and transportation machines]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 2009. 734 p.
8. Raksha S.V., Horiachov Yu.K., Kuropiatnyk O.S. Analiz vplyvu pruzhnykh deformatsii nesuchoho kanata na zusyillia v tiahovomu kanati pidvisnoi dorohy [Influence analysis of elastic deformations of the track cable on efforts in the hauling rope of aerial ropeway]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dni-*

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

- propetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 6 (48), pp. 110-119. doi: 10.15802/stp2013/19686.
9. Baryshev A.I., Budishevskiy V.A., Sulima A.A., Tkachuk A.M. *Raschet i proyektirovaniye transportnykh sredstv nepreryvnogo deystviya* [Calculation and design of continuous action vehicles]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2005. 689 p.
10. Romakin N.Ye. *Mashiny nepreryvnogo transporta* [Continuous vehicles]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 432 p.
11. Jamaludin J., Rahim N.A., Hew W.P. Development of a self-tuning fuzzy logic controller for intelligent control of elevator systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, vol. 22, issue 8, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.engappai.2009.04.006.
12. Kim C.S., Hong K.S., Kim M.K. Nonlinear robust control of a hydraulic elevator: experiment-based modeling and two-stage Lyapunov redesign. *Control Engineering Practice*, 2005, vol. 13, issue 6, pp. 789-803. doi: 10.1016/j.conengprac.2004.09.003.
13. Strakosch G.R., Caporale R.S. *The Vertical Transportation Handbook*. New York, John Wiley&Sons Publ., 2010. 610 p. doi: 10.1002/9780470949818.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С. В. Ракишою (Україна);
д.т.н., проф. В. Г. Заренбіним (Україна)*

Надійшла до редколегії 11.02.2015

Прийнята до друку 21.04.2015

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

UDC 629.424.3.016.2:621.436.12-53

М. І. КАПИТА¹, М. І. МАРТЫШЕВСЬКИЙ², Д. Н. КИСЛИЙ^{3*}, І. І. ПАЛІЙ⁴

¹Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, e-mail m.i.kapica@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

²Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, e-mail sosnovka49@gmail.com, ORCID 0000-0003-4330-4322

^{3*}Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 625 18 59, e-mail dmitriy.kisliy@gmail.com, ORCID 0000-0002-4427-894X

⁴Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 320 94 15, e-mail Paliy_igor@mail.ru, ORCID 0000-0001-7368-9097

TECHNICAL AND ENERGY PARAMETERS IMPROVEMENT OF DIESEL LOCOMOTIVES THROUGH THE INTRODUCTION OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF A DIESEL

Purpose. Today the issue, connected with diesel traction remains relevant for the majority of industrial enterprises and Ukrainian railways and diesel engine continues to be the subject of extensive research and improvements. Despite the intensive process of electrification, which accompanies Railway Transport of Ukraine the last few years, diesel traction continues to play an important role both in the main and in the industrial railway traction rolling stock. Anyway, all kinds of maneuvering and chores are for locomotives, they are improved and upgraded relentlessly and hourly. This paper is focused on finding the opportunities to improve technical and energy parameters of diesels due to the development of modern control method of the fuel equipment in the diesel engine. **Methodology.** The proposed method increases the power of locomotives diesel engines in the range of crankshaft rotation (from idle running to maximum one). It was based on approach of mixture ignition timing up to the top «dead» center of piston position. **Findings.** The paper provides a brief historical background of research in the area of operating cycle in the internal combustion engine (ICE). The factors affecting the process of mixing and its quality were analyzed. The requirements for fuel feed system in to the cylinder and the «weak points» of the process were presented. A variant of the modification the fuel pump drive, which allows approaching to the regulation of fuel feed system from the other hand and to improve it was proposed. Represents a variant of embodiment of the complex system with specification of mechanical features and control circuits. The algorithm of the system operation was presented and its impact on the performance of diesel was made. **Originality.** The angle regulating system of fuel supply allows automating the process of fuel injection advance angle into the cylinder. **Practical value.** At implementation the angle regulating system of fuel supply components of the diesel engine remain unchanged. It allows installing the system on diesel engines of the existing fleet of locomotives and railroad industries. The system, considered in the modeling process, has demonstrated its desirability and feasibility of practical application for diesel engines.

Keywords: fuel; injection; combustion; camshaft; spline; stepper motor

Introduction

Last years in Ukraine despite the intensive process of electrification that accompanies railway transport, diesel traction continues to play an important role both in the main and industrial railway traction rolling stock [9]. Anyway, all kinds of maneuvering and chores are for locomotives, they are improved and upgraded relentlessly and hourly.

It's no a secret that the internal combustion engine is fairly long technical design. The first functional prototype was built by R. Diesel back in 1897, and the first application on the locomotive he found in 1925 year [1, 7]. As the level of science and technology is growing with impressive rapidity, it is logical that a century-old technology requires significant improvements to meet the demands at this time. As a rule, the majority of research and developments in the field of internal combustion engines is dedicated to power improvement increasing, reducing the weight and overall dimensions and lengthening the service life of machinery parts. Recently, against the background of semiconductor and computer technology development, works in the field of engine control automation have increased very significantly.

Serious research on working cycle optimizing and the design of engines were conducted in the days of tsarist Russia. Already in 1906 year V. I. Hrynevetskyi proposed a thermal calculation method of an operating cycle, the basis for the contemporary theory of processes of reciprocating internal combustion engines. Further it was developed by N. R. Brilinh, Ye. K. Masinh, B. S. Stechkin, A. S. Orlyn, N. M. Hlaholev, M. H. Kruhlov and others. In 1911 year a deep theoretical development of diesel locomotive manufacturing problems was started by V. I. Hrynevetskyi and A. N. Shelest.

Naturally, the theory of operational process gives us some concepts and ideas about operations occurring in the cylinder, and this issue has not been studied and disclosed completely, in a certain sense remains a «mystery». Air supply and fuel combustion processes play a significant role that modern engineering tries to make utmost as much complete and energy saving as possible.

For a complete fuel and air mixing, filling the combustion chamber, it is necessary to provide such kinetic energy with dropwise at which they

will not be concentrated near the injection spray nozzle, but won't reach neither the walls of cylinder cover nor piston bottom [10]. Drops of fuel mass are concentrated in the vicinity of the nozzle and due to the lack of oxygen are not burnt completely. With the weight drops increase its range capability is growing. It can lead to the fuel ingress on the cooled walls of a cylinder or excessively heated piston bottom. In the first case, the fuel does not burn and mixes with oil, in the second one it evaporates quickly when the lack of oxygen. As the result there is a coke.

Thus for perfect fuel combustion in diesel engines, it is necessary to generate fuel contact with air in the cylinder center and obtain simultaneously a sufficient velocity of the fuel particles relative to air. The latter condition is necessary in order that combustion products, formed near the fuel particles, have to be replaced rapidly by air. That is why in diesel engines for good performances of combustion, air surplus is introduced, compared with theoretically calculated one. The value of the air surplus coefficient typically is in the range of 1.5...2.0 [1, 7]. In addition, the transition to a modification of cylinder covers with vortex chambers could enhance the expected effect significantly.

It's not a secret that the effective operation of diesel depends both on timely full air supply and correct fuel supply to the cylinder. Obviously, it means rational injection taking into account dispersion of fuel particles and the process velocity and timely fuel supply to the nozzle. Requirements are as following [2]:

- a) fuel supply about 5...30° till t.d.c. (top dead center), (depending on a diesel);
- b) injection duration not less than 20...45° of the crank spin;
- c) cyclic fuel supply should meet the speed range and load operation mode of the diesel [9].

Currently there is no system on the locomotive ICE that made it possible to control parameters such as the law of supply and the real advance angle of fuel supply.

The first is determined by the profile of the camshaft lobe, throat area of an injector nozzle and some other design parameters. The second indicator is measured in degrees of crankshaft rotation from the start of the diesel fuel injection to t.d.c. and it is a little leeway, which gives fuel to

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

form a mixture of work and fully erupt in a matter of a second. Such procedure is necessary due to the fact that the processes time in the cylinder is extremely small, and for ignition of fuel this time, anyway required.

It is obvious that setting fuel injection advance angle is a static index, which can not be corrected during the diesel operation [8, 10]. And this is connected primarily with the following act: a camshaft lobe moves to the roller-pusher of a fuel pump at the same time. At this, it should be remembered that the rate of operating cycles with speed-up increases and the time required for fuel to realize the above mentioned reactions is not changed. At first sight, the problem can be solved by setting the highest possible fuel injection advance angle but it is not its decision. Insufficient angle on high positions leads to incomplete combustion of fuel, which tends to flow along the walls of the cylinder bushing, to thin out the oil and cause a dry or semi-dry friction with all consequences that entails. Excessive angle at low positions leads to increased detonation phenomena during the power stroke and the diesel knock. It is not useful for the crank mechanism and valves, as leads to increased tension in them [8, 10].

Unfortunately, in today's constructive building of locomotive diesel engines, this possibility directly tied to changes in design of fuel injection pump linkage [3, 6].

Purpose

Search enhancement the technical and energy parameters of locomotives through the modern methods introduction of diesel fuel equipment.

Methodology

However, let us consider the alternate solution of this question with a possible design system execution that offers a complete combination of two subsystems: the mechanical (executive) and electricity (controlling).

Mechanical part of the automated control system of fuel injection advance angle (further – SAC FIAA) is a set of devices, which form a single chain (Fig. 1). The most characteristic feature is that the solid camshaft of fuel injection pump linkage that is substituted on combined one, consists of two components: an external cam shaft 1 and inner splined shaft 2. The camshaft is hollow and has

interior straight-sided splines, whereby the inner shaft is movable in it in the axial direction in both sides (like a cardan shaft). Internal splined shaft is double and consists of two shafts of the same diameter, connected from the face with friction clutch. The part that engages with the camshaft has the usual straight-sided splines, and the other one has splines that are cut at an angle. They mesh with the same oblique splines of a driven gear 3 in the camshaft, which are cut on the inner surface of the slot in its hub.

It is thus evident, the oil-pump drive gear, unlike the classic design, floating motionless. Since at the axial movement of the internal shaft, friction forces are arising between the splines that are trying to shift a gear up and disengaged, split locking bushing 4 is set, which prevents this undesirable effect. The bushing is attached to the block of a diesel engine and has a layer of antifriction material spraying on the internal operating surfaces in order to mitigate friction between it and the gear. The inner splined shaft is ended with a pivot to set a bearing 5. There is a conical roller thrust and radial bearing, as at operation it perceives axial loads mainly. With the outer ring the bearing is pressed into a special cage 6, which is performed together with the tooth rack 7 and forms with it a single link mechanism. The tooth rack is meshed with the toothed wheel 8, which has involute tooth profile (like a rack itself). This wheel is located on the same shaft 9 with the wormwheel 10, which is actuates by a cylindrical worm 11 and spindled on the motor shaft 12. This is control element of the entire system and operates in the «start-stop» mode.

The electric motor that controls operation of the circuit is not an ordinary one. In our case, the stepping motor is used, which is widely used in automatic control systems, particularly in CNC (computer numerical control) machines. On the engine column top there is a synchro transmitter 13, which is connected with the motor by means of a belt driving 14, the gear ratio is 1: 1. This electric machine is used in the electrical subsystem as a part of the sensor feedback.

In the dynamic state the system operates as follows. When switching the controller of a driver to the next position, the crankshaft rotation frequency of the the diesel engine increases.

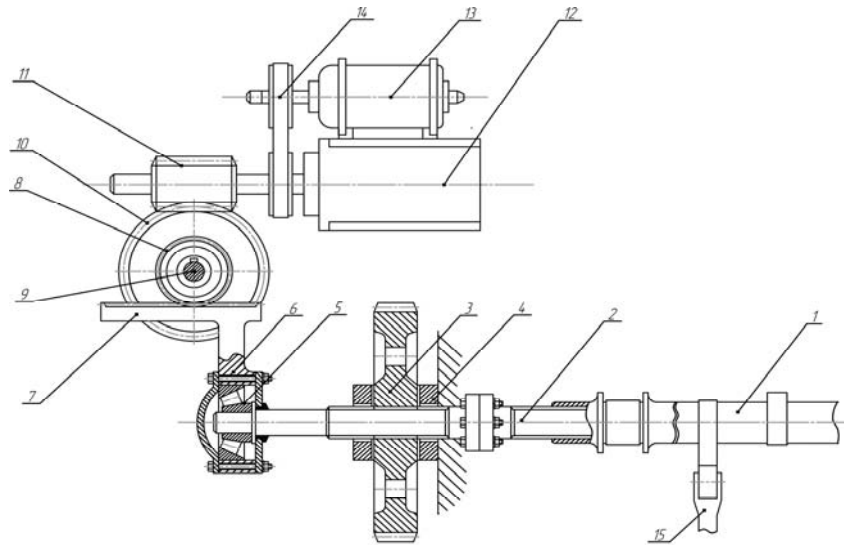


Fig. 1. General view of mechanical subsystems of the automated control of the fuel injection advance angle

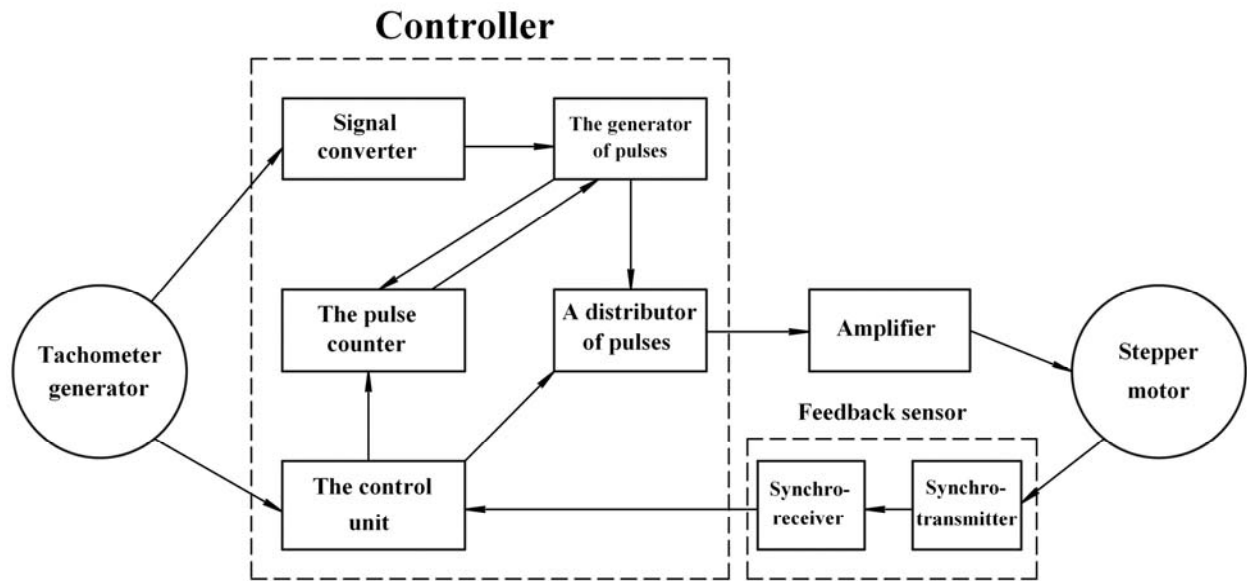
The stepper motor (SM) receives a signal from the control system and returns through the worm, wormwheel and therefore the tooth one with it. Tooth wheel causes linear movement of the tooth rack, and hence the internal splined shaft. Passing through oblique splines in the driven gear at a certain fixed distance, the shaft is rotated together with the camshaft at a specific angle in the direction of the cam climbing delay against the fuel-pump tappet 15 and thereby increases the lead angle of the fuel supply for a certain amount. The entire process takes place directly during rotation of the composite shaft and does not affect its performance adversely. With decreasing the position of a driver's controller, the system begins to operate in a similar manner, but with the difference that the SM runs backwards. The motor shaft together with the worm begins to rotate in the opposite direction and the combined shaft will rotate to a certain angle in the direction of acceleration of cam climbing on the fuel-pump tappet.

Special focus is on electrical part of the system (Fig.2). The complex of electrical and electronic devices is aimed at operation management of the above mentioned SM. The first element in the circuit is dynamoelectric engine speed sensor namely this is a tachometer generator (TG), the shaft of which is mechanically connected to the crankshaft of a diesel engine and realizes an electric signal proportional to the diesel speed.

The generated voltage is supplied to the

electronic controller, which is a series of semiconductor devices: signal converter (SC), the generator (former) of pulses (GI), a distributor of pulses (DI), the pulse counter (PC), the control unit (CU). After the conversion, tachometer voltage is supplied through the transistor amplifier (TA) to SM power supply. Feedback is provided in the circuit with pair of synchros working in transformer mode.

Now having understood the structure of the system, one can determine the algorithm of its operation. When switching the position of the driver's controller to the next one, crankshaft diesel speed increases, and with it – the TG shaft. The voltage on its terminals increases, and then the controller comes into action. SC converts the received voltage into a pulse form and transmits it to the GI, which brings the number of pulses and their amplitude to the value that is necessary for SM power supply. Further, the voltage pulses are transmitted to the DI, which acts as a switch windings, and then – on the TA. After amplification, the pulses fall at last in winding phase of SM. One pulse causes the angular displacement of the rotor by one step. For the rotor cranking at a certain angle, one needs a sequence of pulses, which is determined by the number of switching intervals (the position of the driver's controller) with the output angle of the shaft in the SM in one step and with the parameters of mechanical subsystem SAC FIAA.

Fig. 2. Management subsystems of the automated control
of the fuel injection advance angle

For the research was chosen a diesel K6S310DR, locomotive CHME3. The diesel is four-stroke, six-cylinder with turbocharging air. The simulation [11] in the software package Diesel RK, has shown that a reduction of FIAA to value lower 16° r.c.s. (crank-shaft roll) is unreasonable, since there is a significant power loss and fuel consumption increase, so the main calculations are performed in the range of $17...24^\circ$ r.c.s. (maximum value of 24 is recommended for this type of diesel engine) [13, 14]. The calculation results are shown in Table 1 and Table 2. There is also an opportunity to evaluate the technical and economic performances of the diesel model [5].

On the basis of tabular data, one can construct graphic dependences for clarity.

Table 1

**Diesel indicators with unregulated fuel
injection advance angle**

$n_{rot},$ min^{-1}	$N_e,$ kW	$P_i,$ MPa	$b_i,$ $\frac{kg}{kW}$ h	$NO_x,$ $\frac{g}{kW}$ h	$PM,$ $\frac{g}{kW}$ h
350	540	1,257	0,218	7,9	0,442
380	585	1,255	0,222	6,8	0,56
420	647	1,261	0,222	6,6	0,566
460	705	1,258	0,224	6,3	0,597

End of table 1

$n_{rot},$ min^{-1}	$N_e,$ kW	$P_i,$ MPa	$b_i,$ $\frac{kg}{kW}$ h	$NO_x,$ $\frac{g}{kW}$ h	$PM,$ $\frac{g}{kW}$ h
510	777	1,256	0,229	5,7	0,694
560	825	1,225	0,238	4,9	0,833
660	861	1,114	0,269	3,4	1,299
750	938	1,09	0,279	3,1	1,416

Table 2

**Diesel indicators with regulated fuel
injection advance angle**

$N_{rot},$ min^{-1}	$N_e,$ kW	$P_i,$ MPa	$b_i,$ $\frac{kg}{kW}$ h	$NO_x,$ $\frac{g}{kW}$ h	$PM,$ $\frac{g}{kW}$ h
350	542	1,255	0,218	7,7	0,442
380	587	1,255	0,222	6,8	0,559
420	649	1,264	0,222	6,8	0,537
460	710	1,264	0,222	6,5	0,539
510	785	1,271	0,226	6,1	0,59
560	840	1,243	0,233	5,3	0,69
660	902	1,145	0,26	4,1	1,044
750	995	1,133	0,267	3,8	1,1

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The curves in Fig. 3, 4, 5, 6, 7 demonstrate how technical and economic, environmental indicators are changed in the application of the investigated diesel at SAC FIAA application.

Findings

As can be seen, indexes are quite optimistic. Average indicated pressure increases due to maximum combustion pressure increase, and this in turn leads to an increase the power of diesel effectiveness and reduction the specific fuel consumption. This is especially expressed in the second half of the speed range of diesel performance [12]. Unfortunately, there are negative aspects of this regulation. One can observe increase of nitrogen oxides emissions in exhaust gases, which nevertheless tends to decrease with increasing in shaft speed diesel [13, 14]. These compounds, on the level of carbon monoxide and sulfur oxides, are one of the most harmful impurities in the exhaust gases, so from an environmental point of view this is an undesirable effect.

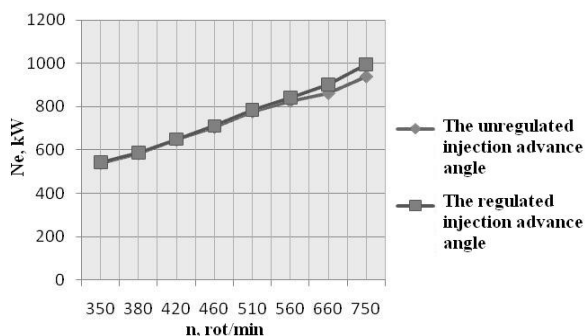


Fig. 3. Comparison of effective power

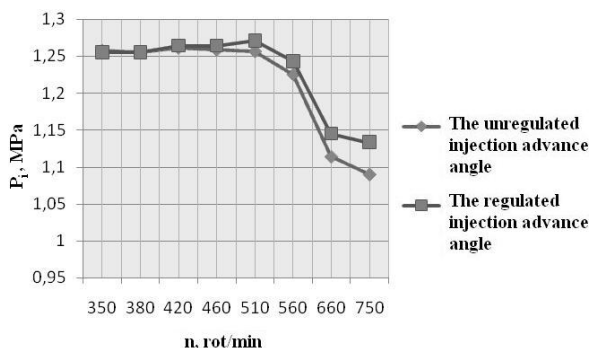


Fig. 4. Comparison of average indicated pressure in the cylinder

At the same time, the content of soot particles is reduced quite significantly, which is certainly is a positive difference.

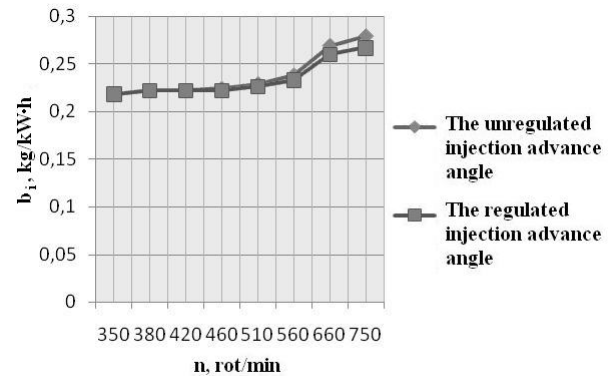


Fig. 5. Comparison of specific fuel consumption of a diesel

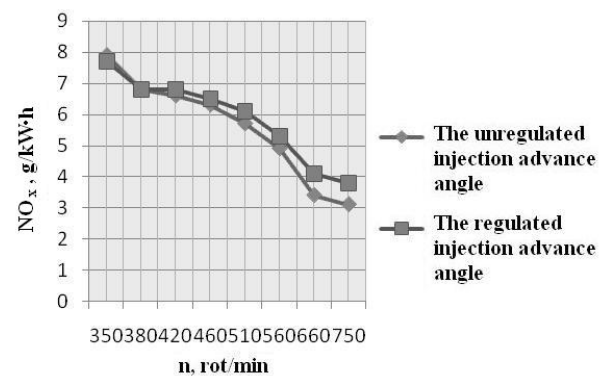


Fig. 6. Comparison of the nitrogen oxides content in the exhaust gases

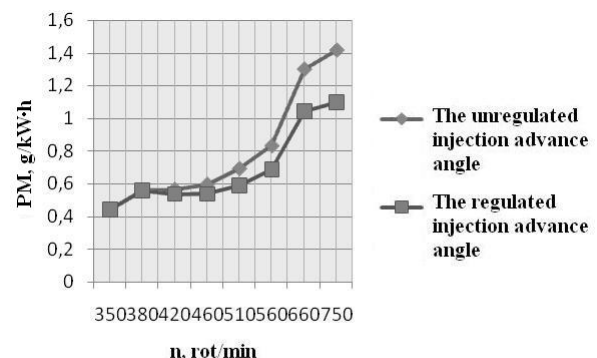


Fig. 7. Comparison of soot content in the exhaust gases

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The ability to control the timing of fuel injection advance angle at the operation of the diesel engine, could make a significant contribution to the improvement of the workflow. Thus, it is possible to achieve a rational, but not excessive pressure combustion in all positions of the controller. And combining the proposed system using the eddy combustion chambers, one can achieve a better combustion, higher capacity, improving the environmental performances of the diesel engine and the technical state of the cylinder-piston group.

Originality and practical value

The adjust system of the fuel supply angle allows automating the process of selecting the fuel injection advance angle into the cylinder directly at diesel engine operation. Thus diesel engine components remain unchanged, except the countershaft, which can be upgraded in depot repair production [9]. This allows installing the system on the diesel engine of existing railway locomotives fleet and industry enterprises.

Conclusions

Discussed above system at the simulation, has demonstrated its feasibility and possibility of practical application in locomotive ICE. Mathematical calculation showed an increase in the effective power to 2.2%, reducing fuel consumption to 1.6% and improvement of environmental performance. Implementation the automated control system of fuel injection advance angle makes it possible to improve technical and energy parameters of the locomotive as a whole.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Володин, А. И. Локомотивные энергетические установки / А. И. Володин, В. З. Зюбанов, В. Д. Кузьмич. – Москва : МПК Желдориздат, 2002. – 718 с.
2. Данковцев, В. Т. Аккумуляторные системы подачи топлива в цилиндры дизеля / В. Т. Данковцев, В. А. Четвергов // Локомотив. – 2011. – № 4. – С. 33–35.
3. Жаров, И. А. Проблемы триботехнических инноваций на железнодорожном транспорте / И. А. Жаров // Вестн. ВНИИЖТа. – 2007. – № 5. – С. 8–11.
4. Мартишевський, М. І. Техніко-економічні основи впровадження на залізничному транспорті системи контролю та комп'ютерного обліку витрат дизельного палива тепловозами / М. І. Мартишевський // Транспорт : зб. наук. пр. / ДДТУЗТ. – Дніпропетровськ, 2001. – Вип. 8. – С. 138–144.
5. Моделювання нерівномірності обертання колінчатого вала дизеля / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. Б. Черняєв, О. Я. Децюра // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 31. – С. 36–40.
6. Росляков, Ю. А. Перспективные проекты модернизации локомотивов / Ю. А. Росляков // Локомотив. – 2012. – № 6. – С. 7–8.
7. Симсон, А. Э. Двигатели внутреннего сгорания. Тепловозные дизели. Газотурбинные установки / А. Э. Симсон, А. З. Хомич, А. А. Куриц. – Москва : Транспорт, 1980. – 384 с.
8. Системы управления дизельными двигателями. Bosch. – Москва : За рулем, 2004. – 480 с.
9. Ширяев, Ф. Г. Дизельные двигатели. Устройство, обслуживание, ремонт / Ф. Г. Ширяев. – Москва : Петит, 2002. – 384 с.
10. Юрген, К. Системы впрыска дизельных двигателей / К. Юрген, В. Эрнст. – Москва : За рулём, 2012. – 320 с.
11. A complete 0D thermodynamic predictive model for direct injection diesel engines / F. Payri, P. Olmeda, J. Martín, A. García // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88. – Iss. 12. – P. 4632–4641. doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.005.
12. Guangmeng, Z. Combustion characteristics of common rail diesel engine under high altitude (low pressure) conditions / Z. Guangmeng, L. Ruilin, D. Surong // Transactions of CSICE. – 2012. – Vol. 30, № 3. – P. 220–226.
13. Research on the effect of forced swirl combustion chamber on air-fuel mixture process in diesel engine / Y. Shang, F. Liu, X. Li, W. Du // Transactions of CSICE. – 2010. – Vol. 28, № 6. – P. 488–493.
14. Zhu, Z.-X. Adaption of fuel injection parameters for turbocharged diesel engines working at high altitude / Z.-X. Zhu, F.-J. Zhang, K. Han // Acta Armamentarii. – 2014. – Vol. 35, № 5. – P. 583–589.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

М. І. КАПІЦА¹, М. І. МАРТИШЕВСЬКИЙ², Д. М. КИСЛИЙ^{3*}, І. І. ПАЛІЙ⁴

¹Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, ел. пошта m.i.kapitsa@ua.fm,
ORCID 0000-0002-3800-2920

²Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, ел. пошта sosnovka49@gmail.com,
ORCID 0000-0003-4330-4322

^{3*}Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. + 38 (066) 625 18 59, ел. пошта dmitriyakis@i.ua,
ORCID 0000-0002-4427-894X

⁴Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. + 38 (096) 320 94 15, ел. пошта Paliy_Igor@mail.ru,
ORCID 0000-0001-7368-9097

ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОЗІВ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДИЗЕЛЕМ

Мета. На сьогоднішній день питання щодо тепловозної тяги залишається актуальним на більшості промислових підприємств та залізниць України, а тепловозний дизельний двигун продовжує бути об'єктом всебічних досліджень і вдосконалень. Не зважаючи на інтенсивний процес електрифікації, який супроводжує залізничний транспорт України останні роки, тепловозна тяга продовжує відігравати важливу роль як в магістральному, так і в промисловому залізничному тяговому рухомому складі. Так чи інакше, всі види маневрових та господарських робіт залишаються за тепловозами, які невідпинно й повсякчасно удосконалюються й модернізуються. Робота спрямована на пошук можливості поліпшення техніко-енергетичних параметрів тепловозів за рахунок розробки сучасного методу регулювання роботи паливної апаратури дизельного двигуна. **Методика.** Використано запропоновану методику підвищення потужності тепловозних дизельних двигунів у діапазоні частот обертання колінчастого валу (від холостого ходу – до максимального), в основу якої покладено наближення моменту запалювання суміші до верхньої «мертвої» точки положення поршня. **Результати.** В роботі наведена коротка історична довідка наукових досліджень в області робочого циклу двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Проаналізовані чинники, які впливають на процес сумішеутворення та його якість. Приведені вимоги до подачі пального в циліндр та «слабкі місця» цього процесу. Запропонований варіант модернізації приводу паливних насосів, який дозволяє підійти до регулювання паливоподачі з іншого боку та покращити його. Представлений варіант конструктивного виконання комплексної системи з уточненням механічних особливостей та схеми управління. Наведений алгоритм роботи системи та зроблена оцінка його впливу на параметри роботи дизеля. **Наукова новизна.** Запропонована система регулювання кута подачі палива, яка дає змогу автоматизувати процес вибору кута випередження подачі палива в циліндр. **Практична значимість.** Складові частини дизельного двигуна при впровадженні системи регулювання кута подачі палива залишаються без змін, що дозволяє встановлювати систему на дизелі наявного парку тепловозів залізниць та промислових підприємств. Розглянута система в ході моделювання показала свою доцільність та можливість практичного застосування на тепловозних дизелях.

Ключові слова: паливо; впорскування; згорання; розподільчий вал; шліци; кроковий двигун

М. И. КАПИЦА¹, М. И. МАРТЫШЕВСКИЙ², Д. Н. КИСЛЫЙ^{3*}, И. И. ПАЛИЙ⁴

¹Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика
В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, эл. почта m.i.kapitsa@ua.fm, ORCID 0000-0002-3800-2920

²Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика
В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, эл. почта sosnovka49@gmail.com,
ORCID 0000-0003-4330-4322

^{3*}Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика
В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. + 38 (066) 625 18 59, эл. почта dmitriyakis@i.ua,
ORCID 0000-0002-4427-894X

⁴Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика

В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. + 38 (096) 320 94 15, эл. почта Paliy_Igor@mail.ru,
ORCID 0000-0001-7368-9097

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЗА ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЕМ

Цель. На сегодняшний день вопрос, связанный с тепловозной тягой, остается актуальным на большинстве промышленных предприятий и железных дорог Украины, а тепловозный дизельный двигатель продолжает быть объектом всесторонних исследований и усовершенствований. Несмотря на интенсивный процесс электрификации, который сопровождает железнодорожный транспорт Украины последние годы, тепловозная тяга продолжает играть важную роль как в магистральном, так и в промышленном железнодорожном тяговом подвижном составе. Так или иначе, все виды маневровых и хозяйственных работ остаются за тепловозами, которые неустанно и ежечасно совершенствуются и модернизируются. Работа направлена на поиск возможности улучшения технико-энергетических параметров тепловозов за счет разработки современного метода регулирования работы топливной аппаратуры дизельного двигателя. **Методика.** Использована предложенная методика повышения мощности тепловозных дизельных двигателей в диапазоне частот вращения коленчатого вала (от холостого хода – до максимального), в основу которой положено приближение момента зажигания смеси в верхней «мертвой» точке положения поршня. **Результаты.** В работе приведена краткая историческая справка научных исследований в области рабочего цикла двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Проанализированы факторы, которые влияют на процесс смесеобразования и его качество. Приведены требования к подаче топлива в цилиндр и «слабые места» этого процесса. Предложен вариант модернизации привода топливных насосов, который позволяет подойти к регулированию топливоподачи с другой стороны и улучшить её. Представлен вариант конструктивного исполнения комплексной системы с уточнением механических особенностей и схемы управления. Приведен алгоритм работы системы и сделана оценка его влияния на параметры работы дизеля. **Научная новизна.** Предлагаемая система регулирования угла подачи топлива позволяет автоматизировать процесс выбора угла опережения подачи топлива в цилиндр. **Практическая значимость.** Составные части дизельного двигателя при внедрении системы регулирования угла подачи топлива остаются без изменений, что позволяет устанавливать систему на дизели имеющегося парка тепловозов железных дорог и промышленных предприятий. Рассмотренная система в ходе моделирования показала свою целесообразность и возможность практического применения на тепловозных дизелях.

Ключевые слова: топливо; впрыск; сгорание; распределительный вал; шлицы; шаговый двигатель

REFERENCES

1. Volodin A.I., Zyubakov V.Z., Kuzmich V.D. *Lokomotivnyye energeticheskiye ustanovki* [Locomotive power plants]. Moscow, MPK Zheldorizdat Publ., 2002. 718 p.
2. Dankovtsev V.T., Chetvergova V.A. Akkumulyatornyye sistemy podachi topliva v tsilindry dizelya [Accumulator fuel supply systems into the cylinders of a diesel engine]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2011, no. 4, pp. 33-35.
3. Simson A.E., Khomich A.Z., Kurits A.A. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. Teplovoznnyye dizeli. Gazoturbinnnyye ustanovki* [Internal combustion engines. Diesels. Gas turbines]. Moscow, Transport Publ., 1980. 384 p.
4. Zharov I.A. Problemy tribotekhnicheskikh inovatsiy na zheleznodorozhnom transporte [Tribological problems of innovations at railway transport]. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Railway Transport], 2007, no. 5, pp. 8-11.
5. Martyshevskiy M.I. Tekhniko-ekonomichni osnovy vprovadzhennia na zaliznychnomu transporti systemy kontroliu ta kompiuternoho obliku vytrat dyzelnoho palyva teplovozymy [Technical and economic bases of introduction the control systems and computer costs recording of diesel fuel in the locomotives at railway transport]. *Transport: zbirnyk naukovykh prats* [Transport: Proceedings]. Dnipropetrovsk, 2001, issue 8, pp. 138-144.
6. Bodnar B.Ye., Ochkasov O.B., Cherniaiev D.B., Detsiura O.Ya. Modeliuvannia nerivnomirnosti obertannia kolinchatoho vala dyzelia [Modeling of uneven rotation of the diesel crankshaft]. *Visnyk Dnipropetrovskoho*

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 31, pp. 36–40.
7. Roslyakov Yu.A. Perspektivnyye proyekty modernizatsii lokomotivov [Advanced projects of locomotives modernization]. *Lokomotiv – Locomotive*, 2012, no. 6, pp. 7–8.
 8. *Sistemy upravleniya dizelnymi dvigatelyami. Bosch* [Control systems of diesel engines. Bosch]. Moscow, Za rulem Publ., 2004. 480 p.
 9. Shiryayev F.G. *Dizelnyye dvigateli. Ustroystvo, obsluzhivaniye, remont* [Diesel engines. Apparatus, service, repair]. Moscow, Petit Publ., 2002. 384 p.
 10. Yurgen K., Ernst V. *Sistemy vpryska dizelnykh dvigateley* [Diesel injection system]. Moscow, Za rulem Publ., 2012. 320 p.
 11. Payri F., Olmeda P., Martín J., García A. A complete 0D thermodynamic predictive model for direct injection diesel engines. *Applied Energy*, 2011, vol. 88, issue 12, pp. 4632–4641. doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.005.
 12. Guangmeng Z., Ruilin L., Surong D. Combustion characteristics of common rail diesel engine under high altitude (low pressure) conditions. *Transactions of CSICE*, 2012, vol. 30, no. 3, pp. 220–226.
 13. Shang Y., Liu F., Li X., Du W. Research on the effect of forced swirl combustion chamber on air-fuel mixture process in diesel engine. *Transactions of CSICE*, 2010, vol. 28, no. 6, pp. 488–493.
 14. Zhu Z.-X., Zhang F.-J., Han K. Adaption of fuel injection parameters for turbocharged diesel engines working at high altitude, *Acta Armamentarii*, 2014, vol. 35, no. 5, pp. 583–589.

Prof. A. F. Holovchuk, D. Sc. (Tech.) (Ukraine); Prof. A. V. Sokhatskyi, D. Sc. (Tech.) (Ukraine)
recommended this article to be published

Received: Jan. 15, 2015

Accepted: March 16, 2015

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.42.015

С. В. МЯМЛИН¹, Н. Е. НАУМЕНКО², О. М. МАРКОВА³, Е. Н. КОВТУН⁴,
В. В. МАЛЫЙ^{5*}

¹Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, эл. почта sergeyamyamlin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

²Отдел «Динамика многомерных механических систем», Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (056) 375 68 01, эл. почта dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6913-2568

³Отдел «Динамика многомерных механических систем», Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (056) 375 68 03, эл. почта dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-9390-4046

⁴Отдел «Динамика многомерных механических систем», Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (0562) 46 79 35, эл. почта dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-2961-3682

^{5*}Отдел «Динамика многомерных механических систем», Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, Украина, 49005, тел. +38 (0562) 46 79 35, эл. почта dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6501-1398

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ШЕСТИОСНОГО ЛОКОМОТИВА

Цель. Работа посвящена оценке динамических качеств локомотива перспективной конструкции и определению возможности его использования на железных дорогах Украины. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы математического и компьютерного моделирования динамики железнодорожных транспортных средств, а также методы численного интегрирования систем обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. **Результаты.** Для решения поставленной задачи построена расчетная схема локомотива на трехосных тележках, которая представляет собой систему твердых тел, соединенных элементами различной реологии. С использованием этой расчетной схемы разработана математическая модель пространственного движения локомотива, позволяющая исследовать его пространственные колебания при движении по прямолинейным и криволинейным участкам пути со случайными неровностями в плане и профиле. При составлении математической модели принимались во внимание как геометрические (нелинейность профиля поверхности катания колеса), так и физические нелинейности системы (работа сил сухого трения, нелинейность характеристик сил взаимодействия колес и рельсов). С помощью компьютерного моделирования проведены многовариантные расчеты, позволившие оценить динамические качества локомотива при его движении по прямолинейным и криволинейным участкам пути. При этом определялись показатели плавности хода локомотива в горизонтальной и вертикальной плоскостях, рамные силы, коэффициенты вертикальной динамики в первой и второй ступенях подвешивания, коэффициенты запаса устойчивости против схода колеса с рельса. Кроме того, проведено сравнение полученных результатов с аналогичными характеристиками широко используемого на железных дорогах Украины шестиосного тепловоза ТЭ116. Определено влияние скорости движения и технического состояния пути на безопасность движения локомотива. **Научная новизна.** Разработана математическая модель пространственного движения шестиосного локомотива перспективной конструкции, учитывающая особенности его конструкции, и сделана оценка динамических характеристик при движении экипажа по пути произвольного очертания. **Практическая значимость.** Разработанная математическая модель движения шестиосного локомотива может быть использована при проведении научных исследований по созданию перспективных конструкций локомотивов.

Ключевые слова: подвижной состав; локомотив; математическая модель; динамические показатели

Введение

В настоящее время техническое состояние тягового подвижного состава Украины не

в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к современным транспортным системам. Одной из самых острых проблем железных дорог Украины является физический и мо-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ральный износ локомотивного парка. Так, в настоящее время средний износ парка тепловозов составляет 97 %, электровозов – 90 %. В Программе обновления тягового подвижного состава железных дорог Украины на период до 2020 года заложены потребности в закупке подвижного состава нового поколения. Использование таких локомотивов позволит повысить безопасность движения поездов и значительно уменьшить потребление топлива и эксплуатационные расходы на их содержание [2, 4, 6, 10, 12].

Большую работу по созданию современных локомотивов проводят практически все мировые производители, в том числе и компания Siemens. В созданных ими тепловозах реализована значительная часть требований, предъявляемых к перспективным локомотивам будущего: возможность эксплуатации во всех странах Европы, использование как в грузовом, так и в пассажирском движении. Одним из таких перспективных локомотивов является шестиосный тепловоз с электрической передачей серии ER20, который может быть использован и на железных дорогах Украины после соответствующей адаптации [8, 14, 15].

Цель

Цель работы заключается в оценке динамических качеств локомотива перспективной конструкции при его движении по прямолинейным и криволинейным участкам железнодорожного пути и определение возможности его использования на железных дорогах Украины.

Методика

Для решения поставленной задачи была выбрана расчетная схема локомотива и составлена математическая модель, описывающая его пространственные колебания. На основе построенной математической модели разработан алгоритм и составлена компьютерная программа, предназначенная для оценки динамических характеристик движущегося локомотива.

Расчетная оценка динамических показателей локомотива проведена путем анализа результатов решения нелинейных дифференциальных уравнений, представляющих динамическую модель пространственных колебаний экипажа.

Результаты

Кузов тепловоза типа ER20 выполнен как самонесущая модульная конструкция и подразделяется на следующие компоненты: главную раму, боковые стенки, кабины управления и смонтированные лобовые части. Главная рама состоит из двух буферных брусьев, двух наружных и двух центральных продольных балок, четырех поперечных балок. Буферные брусья воспринимают ударно-тяговые усилия, которые через автосцепное устройство передаются от состава поезда на локомотив. Силы тяги и торможения передаются от тележек на кузов через штангу, присоединенную к буферному брусу. Кузов тепловоза опирается на две трехосные тележки. Конструкция тележки бесчелюстная с двухступенчатым рессорным подвешиванием с использованием винтовых пружин и гидравлических гасителей колебаний. Подвешивание тяговых электродвигателей опорно-рамное. Нагрузка от кузова передается на каждую тележку через упругое рессорное подвешивание второй ступени [1, 9].

Расчетная схема тепловоза типа ER20 (рис. 1) построена как механическая система, состоящая из девяти твердых тел (кузова, двух рам тележек и шести колесных пар).

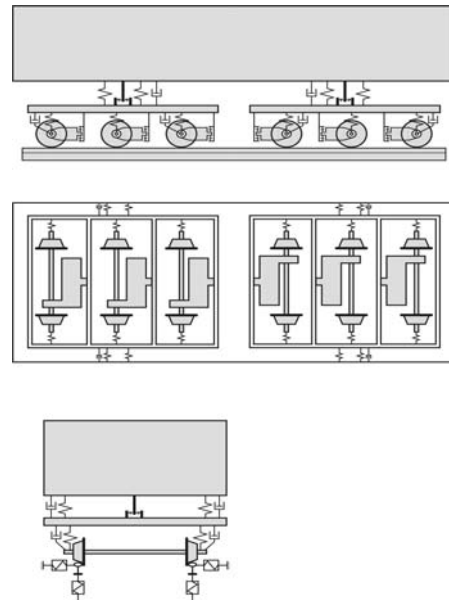


Рис. 1. Расчетная схема тепловоза типа ER20

Fig. 1. Design scheme of the locomotive, type ER20

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Выбранная конфигурация твердых тел расчетной схемы позволяет учесть следующие особенности тепловоза типа ER20:

- упруго-диссипативную с вязким трением связь кузова и рамы тележки;
- упруго-вязкую связь между рамой тележки и колесными парами: комплекты пружин буксового подвешивания допускают взаимные перемещения этих тел во всех направлениях;
- форму профилей поверхности катания колес.

Железнодорожный путь моделируется в виде приведенной к каждому колесу массой (двенадцать приведенных масс), имеющей только вертикальное и поперечное горизонтальное перемещения и опирающейся в этих направлениях на пружины и демпферы вязкого трения, моделирующие упруго-диссипативные свойства рельсов и подрельсового основания. Продольные и угловые перемещения элементов верхнего строения пути данной моделью не учитываются.

Конфигурация рассматриваемой механической системы описывается $9 \times 6 + 12 \times 2 = 78$ координатами.

При описании движения тепловоза по участкам пути произвольного очертания выбрана неподвижная система координат $\tilde{O}\xi\eta\zeta$, а для каждого твердого тела – по две подвижные системы координат: естественная $Oxuz$ и связанная с твердым телом $Cx'y'z'$ (Cx' , Cy' , Cz' – главные центральные оси инерции). Все системы координат приняты правыми, причем считается, что оси $\tilde{O}\xi$, Ox , Cx' направлены слева направо, а оси $\tilde{O}\zeta$, Oz , Cz' – вниз (рис. 2). Оси естественной системы координат направлены соответственно по касательной, нормали и бинормали – к оси пути. Начало координат O для каждого твердого тела находится на расстоянии s от его положения в начальный момент времени (здесь s – пройденный путь). Положение естественной системы координат относительно неподвижной характеризуется дуговой координатой вдоль оси пути s , углом χ между осями Ox и $\tilde{O}\xi$ в плане, а также углами φ_i и θ_i между этими осями в вертикальных плоскостях, которые определяются возвышением наружного рельса h_r . Параметры рельса χ , h_r – задан-

ные функции координаты s , для круговой кривой $\dot{\chi}$ и h_r – постоянные, для прямой – равняются нулю [11].

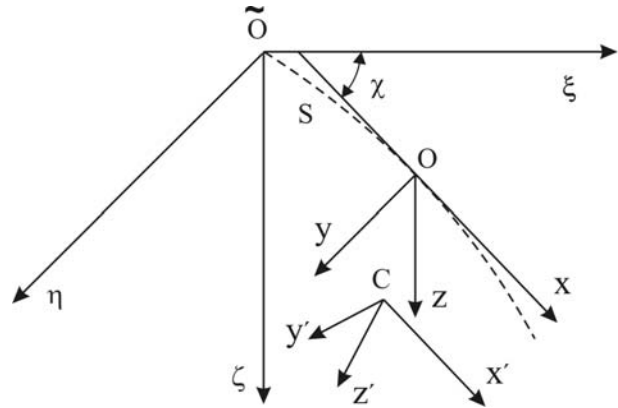


Рис. 2. Системы координат

Fig. 2. Coordinate system

Положение твердого тела относительно естественной системы координат описывается величинами $x, y, z, \psi, \varphi, \theta$. Поступательные перемещения x, y, z и углы поворота ψ, φ, θ описывают подергивание, боковой относ, подпрыгивание и виляние, галопирование, боковую качку твердого тела соответственно [3].

При обозначении координат твердых тел системы введены следующие индексы: кузов – f , рама тележки – bk ($k = 1, 2$), колесная пара – i ($i = \overline{1, 6}$ – номер колесной пары по ходу движения экипажа), колесо – ij ($j = 1$ – левая сторона вагона, $j = 2$ – правая), рельсы в точках контакта – rij .

Для определения числа степеней свободы рассматриваемой механической системы приняты во внимание ограничения, наложенные на перемещения тел с учетом общепринятых допущений и конструктивных особенностей ходовых частей локомотива.

Вертикальные перемещения и боковая качка колесных пар выражаются через вертикальные перемещения колес:

$$z_i = \frac{z_{i1} + z_{i2}}{2}; \quad \theta_i = \frac{z_{i2} - z_{i1}}{2d_1}; \quad (i = \overline{1, 6}), \quad (1)$$

где $2d_1$ – расстояние между средними кругами катания колесной пары.

Предполагается, что радиусы r кругов ката-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ния всех колес равны между собой. Тогда при совпадении продольных плоскостей симметрии пути и тележки при перемещении вагона вдоль оси пути все колеса при отсутствии проскальзывания повернутся на один и тот же угол:

$$\varphi_i = -\frac{x_i + s}{r}, \quad (i = \overline{1,6}), \quad (2)$$

где s – текущее значение пройденного пути.

В продольном направлении кузов тепловоза и рамы тележек совершают одинаковые линейные перемещения:

$$x_f = x_{b1} = x_{b2}. \quad (3)$$

С учетом связей (1) – (3) система «локомотив-рельсовая колея» имеет $78-20=58$ степеней свободы.

Уравнения движения локомотива составлены в форме уравнений Лагранжа II рода [3]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i + S_i, \quad (i = \overline{1, \dots, 58}), \quad (4)$$

где T и Π – кинетическая и потенциальная энергии системы; Φ – функция рассеяния; $q_i, \dot{q}_i$ – обобщенные координаты и их скорости; Q_i – соответствующие им обобщенные силы, не имеющие потенциала; S_i – внешние силы.

Кинетическая энергия системы получена путем сложения кинетических энергий тел, входящих в систему, определенных по теореме Кенига:

$$T = T_f + \sum_{k=1}^2 T_{bk} + \sum_{i=1}^6 T_i + T_{\Pi}, \quad (5)$$

где T_f – кинетическая энергия кузова тепловоза; T_{bk} – кинетическая энергия k -ой рамы тележки; T_i – кинетическая энергия i -ой колесной пары; T_{Π} – кинетическая энергия пути.

В общем случае выражение для вычисления кинетической энергии для j -го твердого тела имеет следующий вид:

$$T_j = \frac{1}{2} m_j \left[(\dot{s} + \dot{x}_j - y_j \dot{\chi}_j)^2 + (\dot{y}_j + x_j \dot{\chi}_j)^2 + (\dot{z}_j - \dot{h}_{rj})^2 \right] + \frac{1}{2} I_{xy} (\dot{\theta}_j + \dot{\theta}_{hj})^2 + \frac{1}{2} I_{xj} (\dot{\psi}_j + \dot{\chi}_j)^2 + \frac{1}{2} I_{yj} (\dot{\phi}_j + \dot{\phi}_{hj})^2, \quad (6)$$

где m_j – масса j -го твердого тела; I_j с соответствующими индексами обозначают главные центральные моменты инерции j -го тела; $\dot{\chi}_j = VK_j$, K_j – кривизна пути под j -ым телом; V – скорость движения; h_{rj} – возвышение пути под центром масс j -го тела, вызванное возвышением в кривой наружного рельса на величину $h_r = \theta_h 2d_1$.

Кинетическая энергия системы, моделирующей путь, в соответствии с принятыми допущениями записывается следующим образом:

$$T_{\Pi} = \frac{1}{2} m_{rh} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \dot{y}_{rij}^2 + \frac{1}{2} m_{rv} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 \dot{z}_{rij}^2, \quad (7)$$

где m_{rh}, m_{rv} – массы пути, приведенные к одному колесу в горизонтальном поперечном и вертикальном направлениях.

Потенциальная энергия системы (Π) равна сумме потенциала сил тяжести (Π_{L1}), энергии сжатия упругих элементов подвешивания (Π_{L2}) и потенциальной энергии приведенных масс пути (Π_{Π}).

Потенциальная энергия, обусловленная опусканием центров тяжести тел, определяется из выражения:

$$\Pi_{L1} = -m_f g (\theta_{hfb} y_f + z_f) - m_b g \sum_{k=1}^2 \theta_{hbk} y_{bk} - + z_{bk}) - m_{kp} g \sum_{i=1}^6 (\theta_{hj} y_i + z_i), \quad (8)$$

где m_f, m_b, m_{kp} – массы кузова, рамы тележки и колесной пары соответственно; g – ускорение свободного падения; θ_{hj} – угол между горизонтальной плоскостью под центром масс j -го тела и плоскостью пути, вызванный возвышением наружного рельса над внутренним

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

в криволинейном участке пути.

Составляющая потенциальной энергии Π_{L2} определяется по теореме Клапейрона как сумма энергий, накапливаемых в упругих элементах системы при их деформациях. В общем случае Π_{L2} имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi_{L2} = & \frac{1}{2} \left(\sum_{l=1}^4 k_{cz} \Delta_{czl}^2 + k_{cy} \Delta_{cyl}^2 \right) + \\ & + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 (k_{ax} \Delta_{axij}^2 + k_{ay} \Delta_{ayij}^2 + k_{az} \Delta_{azij}^2) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} k_z \sum_{i=1}^4 \Delta_{zi}^2 \right), \quad (9) \end{aligned}$$

где $\Delta_{czl}, \Delta_{cyl}$, – изменение длины l -ых упругих элементов центрального подвешивания в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях; k_{cz}, k_{cy} – жесткости пружин центрального подвешивания соответственно в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях; $\Delta_{azij}, \Delta_{ayij}, \Delta_{axij}$ – деформации пружин буксового подвешивания в вертикальном, горизонтальном поперечном и продольном направлениях; k_{az}, k_{ay}, k_{ax} – соответствующие жесткости пружин буксового подвешивания; k_z – жесткость скользуна, установленного на раме тележки, ограничивающего вертикальные перемещения кузова; Δ_{zi} – взаимное вертикальное перемещение кузова и рамы тележки в зоне i -го скользуна.

Выражение для определения потенциальной энергии пути имеет вид:

$$\Pi_{II} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 (k_{rz} \Delta_{rzij}^2 + k_{ry} \Delta_{ryij}^2), \quad (10)$$

где $\Delta_{rzij} = z_{rij}$; $\Delta_{ryij} = y_{rij}$ ($i = \overline{1,6}, j = \overline{1,2}$).

Функция рассеивания энергии в экипаже учитывает действие сил вязкого трения в обеих ступенях подвешивания и при взаимных поворотах кузова относительно ходовых частей в плане:

$$\begin{aligned} \Phi_L = & \frac{1}{2} (\beta_{cz} \sum_{i=1}^4 \dot{\Delta}_{czi}^2 + \beta_{cy} \sum_{i=1}^2 \dot{\Delta}_{cyl}^2) + \\ & + \frac{1}{2} \beta_{az} \sum_{i=1}^8 \dot{\Delta}_{zi}^2 + \frac{1}{2} \beta_{\psi} \sum_{i=1}^2 \dot{\Delta}_{\psi i}^2, \quad (11) \end{aligned}$$

где β_{cz}, β_{cy} – коэффициенты вязкого трения в центральном подвешивании в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях соответственно; β_{az} – коэффициент вязкого трения в буксовом подвешивании в вертикальном направлении; β_{ψ} – коэффициент вязкого трения при взаимных поворотах кузова относительно рамы тележки в плане; $\dot{\Delta}$ – относительные скорости перемещений тел, связанных диссипативными элементами.

Относительные скорости $\dot{\Delta}$ перемещений тел, связанных диссипативными элементами, определяются как производные по времени от относительных перемещений соответствующих тел.

Функция рассеивания энергии в пути имеет следующий вид:

$$\Phi_{II} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^2 (\beta_{ry} \dot{\Delta}_{ryij}^2 + \beta_{rz} \dot{\Delta}_{rzij}^2), \quad (12)$$

где β_{ry}, β_{rz} – коэффициенты рассеивания энергии в пути в горизонтальном и вертикальном поперечном направлениях.

Обобщенные силы Q_i являются силами взаимодействия колес и рельсов. Действие сил в контакте колес и рельсов (силы псевдоскольжения) моделируется по методике, описанной в работе [5].

Составляющие сил крипа определяются по формулам:

$$\begin{aligned} T_{xij} &= \frac{\varepsilon_{xij}}{\varepsilon_{ij}} T_{ij}; \\ T_{\alpha ij} &= \frac{\varepsilon_{yij} \sec \alpha_{ij}}{\varepsilon_{ij}} T_{ij} \quad (i = \overline{1,6}, j = \overline{1,2}), \quad (13) \end{aligned}$$

где T_{xij} – проекция полной силы T_{ij} на продольную ось x ; $T_{\alpha ij}$ – проекция силы T_{ij} на касательную к профилю поверхности катания ко-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

леса в точке контакта; α_{ij} – угол между касательной к профилю поверхности колеса в точке контакта и поперечной осью y ; ε_{ij} – относительная скорость проскальзывания j -го колеса i -ой колесной пары по рельсу (крип); $\varepsilon_{xij}, \varepsilon_{yij}$ – продольная и поперечная составляющие относительной скорости проскальзывания j -го колеса i -ой колесной пары по рельсу;

$$T_{ij} = -F_{ij}\varepsilon_{ij} \left[\left(\frac{F_{ij}\varepsilon_{ij}}{f_{tr}N_{ij}} \right)^4 + 1 \right]^{-\frac{1}{4}}, \quad (14)$$

где N_{ij} – нормальное давление j -го колеса i -ой колесной пары на рельс; f_{tr} – коэффициент трения скольжения; F_{ij} – коэффициент крипа j -го колеса i -ой колесной пары.

Полный крип ε_{ij} определяется выражением:

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{xij}^2 + \varepsilon_{yij}^2 \sec^2 \alpha_{ij})^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Обобщенные силы Q_i вычисляются как коэффициенты при вариациях обобщенных координат в выражениях возможных работ сил псевдоскольжения $T_{xij}, T_{\alpha ij}$.

Внешними силами, действующими на локомотив, являются: сила тяги F_T , развиваемая локомотивом, тормозная сила B , возникающая при включении тормозов, и силы сопротивления движению W , к которым относятся все остальные внешние силы.

В общем случае внешние силы, действующие на локомотив, могут быть представлены в виде:

$$S = W + B + F_T. \quad (16)$$

После подстановки в уравнение Лагранжа (4) выражений кинетической и потенциальной энергий, функции рассеивания, обобщенных и внешних сил получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая движение рассматриваемого локомотива по прямолинейным и криволинейным участкам пути.

На основе разработанной математической модели разработан алгоритм и создана компьютерная программа, предназначенная для

оценки динамических характеристик движущегося локомотива. Разработанная компьютерная программа позволяет имитировать широкий спектр различных расчетных случаев, охватывающих всевозможные сочетания параметров ходовых частей, вагона в целом и пути. В результате расчетов может быть получен практически любой набор необходимых выходных величин.

Расчетная оценка динамических показателей локомотива проведена путем анализа результатов решения нелинейных дифференциальных уравнений, представляющих динамическую модель колебаний экипажа. Решения нелинейных дифференциальных уравнений получены численно по методу Адамса-Башфорта.

Ходовые качества, безопасность движения и плавность хода локомотива оценивались по следующим показателям [7]:

W_G, W_V – показатели плавности хода в горизонтальной и вертикальной плоскостях; H_r – рамные силы; k_{dv1}, k_{dv2} – коэффициенты вертикальной динамики в первой и второй ступенях подвешивания; k_{st} – коэффициенты запаса устойчивости против схода колеса с рельса.

Для сравнительного анализа также проведены расчеты по оценке динамических показателей серийного локомотива ТЭ116 [16], который широко эксплуатируется на железных дорогах Украины в настоящее время.

Движение локомотивов моделировалось с учетом действия внешних возмущений, связанных с геометрическим несовершенством рельсовой колеи (просадки, уширения, углы в плане, стыки, неравномерный износ). Возмущения, имеющие случайный характер, моделировались под колесами локомотива с транспортным запаздыванием, которое зависит от расстояния между колесными парами и скорости движения вагона. В качестве возмущений принимались случайные неровности рельсовой колеи в вертикальном и поперечном горизонтальном направлениях, соответствующие удовлетворительному состоянию пути [13].

Рассмотрено движение обоих локомотивов по пути, который включает в себя как прямолинейные, так и криволинейные участки пути (входные переходные кривые, круговые кривые

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

разного радиуса, выходные переходные кривые).

При этом начальная скорость движения экипажа принималась равной 40 км/ч, а затем увеличивалась с шагом 10 км/ч до 170 км/ч на прямолинейном участке пути, до 120 км/ч на кривой радиусом 650 м и до 100 км/ч на кривой радиусом 300 м. Участок пути длиной 1 250 м включает в себя прямолинейный отрезок длиной 500 м, входную переходную кривую длиной 150 м, круговую кривую длиной 300 м, выходную переходную кривую длиной 150 м и еще один прямолинейный отрезок длиной 150 м. Радиусы круговых кривых составляли 650 и 300 м. При движении по круговой кривой радиусом 650 м (допустимое непогашенное ускорение согласно Нормам равно $0,7 \text{ м/с}^2$ [7]) с возвышением наружного рельса 0,11 м наибольшая допускаемая скорость движения составляет 108 км/ч. Для круговой кривой радиусом 300 м с возвышением наружного рельса 0,15 м наибольшая допускаемая скорость движения составляет 80 км/ч.

При движении экипажа по круговой кривой дополнительным критерием оценки его динамических характеристик является коэффициент устойчивости экипажа от опрокидывания (k_{opr}).

На рис. 3–8 приведены максимальные расчетные значения показателей плавности хода (W_G, W_V), рамных сил (H_r), коэффициентов вертикальной динамики (k_{dv1}, k_{dv2}) и коэффициентов запаса устойчивости против схода колес с рельсов (k_{st}), полученные для рассматриваемых локомотивов. Как видно из приведенных рисунков, значения динамических показателей как тепловоза ТЭ116, так и локомотива типа ER20 по большинству нормируемых величин не превышают допустимых значений во всем исследованном диапазоне изменения скоростей движения.

При этом значения некоторых рассматриваемых динамических характеристик для обеих экипажей несущественно отличаются друг от друга. Существенно худшие показатели по коэффициентам вертикальной динамики обеих ступеней рессорного подвешивания имеет тепловоз ТЭ116.

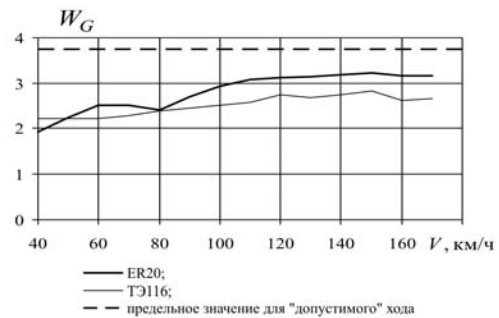


Рис. 3. Зависимости максимальных значений показателя плавности хода в горизонтальном направлении от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 3. Dependences of maximum values of smoothness in the horizontal direction on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

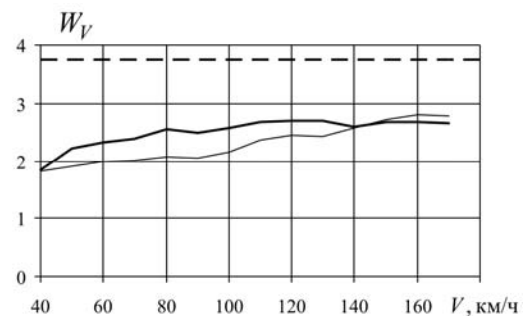


Рис. 4. Зависимости максимальных значений показателя плавности хода в вертикальном направлении от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 4. Dependences of maximum values of smoothness in the vertical direction on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

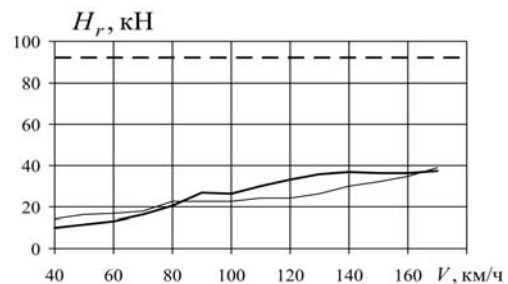


Рис. 5. Зависимости максимальных значений рамных сил от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 5. Dependences of maximum values of frame forces on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

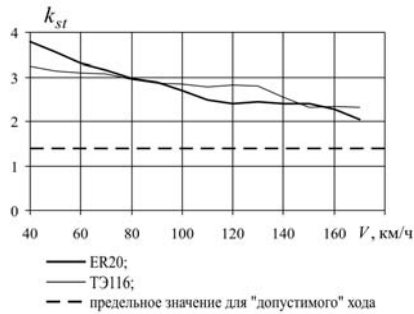


Рис. 6. Зависимости минимальных значений коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 6. Dependences of the minimum values of safety factor against derailment of the wheel from the rail on the speed of locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

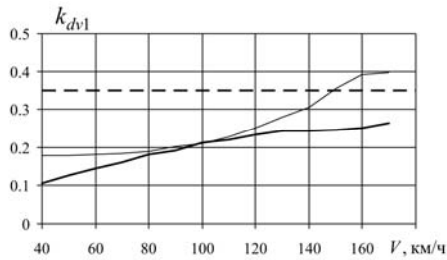


Рис. 7. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики первой ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 7. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the first stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

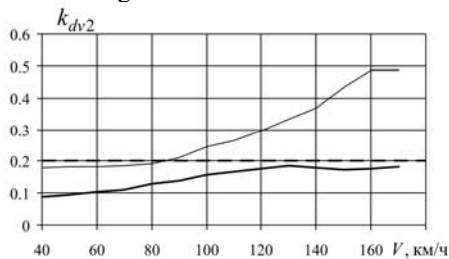


Рис. 8. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики второй ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по прямым участкам пути

Fig. 8. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the second stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 on straight sections of the track

На рис. 9–18 приведены графики зависимостей максимальных значений рамных сил, коэффициента устойчивости экипажа от опрокидывания, коэффициентов вертикальной динамики, коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов для тепловозов ТЭ116 и ER20, движущихся по круговым кривым радиуса 650 м (рис. 9–13) и радиуса 300 м (рис. 14–18) от скорости движения.

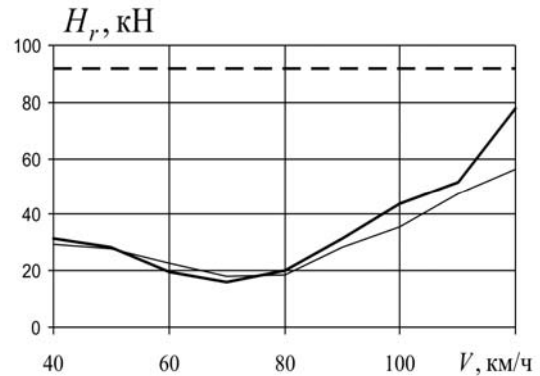


Рис. 9. Зависимости максимальных значений рамных сил от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 9. Dependences of maximum values of frame forces on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 650 m

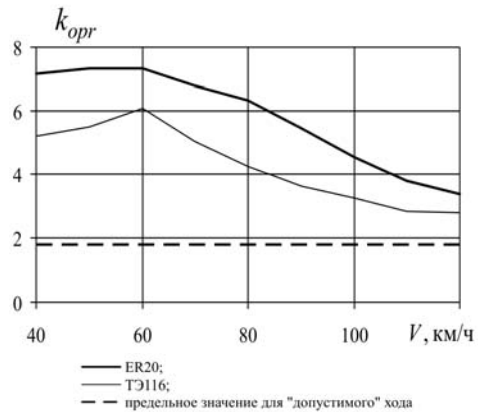


Рис. 10. Зависимости минимальных значений коэффициента устойчивости экипажа от опрокидывания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 10. Dependences of the minimum values of stability factor against overturning of the crew on the speed of locomotive ER20 and TE116 on a circular curve, radius of 650 m

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

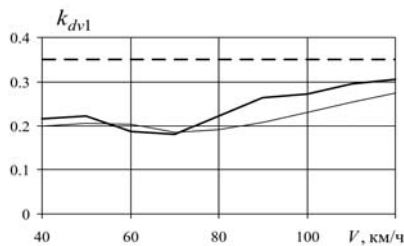


Рис. 11. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики первой ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 11. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the first stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 650 m

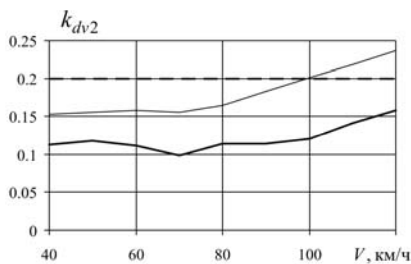


Рис. 12. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики второй ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 12. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the second stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 650 m

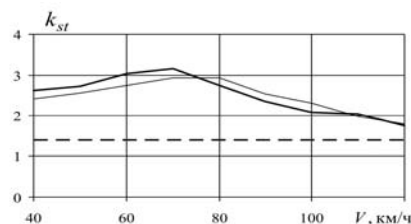


Рис. 13. Зависимости минимальных значений коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 650 м

Fig. 13. Dependences of the minimum values of safety factor against derailment of the wheel from the rail on the speed of locomotive ER20 and TE116 on a circular curve, radius of 650 m

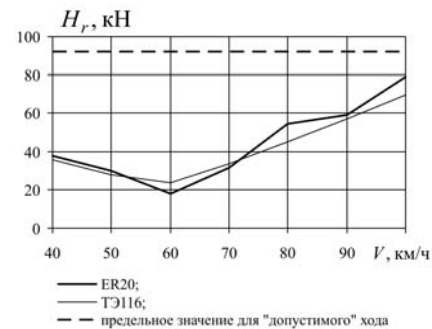


Рис. 14. Зависимости максимальных значений рамных сил от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 15. Dependences of maximum values of frame forces on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius 300 m

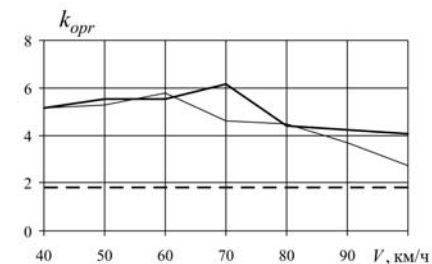


Рис. 15. Зависимости минимальных значений коэффициента устойчивости экипажа от опрокидывания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 15. Dependences of the minimum values of stability factor against overturning the crew on the speed of locomotive ER20 and TE116 in a circular curve, radius of 300 m

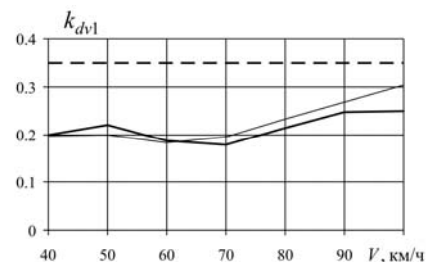


Рис. 16. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики первой ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 16. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the first stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 300 m

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

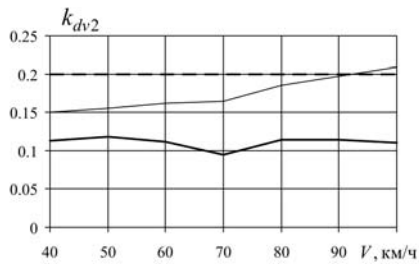


Рис. 17. Зависимости максимальных значений коэффициентов вертикальной динамики второй ступени подвешивания от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 17. Dependences of maximum values of the coefficients of the vertical dynamics of the second stage hanging on the speed of the locomotive ER20 and TE116 along a circular curve, radius of 300 m

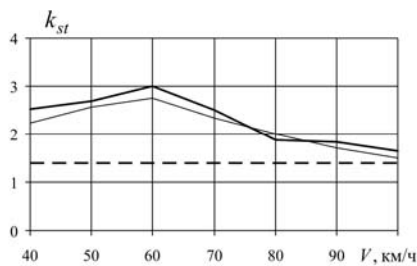


Рис. 18. Зависимости минимальных значений коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов от скорости движения локомотивов ER20 и ТЭ116 по круговой кривой радиуса 300 м

Fig. 18. Dependences of the minimum values of safety factor against derailment of the wheel from the rail on the speed of locomotive ER20 and TE116 in a circular curve, radius of 300 m

Проведенные исследования показали, что при всех рассмотренных скоростях движения, для которых допустимо движение по описанным выше круговым кривым, нормируемые динамические показатели не превышают допустимых значений.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана математическая модель пространственного движения шестиосного локомотива перспективной конструкции, учитывающая особенности его конструкции, которая может быть использована при проведении научных исследований по созданию перспективных конструкций локомотивов.

Дана оценка динамических характеристик локомотива перспективной конструкции при его движении по пути произвольного очертания.

Выводы

Оценка динамических характеристик локомотива типа ER20 показала возможность использования его на железнодорожной колее шириной 1520 мм при движении со скоростями до 140 км/ч. Естественно, это требует последующей экспериментальной проверки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грузовой тепловоз ER20 CF для Литвы // Ж.-д. мира. – 2009. – № 5. – С. 17–24.
2. Короп, Г. В. Разработка и исследование математической модели движения шестиосного локомотива с управляемой радиальной установкой колесных пар / Г. В. Короп, С. А. Ключев, Е. В. Зубарь // Вісн. СНУ ім. В. Даля. – 2013. – № 4 (193), ч. 2. – С. 65–68.
3. Лазарян, В. А. Динамика транспортных средств / В. А. Лазарян. – Киев : Наук. думка, 1985. – 528 с.
4. Маслиев, В. Г. К 50-летию создания первого отечественного тепловоза на пневматическом ресорном подвешивании / В. Г. Маслиев // Вісн. НТУ «ХПІ». Сер. : Трансп. машинобудування. – Харків, 2013. – № 32 (1005). – С. 60–66.
5. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Иккол [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1989. – 240 с.
6. Мямлин, С. В. Совершенствование конструкции ходовых частей локомотивов / С. В. Мямлин, Л. А. Недужая // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. – 2013. – № 5 (47). – С. 124–136. doi: 10.15802/stp2013/17977.
7. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – Москва : МПС РФ : ВНИИВ, 1998. – 145 с.
8. Обновление локомотивного парка Литовских железных дорог / С. Дайлидка, С. В. Мямлин, Л. П. Лингайтис [и др.] : зб. наук. пр. / ДонІЗТ. – Донецк, 2011. – Вип. 28. – С. 174–179.
9. Пономарева, Е. Тепловоз ER20 CF : особенности конструкции / Е. Пономарева // Локомотивинформ. – 2012. – № 2. – С. 12–17.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

10. Програма оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012-2016 роки : постанов Кабінету Міністрів України від 1 серпня 2011 р. №840 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show-/840-2011-%D0%BF>. – Загл. с екрана. – Проверено : 31.03.2015.
11. Радченко, Н. А. Криволинейное движение рельсовых транспортных средств / Н. А. Радченко. – Киев : Наук. думка, 1988. – 212 с.
12. Стан локомотивного парку Укрзалізниці // Магістраль. – 2012. – № 20. – С. 2.
13. Ушкалов, В. Ф. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Машенко // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. – 2013. – № 4 (46). – С. 135–144. doi: 10.15802/stp2013-16600.
14. Myamlin, S. Construction Analysis of Mechanical Parts of Locomotives / S. Myamlin, M. Luchanin, L. Neduzha // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, № 3. – P. 162–169.
15. Myamlin, S. Mathematical Modeling of a Cargo Locomotive / S. Myamlin, S. Dailidka, L. Neduzha // Transport Means : Proc. of 16th Intern. Conf. / Kaunas : Kaunas University of Technology, 2012. – P. 310–312.
16. Ushkalov, V. F. The influence of locomotives state on their wheelset wear under operation conditions / V. F. Ushkalov, O. M. Markova, E. N. Kovtun // Supplement to Vehicle System Dynamics. – 1998. – Vol. 29. – P. 18–29. doi: 10.1080/00423119808969549.

С. В. МЯМЛІН¹, Н. Ю. НАУМЕНКО², О. М. МАРКОВА³, О. М. КОВТУН⁴,
В. В. МАЛІЙ^{5*}

¹Каф. «Вагони і вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 84 98, ел. пошта sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

²Відділ «Динаміка багатомірних механічних систем», Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (056) 375 68 01, ел. пошта der7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6913-2568

³Відділ «Динаміка багатомірних механічних систем», Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (056) 375 68 03, ел. пошта der7@ukr.net, ORCID 0000-0002-9390-4046

⁴Відділ «Динаміка багатомірних механічних систем», Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 46 79 35, ел. пошта der7@ukr.net, ORCID 0000-0002-2961-3682

^{5*}Відділ «Динаміка багатомірних механічних систем», Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпропетровськ, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 46 79 35, ел. пошта der7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6501-1398

ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ШЕСТИВІСНОГО ЛОКОМОТИВА

Мета. Робота присвячена оцінці динамічних властивостей локомотива перспективної конструкції та визначенню можливості його використання на залізничних коліях України. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використані методи математичного та комп'ютерного моделювання динаміки залізничних транспортних засобів, а також методи числового інтегрування систем звичайних нелінійних рівнянь. **Результати.** Для розв'язання поставленої задачі побудована розрахункова схема локомотива на тривісних візках, яка представляє собою систему твердих тіл, з'єднаних елементами різної реології. З використанням цієї розрахункової схеми розроблено математичну модель просторового руху локомотива, яка дозволяє проводити дослідження його просторових коливань при русі по прямолінійним та криволінійним ділянкам колії із випадковими нерівностями в плані та профілі. При складанні математичної моделі приймалися до уваги як геометричні (нелінійність профілю кочення колеса), так і фізичні нелінійності системи (робота сил сухого тертя, нелінійність характеристик взаємодії коліс та рейок). За допомогою комп'ютерного моделювання проведено багатоваріантні розрахунки з метою оцінки динамічних властивостей локомотива при його русі по прямолінійним та криволінійним ділянкам колії. При цьому визначались показники плавності ходу локомотива в горизонтальній та вертикальній площинах, рамні сили, коефіцієнти вертикальної динаміки в першій та другій ступенях підвищення, коефіцієнти запасу стійкості проти сходження коліс із рейок. Крім того, проведено порівняння отриманих результатів із аналогічними характеристиками широко використовуваного

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

на залізницях України шестивісного тепловоза ТЭ116. Визначено вплив швидкості руху та технічного стану залізничної колії на безпеку руху локомотива. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель просторового руху шестивісного локомотива перспективної конструкції, що враховує особливості його конструкції, та наведена оцінка динамічних характеристик при русі екіпажа по колії довільного обрису. **Практична значимість.** Розроблена математична модель руху шестивісного локомотива може бути використана при проведенні наукових досліджень по створенню перспективних конструкцій локомотивів.

Ключові слова: рухомий склад; локомотив; математична модель; динамічні показники

S. V. MYAMLIN¹, N. YU. NAUMENKO², O. M. MARKOVA³, H. M. KOVTUN⁴,
V. V. MALIY^{5*}

¹Dep. «Car and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 776 84 98, e-mail sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

²Dep. «Dynamics of Multidimensional Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Leshko-Popelia St., 15, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 375 68 01, e-mail dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6913-2568

³Dep. «Dynamics of Multidimensional Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Leshko-Popelia St., 15, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 375 68 03, e-mail dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-9390-4046

⁴Dep. «Dynamics of Multidimensional Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Leshko-Popelia St., 15, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 46 79 35, e-mail dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-2961-3682

^{5*}Dep. «Dynamics of Multidimensional Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Leshko-Popelia St., 15, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 46 79 35, e-mail dep7@ukr.net, ORCID 0000-0002-6501-1398

EVALUATION OF DYNAMIC INDICATORS OF SIX-AXLE LOCOMOTIVE

Purpose. The paper is devoted to dynamic characteristics evaluation of the locomotive with prospective design and determination the feasibility of its use on the Ukrainian railways. **Methodology.** The methods of mathematical and computer modeling of the dynamics of railway vehicles, as well as methods for the numerical integration of systems of ordinary nonlinear differential equations were used to solve the problem. **Findings.** The calculated diagram of a locomotive on three-axle bogies was built to solve the problem, and it is a system of rigid bodies connected by various elements of rheology. The mathematical model of the locomotive movement, allowing studying its spatial vibrations at driving on straight and curved sections of the track with random irregularities in plan and profile was developed with use of this calculated diagram. At compiling the mathematical model took into account both geometric (nonlinearity profile of the wheel roll surface) and physical nonlinearity of the system (the work forces of dry friction, nonlinearity characteristics of interaction forces between wheels and rails). The multivariate calculations, which allowed assessing the dynamic qualities of the locomotive at its movement along straight and curved sections of the track, were realized with the use of computer modeling. The smoothness movement indicators of the locomotive in horizontal and vertical planes, frame strength, coefficients of vertical dynamics in the first and second stages of the suspension, the load factor of resistance against the derailment of the wheel from the rail were determined at the period of research. In addition, a comparison of the obtained results with similar characteristics is widely used on the Ukrainian railways in six-axle locomotive TE 116. The influence of speed and technical state of the track on the locomotive traffic safety was determined. **Originality.** A mathematical model of the spatial movement of a six-axle locomotive with prospective design, taking into account the peculiarities of its design was developed. Evaluation of dynamic characteristics at the carriage movement along a track of arbitrary shape was made. **Practical value.** The developed mathematical model of the six-axle locomotive movement can be used at conducting research on development of advanced locomotives designs.

Keywords: rolling stock; locomotive; mathematical model; dynamic indicators

REFERENCES

1. Gruzovoy teplovoz ER20 CF dlya Litvy [Freight locomotive ER20 CF for Lithuania]. *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the World*, 2009, no. 5, pp. 17-24.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2. Korop G.V., Klyuyev S.A., Zubar Ye.V. Razrabotka i issledovaniye matematicheskoy modeli dvizheniya sheshtiosnogo lokomotiva s upravlyayemoy radialnoy ustanovkoy kolesnykh par [Development and research of mathematical model of six-axle locomotive with a controlled radial installation of wheel pairs]. *Visnyk Shkhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl], 2013, no. 4 (193), part 2, pp. 65-68.
3. Lazaryan V.A. *Dinamika transportnykh sredstv* [The dynamics of vehicles]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1985. 528 p.
4. Masliyev V.G. K 50-letiyu sozdaniya pervogo otechestvennogo teplovoza na pnevmaticheskoy ressonnom podveshivannii [On the 50th anniversary of the first Russian locomotive on the pneumatic spring suspension]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Kharkivskoho Politekhnichnoho Instytutu* [Bulletin of National Technical University of Kharkiv Polytechnic Institute], 2013, no. 32 (1005), pp. 60-66.
5. Ushkalov V.F., Reznikov L.M., Ikkol V.S. *Matematicheskoye modelirovaniye kolebaniy relsovykh transportnykh sredstv* [Mathematical modeling of vibrations of railway vehicles]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1989. 240 p.
6. Myamlin S.V., Neduzhaya L.A. Sovershenstvovaniye konstruktssii khodovykh chastey lokomotivov [Design improvement of the locomotive running gears]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 5 (47), pp. 124-136. doi: 10.15802/stp2013/17977.
7. *Normy dlya rascheta i otsenki prochnosti nesushchikh elementov, dinamicheskikh kachestv i vozdeystviya na put ekipazhnoy chasti lokomotivov zheleznykh dorog MPS RF kolei 1520 mm* [Standards for the calculation and assessment of the strength of load-bearing elements, dynamic qualities and impact on the track of undercarriage locomotives Ministry of Railways of the Russian 1,520 mm]. Moscow, Ministerstvo putey soobshcheniya Rossiyskoy Federatsii, Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut vagonostroeniya Publ., 1998. 145 p.
8. Daylidka S., Myamlin S.V., Lingaytis L.P., Neduzhaya L.A., Yastremskas V. Obnovleniye lokomotivnogo parka Litovskikh zheleznykh dorog [Upgrading the locomotive fleet of Lithuanian Railways]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu* [Proc. of Donetsk Institute of Railway Transport], 2011, vol. 28, pp. 174-179.
9. Ponomareva Ye. Teplovoz ER20 CF: osobennosti konstruktssii [The locomotive ER20 CF: design features]. *Lokomotiv-Inform – Lokomotiv-Inform*, 2012, no. 2, pp. 12-17.
10. *Prohrama onovlennia lokomotyvnoho parku zaliznyts Ukrainy na 2012-2016 roky* [The upgrade program for railways locomotive park of Ukraine for 2012-2016]. Available at: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/840-2011-%D0%BF> (Accessed 31. 03.2015).
11. Radchenko N.A. *Krivolineynoye dvizheniye relsovykh transportnykh sredstv* [Curvilinear motion of railway vehicles]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1988. 212 p.
12. *Stan lokomotyvnoho parku Ukrzaliznytsi* [The state of railways locomotive fleet]. *Magistral – Magistral*, 2012, no. 20, p. 2.
13. Ushkalov V.F., Lapina L.G., Mashchenko I.A. Raschetnyye vozmushcheniya dlya otsenki dinamicheskikh kachestv gruzovykh vagonov [Calculated disturbances for evaluation of dynamical properties of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 4 (46), pp. 135-144. doi: 10.15802/stp2013/16600.
14. Myamlin S., Luchanin M., Neduzha L. Construction Analysis of Mechanical Parts of Locomotives. *TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*, 2013, vol. 13, no. 3, pp. 162-169.
15. Myamlin S., Dailidka S., Neduzha L. Mathematical Modeling of a Cargo Locomotive. Proc. of 16th Intern. Conf. Transport Means 2012, Kaunas, 2012, pp. 310-312.
16. Ushkalov V.F., Markova O.M., Kovtun E.N. The influence of locomotives state on their wheelset wear under operation conditions. *Supplement to Vehicle System Dynamics*, 1998, vol. 29, pp. 18-29. doi: 10.1080/00423119808969549.

Статья рекомендована к публикации д.т.н. В. Л. Горобцом (Украина)

Поступила в редколлегию 03.02.2015

Принята к печати 20.04.2015

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.014.27-422.12/.13

В. В. КОВАЛЬЧУК^{1*}

^{1*}Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, ел. пошта kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0003-4350-1756

ВПЛИВ ТОВЩИНИ ГОФРОВАНОГО ЕЛЕМЕНТА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНІХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. В роботі передбачається проведення досліджень напружено-деформованого стану та розрахунку відносних деформацій вертикального та горизонтального діаметрів металевих гофрованих конструкцій (МГК) типу горизонтальний еліпс поперечного перерізу при їх взаємодії із ґрунтом засипки в залежності від товщини металевої гофрованої труби. Такі дослідження необхідні для оптимального проектування МГК, встановлення причин появи дефектів, своєчасного прийняття відповідних інженерних рішень із метою підвищення несучої здатності МГК та обґрунтованого використання коштів на їх будівництво або реконструкцію існуючих транспортних споруд із застосуванням металевих гофрованих труб. **Методика.** Розрахунки напружень та стійкості форми МГК проведено за допомогою розробленого математичного алгоритму в програмному середовищі Mathcad 14. У ході досліджень задавалися різні товщини металевої гофрованої труби; і подальші розрахунки проводились при проектному значенні ступеня ущільнення ґрунтової засипки та величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниць. **Результати.** Із проведених розрахунків встановлено, що найбільший вплив товщина металевої гофрованої труби має на міцність при розрахунку за нормальними напруженнями та на величину відносних вертикальних деформацій труби. Тому розрахунковими параметрами при проектуванні металевих гофрованих конструкцій із невеликими висотами засипки (від 1,2 м до 3 м) над її вершиною є розрахунок міцності за нормальними напруженнями та розрахунок із визначення відносних вертикальних деформацій труби. **Наукова новизна.** Вперше проведені розрахунки напружено-деформованого стану та відносних деформацій вертикального і горизонтального діаметрів МГК поперечного перерізу типу горизонтальний еліпс при взаємодії із ґрунтом засипки. При цьому було враховано комплекс факторів – ступінь ущільнення ґрунтової засипки, величина динамічного навантаження від рухомого складу залізниць та різна товщина металевої гофрованої труби. **Практична значимість.** Отримані результати напружено-деформованого стану металевих гофрованих конструкцій типу горизонтальний еліпс поперечного перетину можуть бути використані інженерами Мостовипробувальних станцій Укрзалізниці та Укравтодору, а також проектними організаціями, які займаються проектуванням металевих гофрованих конструкцій.

Ключові слова: металева гофрована конструкція; товщина металевої гофрованої труби; ступінь ущільнення ґрунтової засипки; динамічне навантаження; відносні деформації; напруження; міцність; стійкість

Вступ

Металеві гофровані конструкції є перспективними транспортними спорудами під час будівництва нових та реконструкції існуючих

транспортних споруд, таких як малі балочні мости, залізобетонні та кам'яні труби. А також вони є невід'ємною складовою при ліквідації паводкових наслідків підмиву залізничних та

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

автомобільних доріг. Перші гофровані конструкції почали застосовувати за кордоном, спочатку в Росії, а потім у США ще в позаминулому столітті. Зокрема, петербурзький металевий завод запропонував їх використання ще в 1875 році, як альтернативу дерев'яним водопропускним спорудам на залізницях [1–2].

До 1901 р. гофрований метал для труб отвори 0,64–1,07 м застосовували із сортаментів: 37х15 і 68х34 мм з товщиною листа 1,0 і 1,2 мм. З такого металу було побудовано 524 водопропускних споруди. Пізніше під час будівництва Оренбург-Ташкентської залізничної дороги для труб тих же отворів був застосований метал іншого сортаменту: 60х16 мм і 100х50 мм з товщиною листа в 1,2 і 1,6 мм. Всі металеві труби, укладені на залізницях Росії наприкінці XIX століття, мали круглий обрис.

У період з 1900 до 1912 рр. в Росії було укладено кілька тисяч металевих гофрованих труб [1–2]. Однак перший досвід експлуатації труб виявив їх низьку експлуатаційну надійність. Значна частина труб отримала пошкодження у вигляді випучування частини конструкції всередину труби. Це викликало необхідність масового обстеження стану гофрованих труб на залізницях Росії. Таке обстеження було виконано в 1913 р. [6]. При цьому було обстежено понад 60 000 пог. м водопропускних труб, побудованих у 1885–1913 рр., термін служби яких сягав 28 років. Найбільша кількість споруд з різними дефектами була виявлена на Оренбург-Ташкентській залізниці, де обстежено 13 300 пог. м труб. За порівняно короткий термін служби (14 років) до моменту обстеження дефектними виявилися 30 % труб, з них 21 % мали недопустимий прогин і просідання, а 9 % – сильно пошкоджені корозією.

Аналогічна ситуація була під час будівництва МГК у США та Канаді [11, 16]. Перші труби малого діаметра з товщиною металевих листа біля 1 мм почали вкладатися в 1896 р. спочатку при будівництві залізниць, а потім автомобільних доріг. Поширення гофрованих труб в США і Канаді в якості водопропускних споруд супроводжувалося великою кількістю досліджень. Так, асоціація американських залізничних інженерів (AREA) в 1953 р. опублікувала дані за результатами обстеження стану 300 водопропускних металевих труб діаметром від 1,52 м і більше. За виконаними в США обстеженнями було встановлено, що

надійність і стійкості тонкостінних металевих труб забезпечується тільки у разі дотримання правил якісної рівномірної засипки і проектного ущільнення ґрунту засипки. Під час будівництва багатоочкових водопропускних труб були виявлені їх дефекти, які пояснювалися складністю ущільнення ґрунту між трубами. Через те в нормах США обмежена мінімальна відстань між трубами [5, 9, 11, 14].

Під час Другої світової війни і в наступні роки металеві гофровані труби знайшли своє застосування як тимчасові штучні споруди під час відновлення та будівництва транспортних споруд з обмеженим строком експлуатації.

В цей час у зв'язку з удосконаленням виготовлення самих гофрованих елементів і технології засипки з'явилася можливість використання подібних конструкцій в капітальному будівництві як для пропуску води (труби до 3 м), так і як альтернатива малим мостам (труби з прольотом 6 м і більше).

Таке розширення сфери застосування МГК не мало наукового і нормативного забезпечення. Наявні нормативні документи [1, 5] стосувалися тільки круглих труб діаметром до 3 м і засновані на розрахунковому аналізі деформацій труб при спрощених гіпотезах про тиск ґрунту на трубу.

В Україні МГК почали застосовувати, в основному, з середини 90-х років [5]. Такі конструкції використані під час будівництва транспортних розв'язок та перепуску водотоків в АР Крим на автомобільній дорозі Київ – Одеса, Харків – Сімферополь та ін.; на Укрзалізниці споруджено МГК на дільниці Вадул Сирет – Держкордон.

Таким чином, досвід застосування МГК в ґрунтовому середовищі переконливо показав, що розглянуті конструкції при їх позитивних властивостях характеризуються відносно низькою надійністю і довговічністю. У процесі експлуатації у багатьох випадках спостерігається зростання недопустимих деформацій, а саме збільшення горизонтального та зменшення вертикального діаметрів труби. Для виключення недопустимих деформацій труб необхідно у подальшому розвинути методи розрахунку МГК, які працюють спільно з ґрунтом засипки, що дозволяють прогнозувати міцність і довговічність МГК.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Мета

Сучасні дослідження напружено-деформованого стану МГК, які здійснюються за кордоном (в Україні взагалі відсутні) спрямовані на встановлення причин появи дефектів МГК арочного типу залежно від ступеня ущільнення ґрунтової засипки. Однак вплив товщини металевої гофрованої труби на міцність та стійкість металевих гофрованих конструкцій овоїдального поперечного перерізу (типу горизонтальний еліпс) вивчений та досліджений недостатньо. Тому необхідно виконати дослідження впливу товщини металевої гофрованої труби на міцність та стійкість металевої гофрованої конструкції під час дії на неї рухомого складу залізниць.

Методика

У роботах [2, 3, 5, 6] зазначено, що для оптимального проектування металевих гофрованих конструкцій необхідно враховувати вплив товщини металевого гофрованого листа на міцність і стійкість всієї конструкції [7, 8]. У результаті виконаних досліджень міцності МГК арочного типу залежно від товщини металевого гофрованого листа встановлено, що найбільше впливає товщина металевого листа на напружений стан конструкції та вертикальні деформації МГК.

Для виконання досліджень, які зазначені у меті роботи, використовується металева гофрована труба конструкції Multiplate MP 150 у формі горизонтального еліпсу (рис. 1) з такими

параметрами: внутрішнім вертикальним діаметром 6,20 м, внутрішнім горизонтальним діаметром 6,57 м, довжиною хвилі гофри 150 мм, висотою хвилі гофри 50 мм, питомою вагою ґрунту засипки – $\gamma=20 \text{ кН/м}^3$; модулем деформації ґрунту засипки – $E_0=33 \text{ МПа}$; відстанню від підшоши рейки до верху склепіння труби – $h=1,88 \text{ м}$; модулем пружності сталі – $E=2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коефіцієнтом Пуассона матеріалу споруди – $\nu=0,25$; питомою вагою матеріалу МГК – $\gamma_{sh}=145,4 \text{ кН/м}^2$; площею перерізу однієї хвилі гофри – $A=11,355 \text{ см}^2$; розрахунковим опором сталі за межею текучості – $R_y=235 \text{ МПа}$; коефіцієнтом умов роботи – $m=0,9$.

Товщини металевих гофрованих листів труби були прийнятими такими: 3 мм, 4 мм, 5 мм, 6 мм, 7 мм та 8 мм.

Розрахунки напружено-деформованого стану металевої гофрованої конструкції виконано за допомогою методу Петерсона [14] у програмному комплексі Matchad 11.

Навантаження на МГК змінювали таким чином: навантаження від власної ваги труби, засипки, шару щебеню та рейко-шпальної решітки залишали незмінними, показник R_P (ступінь ущільнення ґрунтової засипки) приймали рівним 0,97. Динамічне навантаження на шпали від рухомого складу пропорційно збільшували і перераховували відповідні напруження у точках контуру перерізу труби. Розподіл навантажень по шпалах вздовж колії отримали із розрахунків колії на міцність [4, 9–19].

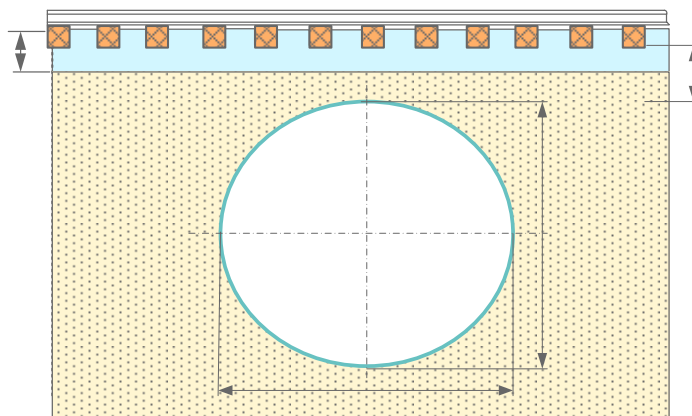


Рис. 1. Розрахункова схема до розрахунку міцності металевих гофрованих конструкцій поперечного перерізу типу горизонтальний еліпс

Fig. 1. Design model to calculate the strength of corrugated metal structures of horizontal cross-sectional ellipse

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

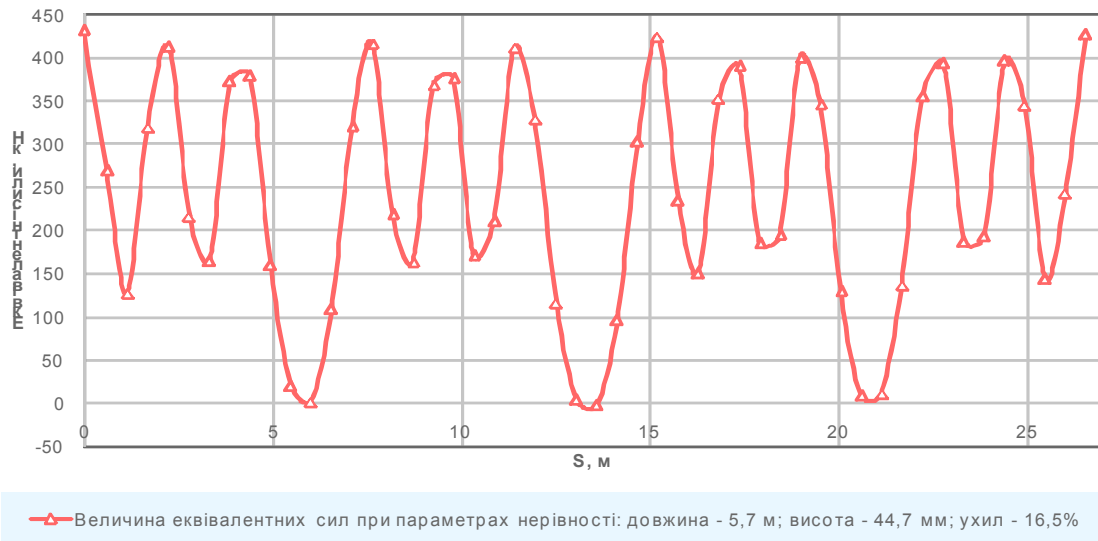


Рис. 2. Величина еквівалентних сил від локомотива 2М62 при значенні модуля пружності підрейкової основи 92,1 МПа

Fig. 2. The value of the equivalent force from a locomotive 2M62 at the value of the elasticity modulus of under-rail bases of 92.1 MPa

Результати

Результати еквівалентних сил, отриманих від локомотива 2М62, наведені на рис. 2.

Числові розрахунки еквівалентних сил показали, що максимальні сили досягають значення до 450 кН, при таких параметрах нерівності: довжині – 5,7 м, висоті – 44,7 мм та ухилі – 16,5 %.

Для отримання значень напружень та відносних деформацій вертикального та горизонтального діаметрів металевих гофрованих конструкцій залежно від товщини металевої гофрованої труби було розроблено програмне забезпечення із використанням математичного апарату Mathcad 14.

За отриманими значеннями еквівалентних сил розраховуємо максимальні напруження в стінці труби, використовуючи рівняння Нав'є:

$$\sigma = \frac{N_{d.s}}{A} + \frac{M_{d.s}}{W} < f_{yd}, \quad (1)$$

де $N_{d.s}$, $M_{d.s}$ – сили та моменти сил у стані нормальної експлуатації; A – площа поперечного перерізу та момент опору перерізу на одини-

цю довжини труби; f_{yd} – границя текучості сталі труби; W – момент опору одиниці довжини труби.

Відносні зміни вертикального та горизонтального діаметрів металевої гофрованої труби розраховуємо за формулою:

$$\varsigma = \frac{\gamma \cdot (h + R)}{\frac{\delta}{R} + \frac{E_0}{E} (1 - \nu^2)}, \quad (2)$$

де R – радіус споруди; E_0 – модуль деформації ґрунту засипки, Па; E – модуль пружності сталі, Па; δ – товщина металевої гофрованої труби; $\nu=0,25$ – коефіцієнт Пуассона матеріалу споруди; γ – питома вага матеріалу споруди, Н/м³, h – висота засипки над вершиною металевої гофрованої труби (починаючи вимір від підшви шпал, див. рис.1).

Результати розрахунків напружень та відносних вертикальних і горизонтальних деформацій МГК наведені у табл. 1 та рис. 3.

Таблиця 1

Table 1

Результати розрахунку нормальних напружень та відносних деформацій МГК

The calculation results of normal stresses and relative deformations in corrugated metal structures

Розрахункові параметри	Товщина металевої гофрованої труби, мм						
	3	4	5	6	7	8	9
Напруження, МПа	186,509	173,364	161,707	151,807	143,416	136,25	130,072
Відносна вертикальна деформація МГК, %	3,7	2,78	2,24	1,86	1,6	1,4	1,24
Відносна горизонтальна деформація МГК, %	4,06	3,06	2,45	2,04	1,75	1,53	1,36

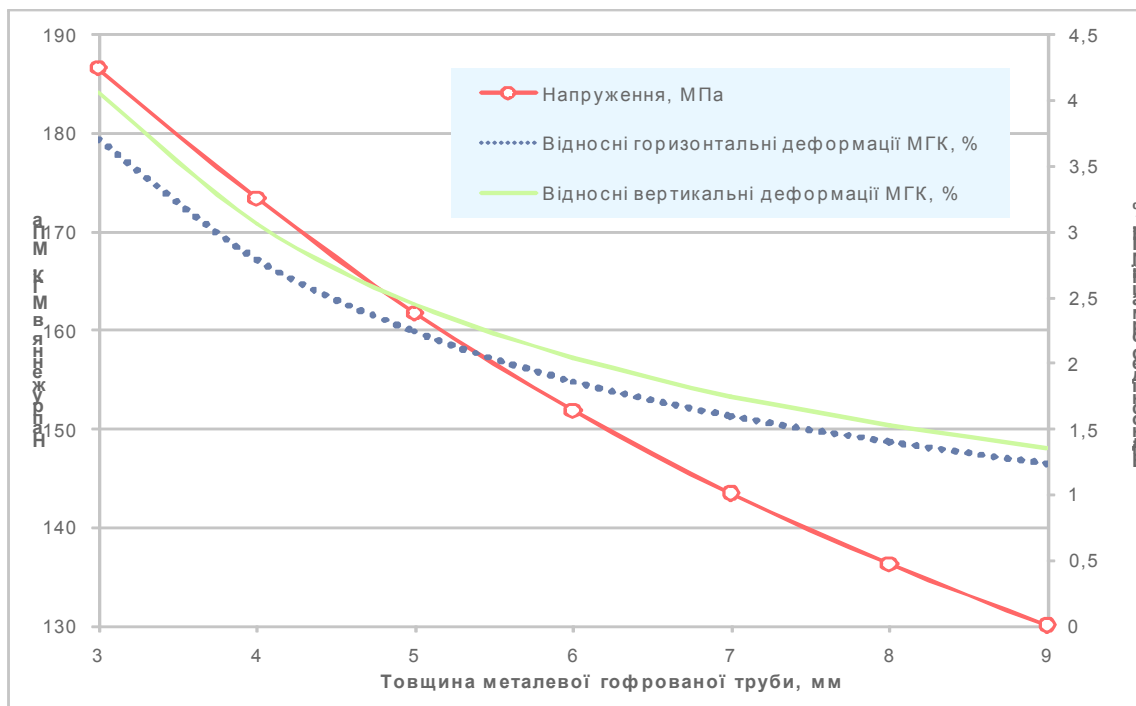


Рис. 3. Графік нормальних напружень та відносних деформацій МГК

Fig. 3. Graph of the normal stress and relative deformations of corrugated metal structures

Отримані результати напружень показали (див. табл. 1 та рис. 3), що міцність елементів металевої гофрованої конструкції, яка виконана із гофрованої структури Multiplate MP150 із розміром хвилі гофри 150x50 мм, забезпечена при всіх досліджуваних товщинах металевої гофрованої труби при дії найбільш несприятливого навантаження від рухомого складу залізниць.

Умова обмеження граничних відносних деформацій вертикального та горизонтального діаметрів труби виконується при всіх товщинах

металевої гофрованої труби, тобто не перевищує 5 %.

Наукова новизна та практична значимість

Автором вперше виконані аналітичні дослідження напружено-деформованого стану та відносних деформацій вертикального і горизонтального діаметрів МГК поперечного перерізу типу горизонтальний еліпс при взаємодії з ґрунтом засипки із врахуванням комплексу факторів – ступеня ущільнення ґрунтової засипки,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

величини динамічного навантаження від рухомого складу залізниць та різній товщині металевої гофрованої труби. У результаті виконаних досліджень встановлено, що при проектному ущільненні ґрунтової засипки, яке становить 97 % по методу Проктора, критерій міцності та відносні вертикальні деформації металевої гофрованої труби забезпечуються навіть при товщині металу 3 мм.

Отримані результати напружено-деформованого стану та відносних деформацій горизонтального та вертикального діаметрів металевих гофрованих конструкцій типу горизонтальний еліпс поперечного перерізу, можуть бути використані інженерами Мостовипробувних станцій Укрзалізниці та Укравтодору та проектними організаціями, які займаються проектуванням металевих гофрованих конструкцій.

Висновки

Із виконаних досліджень випливає, що розрахунковими параметрами під час проектування металевих гофрованих труб з невеликими висотами засипки (від 1,2 до 3,0 м) над вершиною металевої гофрованої труби є розрахунок міцності за нормальними напруженнями і розрахунок із визначення відносних вертикальних деформацій труби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ВСН 176-78. Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб : [утв. Минтрансстроем СССР и МПС СССР от 15 авг. 1978 г.]. – Москва : Оргтрансстрой, 1979. – 131 с.
2. Герцог, А. А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах / А. А. Герцог. – Москва : Гущосдор, 1939. – 112 с.
3. Гнедовский, В. Н. Трубы под железнодорожными насыпями / В. Н. Гнедовский. – Москва : Трансжелдориздат, 1938. – 267 с.
4. Даніленко, Е. І. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 / Е. І. Даніленко, В. В. Рибкін. – Київ : Трансп. України, 2006. – 168 с.
5. Коваль, П. М. Нормування при проектуванні і будівництві споруд з металевих гофрованих конструкцій / П. М. Коваль, І. П. Баб'як, Т. М. Сітдикова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту зал. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 33. – С. 114–117.
6. Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н. М. Колоколов, О. А. Янковский, К. Б. Щербина, С. Э. Черняховская. – Москва : Транспорт, 1973. – 120 с.
7. Новодзинский, А. Л. Учет влияния толщины гофрированного элемента на прочность и устойчивость металлической водопропускной трубы / А. Л. Новодзинский, В. И. Клевеко // Вестн. ПНИПУ. Стр-во и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 81–94.
8. Esmaeili, M. Minimum depth of soil cover above long-span soil-steel railway bridges / M. Esmaeili, J. Ali Zakeri, P. H. Abdulrazagh // Intern. J. of Advanced Structural Engineering. – 2013. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 1–7. doi:10.1186/2008-6695-5-7.
9. Handbook of steel drainage and highway construction products. – Ontario : Corrugated Steel Pipe Inst., 2002. – 470 p.
10. Kunecki, B. Zachowanie sie ortotropowych powlok walcowych w osrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciazeniem zewnetrznym : Rozprawa doktorska / B. Kunecki. – Wroclaw : Instytut budownictwa Politechniki Wroclawskiej. Raport serii PRE. – 2006. – № 14. – 199 p.
11. Long-term behavior of large-span culverts in cohesive soils / M. C. McVay, P. Papadopoulos, D. Bloomquist, F. C. Townsend // Transportation Research Board. – 1993. – № 1415. – P. 40–46.
12. Machelski, Cz. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych / Cz. Machelski – Wroclaw : Dolnoslaskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2008. – 208 p.
13. Modeling the Dynamic Failure of Railroad tank cars using a physically motivated internal state variable plasticity/damage nonlocal model / F. R. Ahad, K. Enakoutsu, K. N. Solanki [et al.] // Modelling and Simulation in Engineering. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1–11. doi: 10.1155/2013-/815158.
14. Pettersson, L. Design of soil steel composite bridges / L. Pettersson, H. Sundquist. – Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2007. – 98 p.
15. Saat, M. R. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety / M. R. Saat, C. P. L. Barkan // J. of Hazardous Materials. – 2011. – № 189 (1–2). – P. 62–68. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.01.136.
16. Scientific evidence for walls fastening technologies of working trench by the special method «Slurry wall» for shallow subways stations / S. V. Borchevskiy, V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin [et. all] // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- залізн. трансп. – 2014. – № 6 (54). – С. 154–163. doi: 10.15802/stp2014/33740.
17. Sharma, S. Evaluation of culvert deformations using the finite element method / S. Sharma, J. H. Hardcastle // Transportation Research Board. – 1993. – № 1415. – P. 32–39.
 18. Weltschev, M. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage / M. Weltschev, S. Schwarzer, F. Otremba // Chem. Engineering Transactions. – 2013. – № 31. – P. 559–564.
 19. Wysokowski, A. Mostowe konstrukcje gruntowo – powłokowe. Laboratoryjne badania niszczone. Awary w czasie budowy i eksploatacji / A. Wysokowski, L. Janusz // Zapobieganie-Diagnostyka-Naprawy-Rekonstrukcje : XXIII Konferencja Naukowa-Techniczna Awary Budowlane (23.05.–26.05.2007). – Szczecin-Międzyzdroje, 2007. – P. 541–550.

В. В. КОВАЛЬЧУК^{1*}

^{1*}Каф. «Подвижной состав и путь», Львовський філіал Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. +38 (097) 223 72 43, ел. пошта kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0003-4350-1756

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ГОФРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель. В работе предусматривается проведение исследований напряженно-деформированного состояния и расчета относительных деформаций вертикального и горизонтального диаметров металлических гофрированных конструкций (МГК) типа горизонтальный эллипс поперечного сечения при их взаимодействии с почвой засыпки в зависимости от толщины металлической гофрированной трубы. Такие исследования необходимы для оптимального проектирования МГК, установления причин появления дефектов, своевременного принятия соответствующих инженерных решений с целью повышения несущей способности МГК и обоснованного использования средств на их строительство или реконструкцию существующих транспортных сооружений с применением металлических гофрированных труб. **Методика.** Расчеты напряжений и устойчивости формы МГК проведены с помощью разработанного математического алгоритма в программной среде Mathcad 14. В ходе исследований задавались различные толщины металлической гофрированной трубы; и дальнейшие расчеты проводились при проектном значении степени уплотнения грунтовой засыпки и величины динамической нагрузки от подвижного состава железных дорог. **Результаты.** Из проведенных расчетов установлено, что наибольшее влияние толщина металлической гофрированной трубы имеет на прочность при расчете по нормальным напряжениям и на величину относительных вертикальных деформаций трубы. Поэтому расчетными параметрами при проектировании металлических гофрированных конструкций с небольшими высотами засыпки (от 1,2 м до 3 м) над ее вершиной является расчет прочности по нормальным напряжениям и расчет по определению относительных вертикальных деформаций трубы. **Научная новизна.** Впервые проведены расчеты напряженно-деформированного состояния и относительных деформаций вертикального и горизонтального диаметров МГК поперечного сечения типа горизонтальный эллипс при взаимодействии с почвой засыпки. При этом был учтен комплекс факторов – степень уплотнения грунтовой засыпки, величина динамической нагрузки от подвижного состава железных дорог и разная толщина металлической гофрированной трубы. **Практическая значимость.** Полученные результаты напряженно-деформированного состояния металлических гофрированных конструкций типа горизонтальный эллипс поперечного сечения могут быть использованы инженерами Мостоисследовательских станций Укрзалізнички и Укравтодора, а также проектными организациями, которые занимаются проектированием металлических гофрированных конструкций.

Ключевые слова: металлическая гофрированная конструкция; толщина металлической гофрированной трубы; степень уплотнения почвенной засыпки; динамическая нагрузка; относительные деформации; напряжение; прочность; устойчивость

V. V. KOVALCHUK^{1*}

^{1*}Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv branch of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych St., 12a, Lviv, Ukraine, 79052, tel. +38 (097) 223 72 43,
e-mail kovalchuk.diit@mail.ru, ORCID 0000-0003-4350-1756

THE EFFECT OF CORRUGATED ELEMENTS THICKNESS ON THE DEFLECTED MODE OF CORRUGATED METAL STRUCTURES

Purpose. The work provides research the deflected mode and calculation the relative deformation of vertical and horizontal diameters of corrugated metal structures (CMS), horizontal ellipse type, and cross section in their interaction with soil backfill depending on the thickness of corrugated metal pipe. Such studies are required for optimal design of CMS, establishing the causes of defects timely, appropriate engineering solutions to improve the bearing capacity of the CMS and reasonable use of funds for their construction or rehabilitation of existing transportation facilities using corrugated metal pipes. **Methodology.** Stresses and stability calculations of CMS form are conducted using the developed mathematical algorithm in program environment Mathcad 14. In these studies different thickness of corrugated metal pipe were assigned, and further calculations were carried out at the design value of backfill soil compaction degree and magnitude of dynamic loading of railway transport. **Findings.** From the calculations is determined that the most influence the thickness of the corrugated metal pipe has on the strength in the calculation of the normal stresses and value of the vertical pipe strains. Therefore, the calculated parameters in the design of corrugated metal structures with small filling heights (from 1.2 m to 3 m) above its peak is calculation of the strength by the normal stresses and determination of the vertical deformation of the pipe. **Originality.** For the first time, calculations of the deflected mode and relative deformations of vertical and horizontal cross-sectional diameters of CMS, horizontal ellipse type in the interaction with soil backfill. The factors complex was taken into account – the backfill soil compaction degree, the value of dynamic loading of railway transport and different thickness of corrugated metal pipe. **Practical value.** The results of the deflected mode of corrugated metal structures such as horizontal ellipse of cross sections can be used by engineers in the bridge probation stations of Railways of Ukraine and Ukravtodor, in the project organizations involved in the design of corrugated metal structures.

Keywords: corrugated metal construction; corrugated metal pipe thickness; backfill soil compaction degree; dynamic loading; relative deformations; strain; stress; strength; stability

REFERENCE

1. VSN 176-78. *Instruktsiya po proyektirovaniyu i postroyke metallicheskih gofrirovannykh vodopropusknykh trub* [VSN 176-78. Instructions for design and construction of corrugated metal pipe culverts]. Moscow, Orgtransstroy Publ., 1979. 131 p.
2. Gertsog A.A. *Gofrirovannyye truby na avtomobilnykh dorogakh* [Corrugated pipes on the roads]. Moscow, Gushosdor Publ., 1939. 112 p.
3. Gnedovskiy V.N. *Truby pod zheleznodorozhnyimi nasypami* [Pipes under the railway embankments]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1938. 267 p.
4. Danilenko E.I., Rybkin V.V. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist. TsP-0117* [Terms of railway line calculations for strength and stability. TsP -0117]. Kyiv, Transport Ukrainy Publ., 2006. 168 p.
5. Koval P.M., Babyak I.P., Sitdyikova T.M. Normuvannia pry proektuvanni i budivnytstvi sporud z metalevykh hofrovanykh konstruksii [Normalization of the design and construction of buildings of corrugated metal structures]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, no. 33, pp. 114-117.
6. Kolokolov N.M., Yankovskiy O.A., Shcherbina K.B., Chernyakhovskaya S.E. *Metallicheskiye gofrirovannyye truby pod nasypami* [Metal corrugated pipes under the embankment]. Moscow, Transport Publ., 1973. 120 p.
7. Novodzinskiy A.L., Kleveko V.I. Uchet vliyaniya tolshchiny goforovannogo elementa na prochnost i ustoychivost metallicheskoj vodopropusknoy truby [Consideration of the influence of the corrugated element thickness on the strength and stability of metal culverts]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Perm State National Research Polytechnic University. Construction and Architecture], 2012, no. 1, pp. 81-94.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

8. Esmaeili M., Ali Zakeri J., Abdulrazagh P.H. Minimum depth of soil cover above long-span soil-steel railway bridges. *Intern. Journal of Advanced Structural Engineering*, 2013, vol. 5, issue 1, pp. 1-7. doi:10.1186/2008-6695-5-7.
9. Handbook of steel drainage and highway construction products. American Iron and Steel Institute. Canada, CSPI Publ., 2002. 470 p.
10. Kunecki B. *Zachowanie sie ortotropowych powlok walcowych w osrodku gruntowym pod statycznym i dynamicznym obciazeniem zewnetrznym: Rozprawa doktorska*. Instytut budownictwa Politechniki Wroclawskiej. Raport serii PRE № 14/2006, Wroclaw, 2006. 199 p.
11. McVay M.C., Papadopoulos P., Bloomquist D., Townsend F.C. Long-term behavior of large-span culverts in cohesive soils. *Transportation Research Board*, 1993, no. 1415, pp. 40-46.
12. Machelski Cz. Modelowanie mostowych konstrukcji gruntowo-powlokowych. Wroclaw, Dolnoslaskie Wydawnictwo Edukacyjne Publ., 2008. 208 p.
13. Ahad F.R., Enakoutsa K., Solanki K.N., Tjiptowidjojo Y., Bammann D.J. Modeling the Dynamic Failure of Railroad tank cars using a physically motivated internal state variable plasticity/damage nonlocal model. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2013, vol. 2013, pp. 1-11. doi: 10.1155/2013/815158.
14. Pettersson L., Sundquist H. Design of soil steel composite bridges. Stockholm, KTH Royal Institute of Technology Publ., 2007. 98 p.
15. Saat M.R., Barkan C.P.L. Generalized railway tank car safety design optimization for hazardous materials transport: Addressing the trade-off between transportation efficiency and safety. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, no. 189 (1-2), pp. 62-68. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.01.136.
16. Borschevskiy S.V., Petrenko V.D., Tiutkin O.L., Kulazhenko Ye.Yu., Kulazhenko O.M. Scientific evidence for walls fastening technologies of working trench by the special method «Slurry wall» for shallow subways stations. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 6 (54), pp. 154-163. doi 10.15802/stp2014/33740.
17. Sharma S., Hardcastle J.H. Evaluation of culvert deformations using the finite element method. *Transportation Research Board*. Washington, 1993, no. 1415, pp. 32-39.
18. Weltshev M., Schwarzer S., Otremba F. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage. *Chem. Engineering Transactions*, 2013, no. 31, pp. 559-564.
19. Wysokowski A., Janusz L. Mostowe konstrukcje gruntowo – powlokowe. Laboratoryjne badania niszczone. Awarie w czasie budowy i eksploatacji. *Zapobieganie-Diagnostyka-Naprawy-Rekonstrukcje XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna (23.05.–26.05.2007)*. Szczecin-Miedzyzdroje, 2007, pp. 541-550.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Й. Й. Лучком (Україна); д.фіз-мат.н., проф. М. І. Стоділкою (Україна)

Надійшла до редколегії 20.03.2015

Прийнята до друку 11.06.2015

РОЗВИТОК ВИЩОЇ ШКОЛИ

UDC [811.111.378.091.33-027.22]:004.77

K. M. PERERVA^{1*}

^{1*}Dep. «Foreign Languages», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 24, e-mail cat.pererva@yandex.ua, ORCID 0000-0002-9154-9407

WEB-QUESTS IN THE ENGLISH LANGUAGE STUDYING AND TEACHING AS A VALUABLE RESOURCE AND EFFECTIVE TOOL

Purpose. This paper is a study of innovative methods of learning and teaching English with the help of Internet resources and students motivation to seek the necessary information at homework. **Methodology.** The main principle of the Web-Quest as a type of English language teaching is to motivate students. For example, by participation in the Web-Quest students, who were unsure of their knowledge, become more confident. Having clear goals and objectives, using computer skills, motivated young people more actively acts as a confident user of English. **Findings.** According to the technology of Web-Quests students were asked to create one or more projects directly related to the successful execution of the work. It is a significant result of all the hard work of students, and it is the subject of evaluation. Evaluation is an essential component of Web-Quest or any other project, and from this point of view, the criteria should be clear and accessible to students from the very beginning. These instructions can and should be changed in order to differentiate and provide an oral presentation and written work. **Originality.** Basically, Web-Quests are mini-projects in which a higher percentage of the material obtained from the Internet. They can be created by teachers or students, depending on the type of training work. The author detailed the increase of possibilities in the search of Internet projects with other creative types of student work. They may include: review of the literature, essay writing, discussion of read works and other. **Practical value.** The paper confirmed that the roles and tasks, reflecting the real world, invites to cooperate, stimulate and train the thinking process at a higher level. That is why the use of Web-Quests can improve the language skills of the educational process (reading for information extraction, detailed reading, negotiations, oral and written communication, and other).

Keywords: Web-Quest; Internet resources; information search; learners; foreign language studying; activity; motivation; assignment; knowledge and skills; foreign language teaching

Introduction

Web-Quests as a valuable resource and efficient tool in studying and teaching English is being widely used around the world since they were developed in 1995 by Dr. Bernie Dodge at San Diego State University with early input from SDSU/Pacific Bell Fellow Tom March, the Educational Technology staff at San Diego Unified School District working with classroom teachers. Since those days, their idea is that thousands of

teachers have embraced Web-Quests as a way to make good use of the internet while engaging their students in the kinds of thinking that the 21st century requires. The model has spread around the world.

According to the author's method, a Web-Quest is an oriented tool for students in the format in which most information that learners work with comes from the web. [1, 2, 3, 4, 5]. A Web-Quest traditionally has 6 parts: Introduction; Task; Process; Evaluation; Conclusion; Credits. Those parts can be differed in some cases, but this basic

РОЗВИТОК ВИЩОЇ ШКОЛИ

framework developed by Dodge and March is the basis for almost all of Web-Quests that have been created. [7, 8, 12, 13, 14]

The «*Web-Quest*» definition has been refined over the years, and adapted for various different disciplines. Philip Benz describes a Web-quest as *a constructivist approach to learning*, where with the proper guidance and «scaffolding» students can accomplish far more actual learning than in traditional transmission-of-knowledge situations. To his mind students not only gather information together, examine it carefully, compare and organize what they've found on the web, they orient their activities towards a specific goal they've been given, often associated with one or more roles modeled on adult professions [6].

Purpose

The research is guided to direct the reader, with little or no training or experience in this medium as a language learning tool to one particularly engaging and wide-ranging option available, using the Internet which is both learner-centered and teacher-active. An option potentially involves learners' in practice of all skills and systems in English, while at the same time promoting learner independence and collaboration. In language teaching circles, this is known as a Web-Quest.

Methodology

Since those beginning days, thousands of teachers have embraced Web-Quests as a way to make good use of the internet while engaging their students in the kinds of thinking that the 21st century requires. So there is a clearly defined structure for these activities which should only really be taken as a basic guideline and everybody should design his/her Web-quests to suit the needs and learning styles of his/her students [10, 11, 12]. There are usually from four to six main basic components of an average Web-Quest:

1. The Introduction stage is usually used to introduce the overall theme of the Web-quest. It includes giving background information on the topic and, in the language learning context, often presents basic vocabulary and concepts which learners will need to understand in order to fulfill the assignment involved. The instructor should set the stage for the activity, catch the learner's attention,

draw them into the quest and provide background information [6].

The Task section of the Web-quest explains clearly and precisely what the learners will have to do as they work their way through the Web-quest. The task should obviously be highly motivating and interesting for the students, and strongly connected with a real-life situation.[6,16,17] This often involves the learners in a particular amount of role-play within a given situation (e.g. they find the approximate fare of a ticket between two certain cities or towns; information about the types of restaurants, a school social organizer has to organize a trip for his class to an English-speaking country; a travel agent needs to organize a conference in London; he needs to know real data that helps him to figure out how things are (companies, bookings, prices, attractions, entertainment, Internet browsing and search skills and more are presented) in real life; learners choose the appropriate class of the airplane among different ones according to the services provided on board, exchange the information concerning the onboard services on a train which ones are desired, such as «catering», «type of sleeper» or various other requests that can be found in the online booking form etc. [15]). Besides it should be in place here to state what the students will be required to do, to avoid surprises down the road, to detail what products will be expected and the tools that are to be used to produce them. The point is the formal description of what the students will produce in the Web-Quest. The task should be meaningful and fun. Creating it is the most difficult and creative part of developing a Web-Quest [6].

The Process part of a Web-quest directs the learners through many activities and research tasks, using a lot of predefined resources. These resources are the best web-based, and are usually presented in a clickable form within the task document. In the case of a language-based Web-quest, the Process stage of the Web-quest may introduce (or reproduce) lexical areas or grammatical issues which are important to the Task. Besides it will usually have one (or sometimes several) 'materials' which the learners are supposed to present at the end. They will often be the basis of the Evaluation stage. In this part a step-by-step description, concise and clearly laid out should be given; links to Internet sites interwoven within the

РОЗВИТОК ВИЩОЇ ШКОЛИ

steps are to be provided. The students should accomplish the task. It is frequently profitable to reinforce the written process with some demonstrations [8, 9].

The Evaluation stage can involve learners in self-evaluation, comparing and contrasting what they have created with co-learners and giving feedback on what they feel they have known, achieved, etc. A great importance is the way in which the students' performance will be evaluated. The standards should be fair, clear, consistent, and specific to the tasks set [8]. It will also include a teacher's evaluation and good Web-quests will provide direction to the teacher for this particular part of the process, display a set of instruction to appreciate the final result as objectively as possible. It is necessary to leave little room for question in this section to contacts.

The Resources which the students should use are indicated in this portion of the Web-Quests. Providing this assistance the students should focus on the exercise in processing information rather than just locating it. Though the instructor may search for the online resources as a separate step, it is useful to incorporate resources as links within the process section where they will be needed rather than just including them as a long list elsewhere. Having off-line resources like visiting lecturers and sculptures one can contribute greatly to the interest of the students [9].

In the conclusion section summarizing the experience, the process reflection, higher level questions that may be researched at another time ought to be presented. The instructors are also supposed to give «food» for thought as to where they can use the information they have learned, etc. The co-developers of the concept of Dr. Bernie Dodge and Tom March give some very sound advice to test the given structure by own experience, define its weaknesses and advantages, check what makes things strong and comment on the results in class as it will take only 15 minutes due to the users of the Web-Quests [7, 8, 12, 13, 14].

Findings

Most members of the language teaching profession realize that their students' learning potential increases when attitudes to the Web-Quests are positive and motivation to do it runs high. They think of incorporating the Web-Quests lesson for-

mat into language teaching and some activities in the form of a single organizing framework that English as foreign language (EFL) lecturers can use to integrate the projects method into language learning in the classroom and outside it giving more autonomy to students. English instructors cannot deny or ignore the significance of the Web-Quests in the process of teaching and learning. In the experience, there never seems to be enough time to cover all the language work that is necessary or obligatory within course contact hours [4]. That's why one of the most challenging aspects in foreign language teaching/learning is an individual self-independent assignment. So any task or activity that encourages contemporary students to continue working on their English outside the classroom is to be welcomed. It goes without saying that learning is more effective when learners are active in their learning process, assuming responsibility for their learning and participating in decisions which affect it [2]. A teacher's aim is to focus more on creating challenging and meaningful activities for students in the classroom and outside the classroom. And correction of home assignment should be learning-centered rather than teaching-centered. It should focus on motivating students to develop their own strategies for learning through home assignment [4].

Originality and practical value

The teacher maintains an essential role in this process as not only the one who would normally select or set up the Web-Quest, but who also plays an important role as a facilitator – providing support, «feeding» in language, monitoring and eventually, taking on a role in an evaluating capacity. It is important to give the correct amount of importance to a sensitive balance between helping students make their way through the Web-Quest, and disturbing their autonomy. Such autonomy is likely to boost learners' self-confidence and motivation. As much of the Web-Quest work takes place on the Internet, the teacher must ensure that all participants are sufficiently versed in basic navigation skills. This might even provide an opportunity for student teaching, as there will surely be some in groups who can give this kind of information and design some easy practice activities.

Web-Quests are motivating, funny, they reflect real-world roles and tasks, invite collaboration,

РОЗВИТОК ВИЩОЇ ШКОЛИ

promote and exercise «higher-level» thinking process and practice skills inherent to any language learning project, such as overall reading and detailed reading, negotiating ideas through spoken and written communication. Web-Quests incorporate listening skills, peers teaching and interaction. Students are involved in creating and producing their own ideas, with peers' and teachers' support, they do not only receive valuable feedback from their teacher, but are involved in reflecting on their work and engage in self-evaluation as well.

Conclusions

To work with Web-quests, an instructor should find well-chosen and motivating topics, coupled with up-to-date websites and he/she should access the wealth of the material on the Internet and besides pays attention both to the content and the language.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Горбунова, О. В. Использование технологий веб-квеста в образовательном процессе. Вариативный модуль 72 часа [Electronic resource] / О. В. Горбунова. – Available at: <http://inshakovaoh.jimdo.com/методические-работы/повышение-квалификации/>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
2. Дичківська, І. М. Інноваційні педагогічні технології / І. М. Дичківська. – Київ : Академвидав, 2004. – 352 с.
3. Личенко, М. Ю. Концепція побудови національної інформаційно-телекомунікаційної багаторівневої інфраструктури / М. Ю. Личенко, С. О. Кравчук // Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні : монографія. – Київ : Наук. думка, 2010. – С. 777–781.
4. Личенко, М. Ю. Наукова та інноваційна діяльність в дослідницькому університеті [Electronic resource] / М. Ю. Личенко. – Available at: <http://kpi.ua/science>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
5. Личенко, М. Ю. Сучасні телекомунікаційні системи / М. Ю. Личенко, С. О. Кравчук. – Київ : Наук. думка, 2008. – 328 с.
6. Benz, P. Webquests, a Constructivist Approach [Electronic resource] / P. Benz. – 2001. – Available at: <http://opendistancelearning.pbwor-ks.com/w/page/23202397/Webquests>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
7. Dodge, B. A. Rubric for Evaluating WebQuests [Electronic resource] / B. A. Dodge. – 2001. – Available at: <http://webquest.sdsu.edu/web-questu-bric.html>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
8. Dodge, B. Some Thoughts about Webquests [Electronic resource] / B. Dodge. – 1995. – Available at: http://webquest.sdsu.edu/about_web-quests.html. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
9. Dudeney, G. The Internet and the Language Classroom / G. Dudeney. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 192 p.
10. Kovalska, N. Self-directed projects / N. Kovalska, N. Prisyazhnik // Сучасні тенденції викладання інозем. мов у вищій школі: технології навчання : матеріали IV між нар. наук.- практ. конф. / НТУУ «КПІ». – 2013. – Київ. – № 2. – С. 67–70.
11. Kurt, S. Issues to Consider in Designing WebQuests: A Literature Review / S. Kurt // Computers in the Schools : Interdisciplinary J. of Practice, Theory, and Applied Research. – 2012. – Vol. 29. – Iss. 3. – P. 300–314. doi: 10.1080/07380569.2012.704770.
12. March, T. The Webquest Design Process [Electronic resource] / T. March. – 1997. – Available at: <http://www.ozline.com/webquests/design.html>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
13. March, T. What's on the Web? Sorting Strands of the World Wide Web for Educators [Electronic resource] / T. March. – 1995-2001. – Available at: <http://www.ozline.com/learning/webtypes.html>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
14. March, T. Working the Web for Education. Theory and Practice on Integrating the Web for Learning [Electronic resource] / T. March. – 1997-2001. – Available at: <http://www.ozline.com/learning/theory.html>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
15. Marzano, R. J. A different kind of class: Teaching with dimensions of learning [Electronic resource] / R. J. Marzano – USA : Association for Supervision and Curriculum Development, Alexandria, VA. – 1992. – 213 p. – Available at: <http://fil-es.er-ic.ed.gov/full-text/ED350086.pdf>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
16. Molés-Cases, T. Webquests in translator training / T. Molés-Cases, U. Oster // Studies in Corpus Linguistics. – 2015. – Vol. 312. – P. 199–224. doi: 10.1075/scl.69.10mol.
17. Shan, C. Using WebQuests to Facilitate Task-based English Reading Instruction for Graduate Students / C. Shan // Chinese J. of Applied Linguistic. – 2011. – Vol. 34. – Iss. 2. – P. 34–43. doi: 10.1515/-cj-al-2011.013.
18. Webquests—An Introductory Guide and Resources [Electronic resource]. Available at: <http://new-school.opencolleges.edu.au/teacher-resources/web-quests/>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.
19. WebQuest.org [Electronic resource]. – 2008. – Available at: <http://webquest.org/index.php>. – Title from the screen. – Accessed 07.05.2015.

К. М. ПЕРЕРВА^{1*}

^{1*}Каф. «Іноземні мови», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. + 38 (056) 373 15 24, ел. пошта cat.pererva@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9154-9407

ВЕБ-КВЕСТ ЯК ЦІННИЙ РЕСУРС ТА ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ У ВИВЧЕННІ ТА ВИКЛАДАННІ АНГЛІЙСЬКОЇ МОВИ

Мета. Дана робота – дослідження інноваційної методики вивчення та викладання англійської мови за допомогою Інтернет-ресурсів і мотивації студентів до пошуку необхідної інформації під час виконання домашнього завдання. **Методика.** Головний принцип веб-квесту як типу викладання англійської мови полягає в умотивуванні студентів. Наприклад, завдяки участі у веб-квесті студенти, що мали сумніви стосовно своїх знань, стають більш впевненішими. Маючи чіткі цілі та завдання, використовуючи комп'ютерні навички, умотивована молодь більш активно виступає як впевнений користувач англійської мови. **Результати.** Згідно з технологією веб-квестів студентам було запропоновано створити один або більше проєктів, які безпосередньо пов'язані з успішним виконанням завдання. Це помітний результат всієї їхньої кропіткої роботи, і він повинен оцінюватися. Оцінювання – значна складова частина веб-квесту або будь-якого іншого проєкту, і з цієї точки зору критерії оцінювання повинні бути чіткими та доступними для студентів із самого початку. Ці вказівки можуть і повинні мінятися для того, щоб відрізнитися для усної презентації та письмової роботи. **Наукова новизна.** В основному, веб-квести – це міні-проєкти, в яких великий процент матеріалу постачається з Інтернету. Вони можуть створюватися викладачами або студентами, залежно від виду навчальної роботи. Автором деталізовано збільшення можливостей у процесах пошуку Інтернет-проєктів за допомогою інших творчих видів студентських робіт. Внесок автора – підсилення та збільшення пошуку Інтернет-проєктів за допомогою інших творчих видів студентських робіт. Ними можуть бути: аналіз літератури, написання творів, обговорення прочитаних джерел тощо. **Практична значимість.** У роботі підтверджено, що ролі та завдання, які відображають реальний світ, запрошують до співробітництва, активізують і тренують процес мислення на більш високому рівні. Саме тому застосування веб-квестів може покращувати практичні навички мови навчального процесу (читання для вилучення інформації, детальне читання, ведення переговорів, усна та письмова комунікація тощо).

Ключові слова: веб-квест; Інтернет-ресурси; пошук інформації; вивчення іноземної мови; навчання; мотивація; завдання; знання та вміння; викладання іноземної мови

Е. М. ПЕРЕРВА^{1*}

^{1*}Каф. «Иностранные языки», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. + 38 (056) 373 15 24, эл. почта cat.pererva@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9154-9407

ВЕБ-КВЕСТ – ЦЕННЫЙ РЕСУРС И ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ В ИЗУЧЕНИИ И ПРЕПОДАВАНИИ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА

Цель. Данная работа – исследование инновационной методики изучения и преподавания английского языка при помощи Интернет-ресурсов и мотивации студентов к поиску необходимой информации во время выполнения домашнего задания. **Методика.** Главный принцип веб-квеста как типа преподавания английского языка заключается в мотивации студентов. Например, благодаря участию в веб-квесте студенты, имеющие сомнения относительно своих знаний, становятся более уверенными. Имея четкие цели и задания, используя компьютерные навыки, мотивированная молодежь более активно выступает как уверенный пользователь английского языка. **Результаты.** Согласно технологии веб-квестов студентам было предложено создать один или больше проєктов, непосредственно связанных с успешным выполнением задания. Это заметный результат всей усердной работы студентов, и он является предметом оценивания. Оценивание – существенная составная веб-квеста или любого другого проєкта, и с этой точки зрения критерии должны быть ясными и доступными студентам с самого начала. Эти указания могут и должны быть изменены для того,

РОЗВИТОК ВИЩОЇ ШКОЛИ

чтобы различать и обеспечивать устную презентацию и письменную работу. **Научная новизна.** В основном, веб-квесты – это мини проекты, в которых больший процент материала получен из Интернета. Они могут быть созданы преподавателями или студентами, в зависимости от вида обучающей работы. Автором детализировано увеличение возможностей в процессах поиска Интернет-проектов при помощи других творческих видов студенческих работ. Ими могут быть: анализ литературы, написания сочинений, обсуждение прочитанных произведений и т.д. **Практическая значимость.** В работе подтверждено, что роли и задания, отображающие реальный мир, приглашают к сотрудничеству, активизируют и тренируют мыслительный процесс на более высоком уровне. Именно поэтому использование веб-квестов может улучшить практические навыки языка учебного процесса (чтение для извлечения информации, подробное чтение, ведение переговоров, устная и письменная коммуникация и др.).

Ключевые слова: веб-квест; Интернет-ресурсы; поиск информации; изучение иностранного языка; мотивация; задание; знания и умения; преподавание иностранного языка

REFERENCES

1. Gorbunova O.V. *Ispolzovaniye tekhnologiy veb-kvesta v obrazovatel'nom protsesse. Variativnyy modul 72 chasa* [Using web quest technologies in the educational process. Variable module 72 hours]. Available at: <http://inshakova.ox.jimdo.com/metodicheskie-raboty/povyshenie-kvalifikatsii/> (Accessed 07 May 2015).
2. Dychkivska I.M. *Innovatsiini pedahohichni tekhnolohii* [Innovative educational technologies]. Kyiv, Akademvydav Publ., 2004. 352 p.
3. Ilchenko M.Yu., Kravchuk S.O. *Kontsepsiia pobudovy natsionalnoi informatsiino-telekomunikatsiinoi bahatorivnevoi infrastruktury. Stan ta perspektyvy rozvytku informatyky v Ukraini* [The concept of building a national information and telecommunications multistage infrastructure. State and prospects of development of computer science in Ukraine]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2010, pp. 777-781.
4. Ilchenko M.Yu. *Naukova ta innovatsiina diialnist v doslidnytskomu universyteti* [Scientific and innovative activity in the research Institute]. Available at: <http://kpi.ua/science> (Accessed 07 May 2015).
5. Ilchenko M.Yu., Kravchuk S.O. *Suchasni telekomunikatsiini systemy* [Modern telecommunication systems]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2008. 328 p.
6. Benz P. Webquests, a Constructivist Approach. 2001. Available at: <http://opendistancelearning.pbworks.com/w/page/23202397/Webquests> (Accessed 07 May 2015).
7. Dodge B.A. Rubric for Evaluating WebQuests. 2001. Available at: <http://webquest.sdsu.edu/webquest-rubric.html> (Accessed 07 May 2015).
8. Dodge B. Some Thoughts about Webquests. 1995. Available at: http://webquest.sdsu.edu/about_webquests.html (Accessed 07 May 2015).
9. Dudeney G. The Internet and the Language Classroom. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 192 p.
10. Kovalska N., Prisyazhnuk N. Self-directed projects. *Materialy IV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Suchasni tendentsii vykladannia inozemnykh mov u vyshchii shkoli: tekhnolohii navchannia»*: [Proc. of IV Int. Sci. Conf. «Present-day trends of foreign languages teaching in higher education, education technology»], 2013, Kyiv, NTUU «KPI», no. 2, pp. 67-70.
11. Kurt S. Issues to Consider in Designing WebQuests: A Literature Review. *Computers in the Schools: Interdisciplinary Journal of Practice, Theory, and Applied Research*, 2012, vol. 29, issue 3, pp. 300-314. doi: 10.1080/07380569.2012.704770.
12. March T. The Webquest Design Process. 1997. Available at: <http://www.ozline.com/webquests/design.html> (Accessed 07 May 2015).
13. March T. What's on the Web? Sorting Strands of the World Wide Web for Educators. 1995-2001. Available at: <http://www.ozline.com/learning/webtypes.html> (Accessed 07 May 2015).
14. March T. Working the Web for Education. Theory and Practice on Integrating the Web for Learning. 1997-2001. Available at: <http://www.ozline.com/learning/theory.html> (Accessed 07 May 2015).
15. Marzano R.J. A different kind of class: Teaching with dimensions of learning. USA: Association for Supervision and Curriculum Development, Alexandria, VA, 1992. 213 p. Available at: <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED350086.pdf> (Accessed 07 May 2015).
16. Molés-Cases T., Oster U. Webquests in translator training. *Studies in Corpus Linguistics*, 2015, vol. 312, pp. 199-224. doi: 10.1075/scl.69.10mol.
17. Shan C. Using WebQuests to Facilitate Task-based English Reading Instruction for Graduate Students. *Chinese Journal of Applied Linguistics*, 2011, vol. 34, issue 2, pp. 34-43. doi: 10.1515/cjal.2011.013.

РОЗВИТОК ВИЩОЇ ШКОЛИ

18. Webquests—An Introductory Guide and Resources. Available at: <http://newsroom.opencolleges.edu.au/teacher-resources/webquests/> (Accessed 07 May 2015).
19. WebQuest.org. 2008. Available at: <http://webquest.org/index.php> (Accessed 07 May 2015).

Prof. T. I. Vlasova, Dr. Phil. (Ukraine); Prof. O. I. Panchenko. Dr. Philol. (Ukraine) recommended this article to be published

Received: Jan. 20, 2015

Accepted: May 16, 2015

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

С. Ю. БУРЯК, В. І. ГАВРИЛЮК, О. О. ГОЛОЛОВА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ СТРІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ.....	7
ЩЕКА В. І. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ВПЛИВУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ НА РЕЙКОВІ КОЛА	27

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

А. С. ДОРОШ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ ГАЛЬМУВАННЯ КЕРОВАНОВОГО ВІДЧЕПА РОЗРАХУНКОВОЇ ГРУПИ	36
Д. М. КОЗАЧЕНКО, А. І. ВЕРЛАН, О. В. ГОРБОВА ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ОБСЯГІВ РОБОТИ ДЛЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ.....	45
Г. Я. МОЗОЛЕВИЧ, А. В. ТРОЯН ВПЛИВ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЇЗДОПОТОКУ НА ЗАГАЛЬНИЙ ПРИБУТОК ЗАЛІЗНИЦЬ	58

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

О. О. МАТУСЕВИЧ МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ЗБИТКУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ	77
В. Ф. НОВІКОВ ПІДТВЕРДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛІНІЙНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА	88
К. О. СОРОКА, Д. О. ЛИЧОВ ЗМІСТОВНА МОДЕЛЬ ТА РІВНЯННЯ РУХУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	97

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

І. О. БОНДАРЕНКО ФОРМУВАННЯ ОЦІНОЧНИХ УМОВ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ДЕФОРМАТИВНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ.....	107
Д. М. КУРГАН ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД КОЛЕСА НА РЕЙКУ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ КОЛІЇ НА МІЦНІСТЬ В УМОВАХ ВИСОКИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ	118

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

І. В. АКІМОВ ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИТОЇ ГРАФІТИЗОВАНОЇ СТАЛІ	129
І. О. ВАКУЛЕНКО, Ю. Л. НАДЕЖДІН, В. А. СОКІРКО, СЮ СЯ ХАЙ ЗАЛЕЖНІСТЬ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ ВІД РОЗМІРУ ЗЕРНА ФЕРИТУ В НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ	137

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

А. А. БОСОВ, В. М. ІЛЬМАН, Н. В. ХАЛПОВА МНОЖИННІ ОБ'ЄКТИ.....	145
--	-----

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

В. М. БОГОМАЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЕКТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕВАТОРА НА ПАРАМЕТРИ ЙОГО ПРИВОДУ	162
---	-----

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

М. І. КАПЦА, М. І. МАРТИШЕВСЬКИЙ, Д. М. КИСЛИЙ, І. І. ПАЛІЙ ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВОЗІВ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДИЗЕЛЕМ.....	176
С. В. МЯМЛІН, Н. Ю. НАУМЕНКО, О. М. МАРКОВА, О. М. КОВТУН, В. В. МАЛИЙ ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ШЕСТИВІСНОГО ЛОКОМОТИВА.....	186

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В. В. КОВАЛЬЧУК ВПЛИВ ТОВЩИНИ ГОФРОВАНОГО ЕЛЕМЕНТА НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН МЕТАЛЕВИХ ГОФРОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТИПУ ГОРИЗОНТАЛЬНИЙ ЕЛІПС.....	199
--	-----

РОЗВИТОК ВИЩОЇ ШКОЛИ

К. М. ПЕРЕРВА ВЕБ-КВЕСТ ЯК ЦІННИЙ РЕСУРС ТА ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ У ВИВЧЕННІ ТА ВИКЛАДАННІ АНГЛІЙСЬКОЇ МОВИ.....	208
---	-----

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

С. Ю. БУРЯК, В. И. ГАВРИЛЮК, О. А. ГОЛОЛОВОВА ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ	7
ЩЕКА В. И. ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА РЕЛЬСОВЫЕ ЦЕПИ	27

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

А. С. ДОРОШ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ТОРМОЖЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОТЦЕПА РАСЧЕТНОЙ ГРУППЫ	36
Д. Н. КОЗАЧЕНКО, А. И. ВЕРЛАН, А. В. ГОРБОВА ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ОБЪЕМОВ РАБОТ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ	45
Г. Я. МОЗОЛЕВИЧ, А. В. ТРОЯН ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЕЗДОПОТОКА НА ОБЩУЮ ПРИБЫЛЬ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	58

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

А. А. МАТУСЕВИЧ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА УЩЕРБА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	77
В. Ф. НОВИКОВ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОГО синхронного ДВИГАТЕЛЯ	88
К. А. СОРОКА, Д. А. ЛЫЧОВ СОДЕРЖАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА	97

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

И. А. БОНДАРЕНКО ФОРМИРОВАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ УСЛОВИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ДЕФОРМАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ	107
Д. Н. КУРГАН ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТ КОЛЕСА НА РЕЛЬС ДЛЯ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ	118

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

И. В. АКИМОВ ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИТОЙ ГРАФИТИЗИРОВАННОЙ СТАЛИ	129
И. А. ВАКУЛЕНКО, Ю. Л. НАДЕЖДИН, В. А. СОКИРКО, СЮ СЯ ХАЙ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТ РАЗМЕРА ЗЕРНА ФЕРРИТА В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ	137

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТА И ЭКОНОМИКИ

А. А. БОСОВ, В. М. ИЛЬМАН, Н. В. ХАЛИПОВА МНОЖЕСТВЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ	145
---	-----

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

В. Н. БОГОМАЗ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕВАТОРА НА ПАРАМЕТРЫ ЕГО ПРИВОДА	162
--	-----

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

М. И. КАПИЦА, М. И. МАРТЫШЕВСКИЙ, Д. Н. КИСЛЫЙ, И. И. ПАЛИЙ

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЗА ЗА СЧЕТ
ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЕМ.....176

С. В. МЯМЛИН, Н. Е. НАУМЕНКО, О. М. МАРКОВА, Е. Н. КОВТУН, В. В. МАЛЫЙ

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШЕСТИОСНОГО ЛОКОМОТИВА186

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

В. В. КОВАЛЬЧУК

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ГОФРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....199

РАЗВИТИЕ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Е. М. ПЕРЕРВА

ВЕБ-КВЕСТ – ЦЕННЫЙ РЕСУРС И ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ
В ИЗУЧЕНИИ И ПРЕПОДАВАНИИ АНГЛИЙСКОГО ЯЗЫКА208

CONTENTS

TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

S. YU. BURIK, V. I. GAVRYLIUK, O. O. HOLOBOVA IMPLEMENTATION OF TURNOUTS TECHNICAL DIAGNOSTICS SYSTEMS.....	7
V. I. SHCHEKA IMPACT MECHANISMS RESEARCH IN THE CONTACT NETWORK ON RAIL TRACK CIRCUITS	27

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

A. S. DOROSH DETERMINATION OF BRAKING OPTIMAL MODE OF CONTROLLED CUT OF DESIGN GROUP.....	36
D. M. KOZACHENKO, A. I. VERLAN, O. V. GORBOVA CALCULATED VOLUMES DETERMINATION OF WORK FOR MAIN-LINE AND INDUSTRIAL RAILWAY STATIONS	45
H. YA. MOZOLEVICH, A. V. TROIAN THE INFLUENCE OF THE MAIN PARAMETERS OF TRAIN TRAFFIC VOLUME ON TOTAL PROFITS OF RAILWAYS	58

ELECTRIC TRANSPORT

O. O. MATUSEVYCH MATHEMATICAL MODEL OF THE DAMAGE ANALYSIS OF RAILWAY TRACTION ENERGY SYSTEM	77
V. F. NOVIKOV CONFIRMATION OF THE MATHEMATICAL MODEL ADEQUACY OF A LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR	88
K. O. SOROKA, D. A. LYCHOV THE CONTENT MODEL AND THE EQUATIONS OF MOTION OF ELECTRIC VEHICLE	97

RAILWAY TRACK

I. O. BONDARENKO FORMATION OF ESTIMATED CONDITIONS FOR LIFE CYCLE OF DEFORMATION WORK OF THE RAILWAY TRACK	107
D. M. KURHAN DETERMINATION OF DYNAMIC LOADS FROM THE WHEEL ON THE RAIL FOR HIGH-SPEED TRAINS.....	118

MATERIAL SCIENCE

I. V. AKIMOV INCREASING OF MECHANICAL PROPERTIES OF CAST GRAPHITIZED STEEL	129
I. A. VAKULENKO, YU. L. NADEZHDIN, V. A. SOKYRKO, SIU SIA KHAI SPEED DEPENDENCE OF ACOUSTIC VIBRATION PROPAGATION FROM THE FERRITIC GRAIN SIZE IN LOW-CARBON STEEL.....	137

TRANSPORT AND ECONOMIC TASKS MODELING

A. A. BOSOV, V. M. ILMAN, N. V. KHALIPOVA MULTIPLE OBJECTS	145
--	-----

NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODES. MACHINES AND MECHANISMS

V. M. BOHOMAZ ANALYSES OF INFLUENCE CHARACTERISTICS OF THE ELEVATOR TO THE PARAMETERS OF ITS DRIVE.....	162
--	-----

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

M. I. KAPITSA, M. I. MARTYSHEVSKYI, D. N. KYSLYI, I. I. PALII

TECHNICAL AND ENERGY PARAMETERS IMPROVEMENT OF DIESEL LOCOMOTIVES
THROUGH THE INTRODUCTION OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF A DIESEL.....176

S. V. MYAMLIN, N. YU. NAUMENKO, O. M. MARKOVA, O. M. KOVTUN, V. V. MALYI

EVALUATION OF DYNAMIC INDICATORS OF SIX-AXLE LOCOMOTIVE.....186

TRANSPORT CONSTRUCTION

V. V. KOVALCHUK

THE EFFECT OF CORRUGATED ELEMENTS THICKNESS ON
THE DEFLECTED MODE OF CORRUGATED METAL STRUCTURES199

HIGH SCHOOL DEVELOPMENT

K. M. PERERVA

WEB-QUESTS IN THE ENGLISH LANGUAGE STUDYING AND TEACHING
AS A VALUABLE RESOURCE AND EFFECTIVE TOOL.....208

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською 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 2003 або більш ранній версії – файли *.doc (файли *.docx, *.docm не приймаються). Для набору формул використовується MathType 5.

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 А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Рекомендуємо скористатися правилами до оформлення статей журналу:
<http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/Vumogu.pdf>.

Для здачі статті до друку автору/авторам необхідно:

1. Для електронної інформації. Сформувати всі матеріали в п'яти файлах:

- **Перший** – із текстом статті та анотацій з ключовими словами. Назва файлу – прізвище та ініціали автора (першого співавтора) латинськими літерами, наприклад: *Ivanov II stattia.doc*.
- **Другий** – з розширеними відомостями про автора/авторів (прізвище, ім'я, по батькові; посада; науковий ступінь; учене звання; місце роботи або навчання; адреса електронної пошти; номери контактних телефонів). Назва файлу – *Ivanov II vdomosti.doc*.
- **Третій** – рецензія (відсканована). Назва файлу – *Ivanov II recenzia.jpg*.
- **Четвертий** – Експертний висновок (відсканований, складається у вільній формі). Назва файлу – *Ivanov II vysnovok.jpg*.
- **П'ятий** – Ліцензійний договір (відсканований). Назва файлу – *Ivanov II dogovir.jpg*. Текст договору: <http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/license.doc>.

2. Для друкованої інформації. До редакції надаються особисто або надсилаються поштою такі матеріали: 1) два друкованих примірники рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи; 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів; 3) оригінал експертного висновку; 4) рекомендація до друку за підписом відповідального редактора розділу (для співробітників ДНУЗТ).

Відповідальність за зміст статті, правильність, точність і коректність цитування, посилань та перекладу покладається на авторів.

**Остаточне рішення щодо публікації ухвалює редакційна колегія журналу.
 Статті, відхилені редакційною колегією, повертаються авторам для доопрацювання.**

Шановні автори, запрошуємо до співробітництва!

З питань опублікування звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),
 Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
 вул. Лазаряна, 2,
 м. Дніпропетровськ,
 Україна,
 49010
 e-mail: visnik@diit.edu.ua
 Адреса сайту журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

З питань придбання примірників журналу телефонуйте за номером (056) 776 90 59 Грідасова А. В.



Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна веде підготовку докторантів та аспірантів за рахунок коштів Державного бюджету України – за державним замовленням – за такими спеціальностями:

ДОКТОРАНТУРА

№	Спеціальність	Шифр
1	Теоретичні основи інформатики та кібернетики	01.05.01
2	Управління проектами і програмами	05.13.22
3	Залізнична колія	05.22.06
4	Рухомий склад залізниць і тяга поїздів	05.22.07
5	Електротранспорт	05.22.09
6	Експлуатація та ремонт засобів транспорту	05.22.20
7	Будівельні конструкції, будівлі та споруди	05.23.01
8	Будівельні матеріали та вироби	05.23.05

На підставі угод, що укладаються з докторантом і керівником вищого навчального закладу, до докторантури приймаються громадяни України, кандидати наук, що мають наукові досягнення в обраній галузі.

Строк навчання 3 роки.

Вступники до докторантури подають:

- заяву на ім'я ректора,
- копію першої сторінки паспорта,
- особистий листок з обліку кадрів з фотокарткою, який засвідчено відділом кадрів за місцем основної роботи,
- витяг з трудової книжки,
- довідку з бухгалтерії про заробітну платню,
- засвідчену копію диплома про закінчення вищого навчального закладу із зазначенням одержаної кваліфікації спеціаліста,
- копію диплома кандидата наук,
- копію атестата доцента, с.н.с. за їх наявності,
- розгорнутий план докторської дисертації,
- список опублікованих наукових праць та винаходів,
- медичну довідку про стан здоров'я за формою № 286-у,
- ідентифікаційний код,
- одну фотокартку розміром 3х4.

АСПІРАНТУРА

№	Спеціальність	Шифр
1	Фізика твердого тіла	01.04.07
2	Теоретичні основи інформатики та кібернетики	01.05.01
3	Математичне моделювання та обчислювальні методи	01.05.02
4	Неорганічна хімія	02.00.01
5	Управління проектами і програмами	05.13.22
6	Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика	05.14.06
7	Залізнична колія	05.22.06
8	Рухомий склад залізниць і тяга поїздів	05.22.07
9	Електротранспорт	05.22.09
10	Експлуатація та ремонт засобів транспорту	05.22.20
11	Основи і фундаменти	05.23.02
12	Будівельні конструкції, будівлі та споруди	05.23.01
13	Будівельні матеріали та вироби	05.23.05
14	Технологія та організація промислового та цивільного будівництва	05.23.08
15	Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)	08.00.04
16	Історія філософії	09.00.05
17	Екологічна безпека	21.06.01

На підставі угод, що укладаються з аспірантом і керівником вищого навчального закладу, до аспірантури приймаються громадяни України, які мають вищу освіту і кваліфікацію спеціаліста.

Строк навчання в аспірантурі з відривом від виробництва – 3 роки, без відриву від виробництва – 4 роки.

Особи, допущені до вступних іспитів у аспірантуру, складають три іспити за програмою вищого навчального закладу:

- спеціальну дисципліну,
- філософію,
- іноземну мову.

За консультаціями звертатися на відповідні кафедри університету.

Особи, що вступають до аспірантури, подають:

- заяву на ім'я ректора,
- письмовий висновок передбачуваного наукового керівника про можливість навчання в аспірантурі,
- рекомендацію вченої ради вищого навчального закладу до вступу в аспірантуру (для випускників поточного року),
- копію першої сторінки паспорта,
- особистий листок з обліку кадрів з фотокарткою, який засвідчено відділом кадрів за місцем основної роботи,
- витяг з трудової книжки,
- довідку про заробітну платню,
- засвідчену копію диплома про закінчення вищого навчального закладу,
- посвідчення про складання кандидатських іспитів (за їх наявності),
- список опублікованих наукових праць та винаходів або реферат з обраної наукової спеціальності з рецензією передбачуваного наукового керівника,
- медичну довідку про стан здоров'я за формою № 286-у,
- ідентифікаційний код,
- одну фотокартку розміром 3×4.

Прийом документів до докторантури та аспірантури з 01.09 по 30.09 щорічно.

Вступні іспити до аспірантури з 10.10 по 30.10 щорічно.

Початок занять з 01.12 щорічно.

За інформацією звертатися:

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту,
вул. Лазаряна, 2,
м. Дніпропетровськ,
Україна,
49010.

Тел. : (056) 373-15-44 – ректор, проф. Пшінько Олександр Миколайович, приймальня;
(056) 373-15-29 – проректор з наукової роботи, проф. Мямлін Сергій Віталійович;
(056) 373-15-63 – завідувача аспірантурою та докторантурою Лахнова Ірина Анатоліївна,
(кімн. 320).

Інформація про спеціалізовані вчені ради університету

В університеті працює три спеціалізовані вчені ради із захисту докторських та кандидатських дисертацій за спеціальностями:

- Д 08.820.01 – залізнична колія (05.22.06) та електротранспорт (05.22.09); 05.22.12 – промисловий транспорт.

- Д08.820.02 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів (05.22.07) і експлуатація та ремонт засобів транспорту (05.22.20); транспортні системи (05.22.01);

- К08.820.03 – економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності).

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 3 (57) 2015

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська

Комп'ютерне верстання – Л. А. Кобулія

Літературна обробка – О. М. Врублевська

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 26,04. Тираж 300 пр. Зам. № 530.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.dnupetrovsk.edu.ua, visnik@dnupetrovsk.edu.ua

Адреса дільниці оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, кім. 1201, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Научное издание

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ. ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 3 (57) 2015

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – А. И. Миргородская

Компьютерная верстка – Л. А. Кобулия

Литературная обработка – О. М. Врублевская

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 26,04. Тираж 300 экз. Зак. № 530.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

Адрес редакции, издателя:

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днепропетровск, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.dnupetrovsk.edu.ua, visnik@dnupetrovsk.edu.ua

Адрес участка оперативной полиграфии:

ул. Лазаряна, 2, ком. 1201, г. Днепропетровск, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VISNIK DNIPROPETROVS'KOGO NACIONAL'NOGO
UNIVERSITETU ZALIZNICHNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS. BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 3 (57) 2015

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – A. I. Myrhorodska

Computer makeup – L. A. Kobuliya

Redaction – O. M. Vrublevska

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 26,04. Circulation 300 Order no. 530.

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

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.dnupetrovsk.edu.ua, visnik@dnupetrovsk.edu.ua

Address of small offset printing office

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 47-19-66, Fax: +38 (056) 47-19-83



СУЧАСНІ ЗАКЛАДИ ОСВІТИ - 2015

Шоста Міжнародна виставка

CERTIFICATE

якості наукових публікацій
УДОСТОЄНИЙ

**Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна**

Міністерство освіти і науки України



Міністр

С. Квіт

Національна академія
педагогічних наук України



Президент

В. Кремень

Асоціація користувачів
Української науково-освітньої
телекомунікаційної мережі «Уран»

Голова Ради

Ю. Якименко





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

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2015. 3(57). 1-223