



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

4(46)

•• 2013 ••

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

4 (46) 2013

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
Промисловий транспорт
Рухомий склад залізниць і тяга поїздів
Транспортне будівництво
Розвиток вищої школи

Дніпропетровськ

2013

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):

Аксьонов І. М., Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакулєнко І. О., Верхоглядова Н. І., Власова Т. І., Габринєць В. О., Гаврилук В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Головова Л. С., Гончаров К. В., Горобєць В. Л., Дорогань Т. Є., Доценко О. М., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Каламбет С. В., Капіца М. І., Ковтун В. В., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Купцова Т. А., Курган М. Б., Муха А. М., Мухіна Н. А., Настєчик М. П., Нетєса М. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Покотілов А. А., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Рибкін В. 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. (Науково-технічний центр залізничного транспорту, Республіка Польща); Васяк І. (Інститут електроенергетики, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Академія наук, Чеська Республіка); Зіммер К. (Електротехнічний інститут, Республіка Польща); Казакевич М. І. (Федеративна Республіка Німеччина); Лінгайтис В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Лінгайтис Л. П. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Манашкін Л. А. (Технологічний університет Нью-Джерсі, США); Микульські Є. (Сілезький технологічний університет, Республіка Польща); Сладковські А. (Сілезький технологічний університет, Республіка Польща); Стржелецькі Р. (Гданський морський університет, Республіка Польща); Худзікевич А. (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 постановами президії ВАК України № 1-05/6 від 16.12.2009 р. (технічні науки) та № 1-05/2 від 10.03.2010 р. (економічні науки). Журнал зареєстровано в міжнародному каталозі періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, науково-метричних системах Google Scholar, Polish Scientific Bibliography. Друкується за рішенням вченої ради університету від 02.09.2013 р., протокол № 1

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.: (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

4 (46) 2013

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
Промышленный транспорт
Подвижной состав железных дорог и тяга поездов
Транспортное строительство
Развитие высшей школы

Днепропетровск

2013

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):

Аксенов И. М., Афанасов А. М., Банников Д. О., Бараш Ю. С., Беляев Н. Н., Бобырь Д. В., Бобровский В. И., Боднар Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Верхоглядова Н. И., Власова Т. И., Габринец В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Дорогань Т. Е., Доценко Е. Н., Жуковицкий И. В., Заблудовский В. А., Каламбет С. В., Капица М. И., Ковтун В. В., Копитко В. И., Костин Н. А., Кравец В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Купцова Т. А., Курган Н. Б., Муха А. М., Мухина Н. А., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Покотиллов А. А., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Рыбкин В. В., Скалосуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Штапенко Е. П., Яришкина Л. А.

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Анисимов П. С. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Бялонь А. (Научно-технический центр железнодорожного транспорта, Республика Польша); Васяк И. (Институт электроэнергетики, Республика Польша); Гусев Б. В. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Долежел И. (Академия наук, Чешская Республика); Зиммер К. (Электротехнический институт, Республика Польша); Казакевич М. И. (Федеративная Республика Германия); Лингайтис В. Л. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Лингайтис Л. П. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Манашкин Л. А. (Технологический университет Нью-Джерси, США); Микульски Е. (Силезский технологический университет, Республика Польша); Сладковски А. (Силезский технологический университет, Республика Польша); Стржелецки Р. (Гданьский морской университет, Республика Польша); Худзикович А. (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 постановлением президиума ВАК Украины № 1-05/6 от 16.12.2009 г. (технические науки) и № 1-05/2 от 10.03.2010 г. (экономические науки).
Журнал зарегистрирован в международном каталоге периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, научно-метрических системах Google Scholar, Polish Scientific Bibliography

Печатается по решению ученого совета университета от 02.09.2013 г., протокол № 1

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

Адрес ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 371-51-05;
учредителя 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»;
- з 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

4 (46) 2013

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
Industrial Transport
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction
High School Development

Dnipropetrovsk

2013

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
 Kolesnikova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):

Afanasov A. M., Aksenov I. 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., Dorohan T. E., Dotsenko O. M., Gabrync V. A., Gavriluk V. I., Getman G. K., Glavatskiy K. Ts., Golovkova L. S., Goncharov K. V., Gorobets V. L., Kalambet S. V., Kapitsa M. I., Kopytko V. I., Kostin M. O., Kovtun V. V., Krasnyuk A. V., Kravets V. V., Kuptsova T. A., Kurgan M. B., Kuznetsov V. G., Mukha A. M., Mukhina N. A., Nastechik N. P., Netesa N. I., Ochkasov O. B., Petrenko V. D., Pichugov S. O., Pichurin V. V., Pokotilov A. A., Polishko T. V., Radchenko N. A., Radkevych A. V., Raksha S. V., Rybkin V. V., Shtapenko E. P., Skalozub V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Verkhoglyadova N. I., Vlasova T. I., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovytsky I. V.

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Byalon A. (Science and Technology Center of Railway Transport, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Dolezel I. (Academy of Sciences, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kazakevich M. (Federal Republic of Germany); Lingaitis L. P. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. (New Jersey Institute of Technology, USA); Mikulski J. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime University, Republic of Poland); Wasiak I. (Institute of Electrical Power Engineering, Republic of Poland); Zimmer 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 Resolution of Presidium of HAC (Higher Attestation Commission) of Ukraine no. 1-05/6 from 16.12.2009 (technical sciences) and no. 1-05/2 from 10.03.2010 (economic sciences).
 Journal is registered in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, research and metric systems Google Scholar, Polish Scientific Bibliography.
 Published according to the Academic Council decision of the University from 02.09.2013, Protocol no. 1

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 Str. Lazaryana, 2, room 267, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (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»;
 з 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.259.12:656.256.3

К. В. ГОНЧАРОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта goncharov_k@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ

Цель. Поиск новых методов анализа тональных рельсовых цепей, определение формы сигнала контроля рельсовой линии на входе путевого приемника. **Методика.** Для исследования переходных процессов применялся метод частотных характеристик. С помощью быстрого преобразования Фурье определялся спектр сигнала на выходе путевого генератора. После определения комплексной частотной характеристики тональной рельсовой цепи рассчитывался спектр сигнала на входе путевого приемника. При этом использовались полученные в результате интерполяции нормативных значений частотные характеристики первичных параметров рельсовой линии, а также рассчитанная частотная характеристика входного сопротивления путевого приемника. Для определения временной зависимости сигнала на входе приемника применялось обратное быстрое преобразование Фурье. **Результаты.** В результате выполненных исследований были установлены причины искажения формы сигналов в тональных рельсовых цепях. Путевой фильтр, а также входной фильтр путевого приемника ограничивают верхнюю и нижнюю боковые полосы спектра сигнала контроля рельсовой линии, что приводит к затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов. Рельсовая и кабельные линии, а также устройства защиты и согласования практически не влияют на форму сигнальных импульсов и изменяют только их амплитуду. При воздействии фронта и среза сигнальных импульсов в связанных контурах приемника на частотах частных резонансов возникают свободные колебания, в результате интерференции которых происходят биения и появляется дополнительный межсигнальный импульс. **Научная новизна.** Усовершенствован метод анализа тональных рельсовых цепей, что позволяет определить не только уровень, но и временную зависимость сигнала на входе путевого приемника при произвольном входном воздействии. **Практическая значимость.** Полученная временная зависимость сигнала на входе путевого приемника будет полезна при разработке новых более совершенных методов определения свободы тональной рельсовой цепи. Предложенный метод анализа рельсовых цепей может быть использован для поиска новых более информативных форм сигнального тока.

Ключевые слова: тональные рельсовые цепи; путевой приемник; переходные процессы; комплексная частотная характеристика; спектр; искажения

Введение

Рельсовые цепи (РЦ) представляют собой непрерывные путевые датчики, выполняющие ответственные функции контроля свободности путевых участков и целостности рельсовых ни-

тей. От надежности и функциональной безопасности таких датчиков во многом зависит безопасность движения поездов. Рельсовая цепь применяется также в качестве телемеханического канала для передачи сигналов автоматической локомотивной сигнализации (АЛС).

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

В настоящее время широкое распространение получили тональные рельсовые цепи (ТРЦ), благодаря своим эксплуатационным, техническим и экономическим преимуществам. Использование сигнального тока тонального диапазона позволяет существенно повысить помехозащищенность, ослабить взаимные влияния между рельсовыми цепями, снизить потребляемую мощность. Кроме этого, в ТРЦ обеспечивается возможность исключить ненадежные изолирующие стыки и уменьшить число дроссель-трансформаторов [6, 12, 17].

В существующих ТРЦ применяется электронный путевой приемник, в котором в качестве полосовых фильтров используются связанные колебательные контуры. Настройка такого приемника представляет собой сложный и трудоемкий процесс [5]. Каждой комбинации несущей и модулирующей частот сигнального тока соответствует свой тип путевого приемника, который отличается типами трансформаторов и емкостями конденсаторов в колебательных контурах.

Одно из направлений дальнейшего совершенствования рельсовых цепей связано с цифровыми методами обработки сигналов контроля рельсовой линии (КРЛ) [2, 3, 8, 13]. Применение современных микропроцессорных средств для построения ТРЦ позволит получить универсальный перепрограммируемый путевой приемник для любых комбинаций несущих и модулирующих частот. В таком приемнике основная обработка сигнала КРЛ будет выполняться программно. Это позволит упростить его настройку, а также даст возможность выполнять более совершенные алгоритмы обработки сигналов, реализация которых на аналоговой элементной базе была затруднительной или принципиально невозможной.

Путевой приемник ТРЦ решает задачу обнаружения сигнала КРЛ на фоне помех, создаваемых тяговым током, смежными рельсовыми цепями, а также сигналами АЛС. Повысить помехозащищенность приемника можно, используя статистические методы обработки сигналов [3, 7]. Для этого необходима информация как о форме и параметрах полезного сигнала на входе приемника, так и о типах и параметрах помех. В работах [9, 14–16] приведены результаты исследования электромагнитного влияния тяговой сети на работу рельсовых цепей, полу-

чены параметры помех, создаваемых тяговым током.

В тональных рельсовых цепях применяются амплитудно-манипулированные сигналы КРЛ. При передаче каждого сигнального импульса в ТРЦ происходит переход от одного установившегося состояния к другому, то есть переходный процесс, в результате которого форма импульса искажается. Существующая методика позволяет рассчитать рельсовую цепь и найти уровень сигнала на входе приемника только в установившемся состоянии на нескольких фиксированных частотах, для которых известны нормативные значения первичных параметров рельсовой линии и других элементов РЦ [1, 6, 10]. С помощью такой методики нельзя исследовать переходный процесс в ТРЦ и невозможно определить форму сигнала на входе путевого приемника. В то же время для разработки более совершенных методов обнаружения сигнала КРЛ необходимо знать его форму.

Цель

Целью данной работы является поиск новых методов анализа тональных рельсовых цепей, определение формы сигнала контроля рельсовой линии на входе путевого приемника.

Методика

Существует несколько режимов работы рельсовой цепи [1, 6]. В нормальном режиме контролируемый участок свободен и рельсовые линии не повреждены. При занятии участка подвижным составом рельсовая цепь переходит в шунтовой режим, а при изломе рельсовых нитей – в контрольный. Кроме этого, выделяют режим АЛС, при котором уровень сигнального тока должен быть достаточным для надежной работы АЛС, и режим короткого замыкания, при котором поездной шунт расположен в месте подключения генератора к рельсовой линии.

Расчет рельсовой цепи в нормальном режиме выполняется с помощью схемы замещения, содержащей три каскадно включенных четырехполюсника (рис. 1). Четырехполюсник РЛ замещает рельсовую линию, а четырехполюсники Н и К – кабельные линии, а также устройства защиты и согласования на передающем и приемном конце РЦ соответственно. К рельсовой цепи подключается путевой генератор

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

с выходным напряжением U_r , а также путевой приемник с входным сопротивлением $Z_{\text{пп}}$.



Рис. 1. Схема замещения рельсовой цепи в нормальном режиме

Каждый четырехполюсник можно описать с помощью параметров A, B, C, D , которые связывают входные (\dot{U}_1, \dot{I}_1) и выходные (\dot{U}_2, \dot{I}_2) напряжения и токи [1, 6]

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2. \end{cases} \quad (1)$$

Матрица коэффициентов общего четырехполюсника РЦ определяется путем перемножения матриц четырехполюсников Н, РЛ, К

$$\begin{bmatrix} A_o & B_o \\ C_o & D_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{\text{см1}}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{\text{см2}}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где A_n, B_n, C_n, D_n – параметры четырехполюсника Н; A, B, C, D – параметры четырехполюсника рельсовой линии; A_k, B_k, C_k, D_k – параметры четырехполюсника К; $Z_{\text{см1}}, Z_{\text{см2}}$ – входные сопротивления смежных рельсовых линий (учитываются при отсутствии изолирующих стыков).

Расчет рельсовой цепи в шунтовом режиме выполняется с помощью схемы замещения, представленной на рис. 2. В такой схеме четырехполюсник рельсовой линии разбит на две части – РЛ1 и РЛ2, между которыми включено сопротивление поездного шунта $R_{\text{ш}}$. При этом матрица коэффициентов четырехполюсника рельсовой линии определяется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{\text{ш}}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где A_1, B_1, C_1, D_1 – параметры четырехполюсника участка рельсовой линии между точкой подключения генератора и поездным шунтом; A_2, B_2, C_2, D_2 – параметры четырехполюсника участка рельсовой линии между поездным шунтом и точкой подключения приемника.

Параметры общего четырехполюсника РЦ в шунтовом режиме определяются с помощью выражения (2).

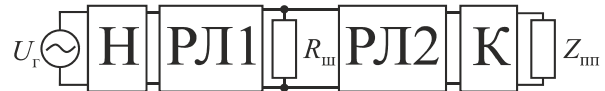


Рис. 2. Схема замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме

Расчет рельсовой цепи в контрольном режиме выполняется аналогичным образом. При этом необходимо использовать соответствующую данному режиму схему замещения рельсовой линии [1, 6].

Знание коэффициентов общего четырехполюсника позволяет найти комплексный коэффициент передачи рельсовой цепи

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{пп}}}{\dot{U}_r} = \frac{Z_{\text{пп}}}{A_o Z_{\text{пп}} + B_o}, \quad (4)$$

где ω – циклическая частота; $\dot{U}_{\text{пп}}$ – напряжение на входе путевого приемника.

Для исследования переходных процессов в ТРЦ был выбран метод частотных характеристик [11]. В соответствии с ним с помощью преобразования Фурье находим спектр сигнала $u_r(t)$ на входе РЦ

$$U_r(j\omega) = \int_0^{\infty} u_r(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (5)$$

После этого определяется комплексная частотная характеристика рельсовой цепи $K(j\omega)$ и спектр сигнала на входе путевого приемника

$$U_{\text{пп}}(j\omega) = U_r(j\omega) K(j\omega). \quad (6)$$

Для определения временной характеристики сигнала на входе приемника применяется обратное преобразование Фурье

$$u_{\text{пп}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U_{\text{пп}}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (7)$$

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Как видно из выражения (4), для нахождения комплексной частотной характеристики рельсовой цепи необходимо определить частотные зависимости коэффициентов общего четырехполюсника A_o, B_o , а также частотную характеристику входного сопротивления путевого приемника $Z_{\text{пп}}$. Рассмотрим более подробно четырехполюсники, входящие в схему замещения рельсовой цепи.

Четырехполюсник Н замещает следующие элементы ТРЦ: путевой фильтр, конденсатор $C_{\text{АЛС}}$, предназначенный для подачи в рельсовую цепь сигналов АЛСН, кабельный резистор $R_{\text{к1}}$, питающий кабель, понижающий согласующий трансформатор и защитный резистор $R_{\text{з1}}$ [6]. С учетом этого, матрица коэффициентов четырехполюсника Н определяется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_\phi & B_\phi \\ C_\phi & D_\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{\text{АЛС}}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{к1}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} A_{\text{каб1}} & B_{\text{каб1}} \\ C_{\text{каб1}} & D_{\text{каб1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_{\text{тр}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_{\text{тр}}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & R_{\text{з1}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $A_\phi, B_\phi, C_\phi, D_\phi$ – параметры четырехполюсника путевого фильтра; $n_{\text{тр}}$ – коэффициент трансформации согласующего трансформатора.

Так как питающий кабель представляет собой цепь с распределенными параметрами, то коэффициенты его четырехполюсника $A_{\text{каб1}}, B_{\text{каб1}}, C_{\text{каб1}}, D_{\text{каб1}}$ определяются следующим образом [1, 6]:

$$A_{\text{каб1}} = D_{\text{каб1}} = \text{ch}(\gamma_{\text{каб}} l_{\text{каб1}}), \quad (9)$$

$$B_{\text{каб1}} = Z_{\text{вкаб}} \text{sh}(\gamma_{\text{каб}} l_{\text{каб1}}), \quad (10)$$

$$C_{\text{каб1}} = \text{sh}(\gamma_{\text{каб}} l_{\text{каб1}}) / Z_{\text{вкаб}}, \quad (11)$$

где $\gamma_{\text{каб}} = \sqrt{(R_{\text{каб}} + j\omega L_{\text{каб}})(G_{\text{каб}} + j\omega C_{\text{каб}})}$ – коэффициент распространения волны; $Z_{\text{вкаб}} = \sqrt{(R_{\text{каб}} + j\omega L_{\text{каб}})/(G_{\text{каб}} + j\omega C_{\text{каб}})}$ – волновое сопротивление кабельной линии; $R_{\text{каб}}$ и $L_{\text{каб}}$ – километрические активное сопротивление и индуктивность кабеля соответственно;

$G_{\text{каб}}$ и $C_{\text{каб}}$ – километрические проводимость изоляции и емкость кабеля соответственно; $l_{\text{каб1}}$ – длина питающего кабеля.

Путевой фильтр реализуется в виде последовательного колебательного контура с трансформаторной связью [5]. В качестве индуктивности контура используется первичная обмотка трансформатора. Настройка на несущую частоту генератора осуществляется изменением емкости конденсатора. Последовательный колебательный контур обеспечивает необходимую амплитудно-частотную характеристику фильтра, а трансформатор позволяет получить требуемое выходное сопротивление.

Представим путевой фильтр в виде двух четырехполюсников: последовательного колебательного контура и идеального трансформатора, включенных каскадно (рис. 3). Тогда матрицу коэффициентов четырехполюсника фильтра можно определить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A_\phi & B_\phi \\ C_\phi & D_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_{1\phi}}{Z_{2\phi}} & Z_{1\phi} \\ \frac{1}{Z_{2\phi}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{n_\phi} & 0 \\ 0 & n_\phi \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $Z_{1\phi} = R_\phi + \frac{1}{j\omega C_\phi}$; $Z_{2\phi} = j\omega L_\phi$; R_ϕ, C_ϕ, L_ϕ – параметры контура; n_ϕ – коэффициент трансформации трансформатора.

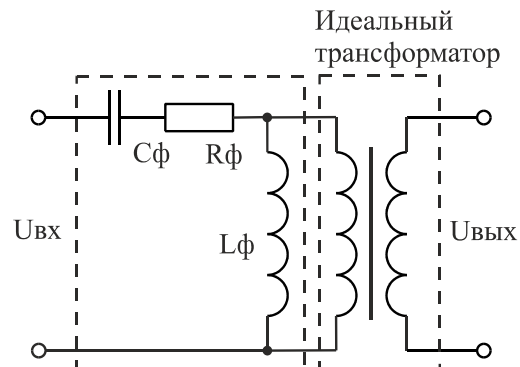


Рис. 3. Схема замещения путевого фильтра ФПУ

В справочной литературе [5] приводятся следующие параметры путевого фильтра ФПУ: емкость конденсатора для несущей частоты

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

480 Гц – 6,108 мкФ; входное сопротивление ненагруженного фильтра, настроенного в резонанс – 5...7 Ом; напряжение на вторичной обмотке, соответствующей выходному сопротивлению 140 Ом, при входном напряжении 1 В и отключенном конденсаторе – 0,412 В. В результате анализа справочных данных были получены следующие значения элементов схемы замещения фильтра: $C_\phi = 6,108$ мкФ, $L_\phi = 18$ мГн, $R_\phi = 5...7$ Ом, $n_\phi = 0,412$ (для выходного сопротивления 140 Ом).

Четырехполосник К включает в себя следующие элементы: защитный резистор $R_{з2}$, повышающий согласующий трансформатор, кабель приемного конца РЦ, кабельный резистор $R_{к2}$ и конденсатор $C_{АЛС}$ [6]. Матрица коэффициентов такого четырехполосника определяется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R_{з2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{n_{тр}} & 0 \\ 0 & n_{тр} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{каб2} & B_{каб2} \\ C_{каб2} & D_{каб2} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} 1 & R_{к2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{АЛС}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $A_{каб2}, B_{каб2}, C_{каб2}, D_{каб2}$ – коэффициенты четырехполосника кабеля приемного конца, которые определяются так же, как и коэффициенты питающего кабеля.

Рельсовая линия, как и кабельные линии, представляет собой цепь с распределенными параметрами. Поэтому, чтобы найти коэффициенты четырехполосника РЛ, можно использовать выражения (9)–(11). При этом коэффициент распространения волны γ и волновое сопротивление Z_v рельсовой линии определяются следующим образом:

$$\gamma = \sqrt{Z_p Y_{и}}, \quad (14)$$

$$Z_v = \sqrt{Z_p / Y_{и}}, \quad (15)$$

где $Z_p = R_p + j\omega L_p$ – полное километрическое сопротивление рельсовой петли; $Y_{и} = 1/R_{и} + j\omega C_{и}$ – полная километрическая

проводимость изоляции; R_p и L_p – километрические активное сопротивление и индуктивность рельсовой петли соответственно; $R_{и}$ и $C_{и}$ – километрические сопротивление изоляции и емкость рельсовой линии соответственно.

Частотная характеристика рельсовой линии определяется частотными зависимостями ее километрических параметров. В справочной литературе приводятся нормативные значения данных параметров только для нескольких фиксированных частот [1, 6]. Для получения частотных характеристик километрического активного сопротивления и индуктивности рельсов с медными приварными соединителями была выполнена интерполяция нормативных значений кубическим сплайном, результаты которой показаны на рис. 4.

Сопротивление изоляции рельсовой линии $R_{и}$ в зависимости от типа шпал, состояния балласта и погодных условий может изменяться в широких пределах – от десятых долей Ом·км до десятков Ом·км. При расчете рельсовых цепей на частотах до 2 кГц, как правило, считается, что сопротивление изоляции является чисто активным, то есть $C_{и} = 0$ [6].

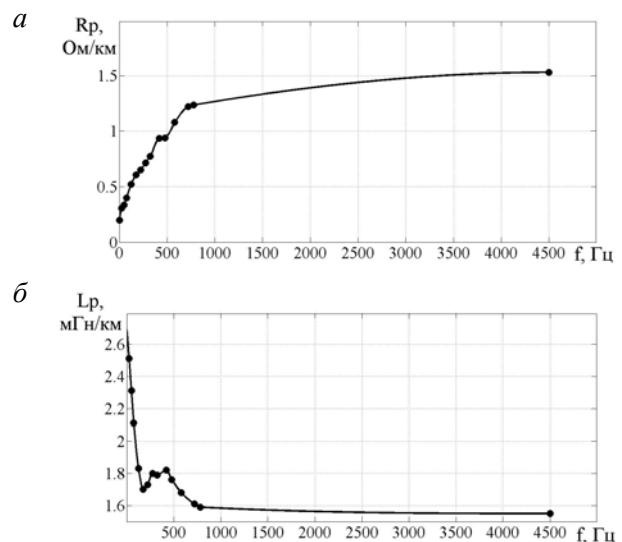


Рис. 4. Частотные зависимости километрических активного сопротивления (а) и индуктивности (б) рельсовых нитей:

точки – нормативные значения;
линия – результат интерполяции

Путевой приемник ТРЦ предназначен для приема и дешифрирования амплитудно-манипулированного сигнала контроля рельсо-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

вой линии и управления путевым реле в соответствии с уровнем этого сигнала. Подавление сигналов соседних рельсовых цепей, сигналов АЛС, гармоник тягового тока осуществляется с помощью входного полосового фильтра, собранного из двух пар связанных колебательных контуров [5]. В каждой паре связь между контурами выбирается выше критической, а между парами контуров реализуется слабая связь через усилительный каскад на биполярном транзисторе.

Для определения входного сопротивления путевого приемника рассмотрим схему замещения его входной цепи, содержащую первую пару связанных контуров L_2 , C_2 и L_3 , C_3 (рис. 5). В данную схему для учета влияния входного сопротивления транзисторного каскада, а также потерь в контурах введены резисторы R_2 и R_3 . С помощью катушки L_1 , которая индуктивно связана с катушкой L_2 , обеспечивается требуемое значение входного сопротивления.

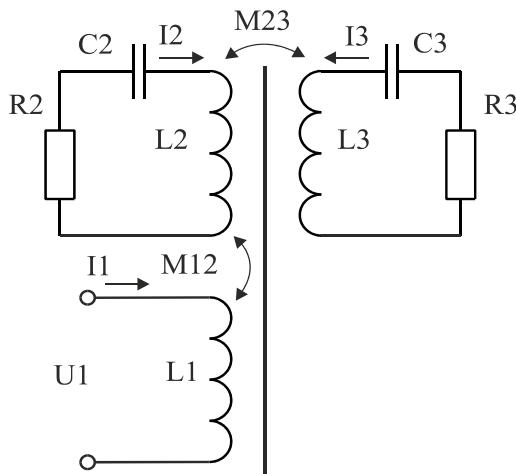


Рис. 5. Схема замещения входной цепи путевого приемника

Запишем второй закон Кирхгофа для каждого контура входной цепи приемника

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt}, \\ -M_{12} \frac{di_1}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt + M_{23} \frac{di_3}{dt}, \\ -M_{23} \frac{di_2}{dt} = R_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + \frac{1}{C_3} \int_0^t i_3 dt, \end{cases} \quad (16)$$

где M_{12} и M_{23} – взаимные индуктивности контуров. Для синусоидального входного напряжения уравнения (16) можно переписать в комплексной форме

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_{12}, \\ -\dot{I}_1 Z_{12} = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_3 Z_{23}, \\ -\dot{I}_2 Z_{23} = \dot{I}_3 Z_3, \end{cases} \quad (17)$$

где $Z_1 = j\omega L_1$, $Z_2 = R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)$,

$Z_3 = R_3 + j\left(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}\right)$ – полные сопротивления контуров; $Z_{12} = j\omega M_{12}$, $Z_{23} = j\omega M_{23}$ – сопротивления связи.

Из системы уравнений (17) получим выражение для определения входного сопротивления путевого приемника

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_1 - \frac{Z_{12}^2 Z_3}{Z_2 Z_3 - Z_{23}^2}. \quad (18)$$

В соответствии с выражением (18) была рассчитана частотная характеристика входного сопротивления путевого приемника, настроенного на несущую частоту 480 Гц. В справочной литературе [5] указано, что емкость конденсаторов C_2 и C_3 для частоты 480 Гц составляет 79,6 нФ. С учетом этого было определено, что индуктивность катушек L_2 и L_3 составляет 1,38 Гн. Параметры остальных элементов схемы замещения выбирались таким образом, чтобы получить нужное значение входного сопротивления на несущей частоте, обеспечить требуемую ширину полосы пропускания и реализовать связь между контурами выше критической. Результаты расчетов представлены на рис. 6. Полученная зависимость соответствует частотной характеристике реального путевого приемника [5], что подтверждает правомерность выбранной схемы замещения и значений ее параметров.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

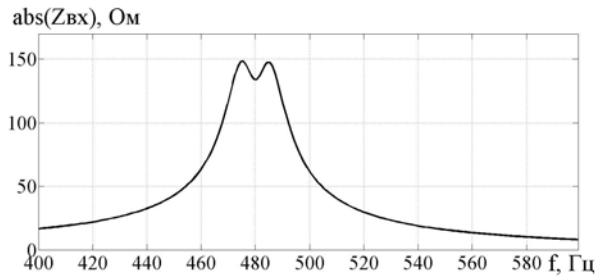


Рис. 6. Частотная характеристика модуля входного сопротивления путевого приемника

Для определения временной зависимости напряжения на входе путевого приемника выполнялись следующие операции:

- 1) формировался массив значений амплитудно-манипулированного сигнала $u_r(t)$;
- 2) с помощью быстрого преобразования Фурье определялся спектр $U_r(j\omega)$;
- 3) формировался массив частот, соответствующих полученному спектру;
- 4) для каждого значения частоты в соответствии с выражением (4) рассчитывался комплексный коэффициент передачи ТРЦ. При этом использовались полученные в результате интерполяции частотные характеристики первичных параметров рельсовой линии, а также частотная характеристика входного сопротивления путевого приемника;
- 5) в соответствии с выражением (6) рассчитывалась спектральная характеристика напряжения на входе путевого приемника;
- 6) с помощью быстрого обратного преобразования Фурье определялась временная характеристика напряжения на входе приемника.

Результаты

В качестве объекта исследования была выбрана тональная рельсовая цепь с такими параметрами:

- 1) несущая частота – 480 Гц;
- 2) частота модуляции – 8 Гц;
- 3) длина ТРЦ – 500 м;
- 4) длина питающего кабеля – 2,4 км;
- 5) длина приемного кабеля – 2 км;
- 6) емкость АЛС – 4 мкФ;
- 7) коэффициент трансформации согласующих трансформаторов – 38;
- 8) сопротивление защитных резисторов $R_{31}, R_{32} = 0,3 \text{ Ом}$;

9) сопротивление изоляции рельсовой линии $R_{\text{и}} = 50 \text{ Ом} \cdot \text{км}$.

Для кабельных линий были приняты следующие значения первичных параметров [6]: $R_{\text{каб}} = 47 \text{ Ом/км}$; $C_{\text{каб}} = 50 \text{ нФ/км}$; $L_{\text{каб}} = 0$; $G_{\text{каб}} = 0$. При определении сопротивления кабельных резисторов использовалось выражение [5, 6]

$$R_{\text{к}} = 400 - R_{\text{каб}} l_{\text{каб}}, \quad (19)$$

где $l_{\text{каб}}$ – длина кабельной линии.

Полученные в соответствии с описанной выше методикой временные диаграммы сигналов представлены на рис. 7.

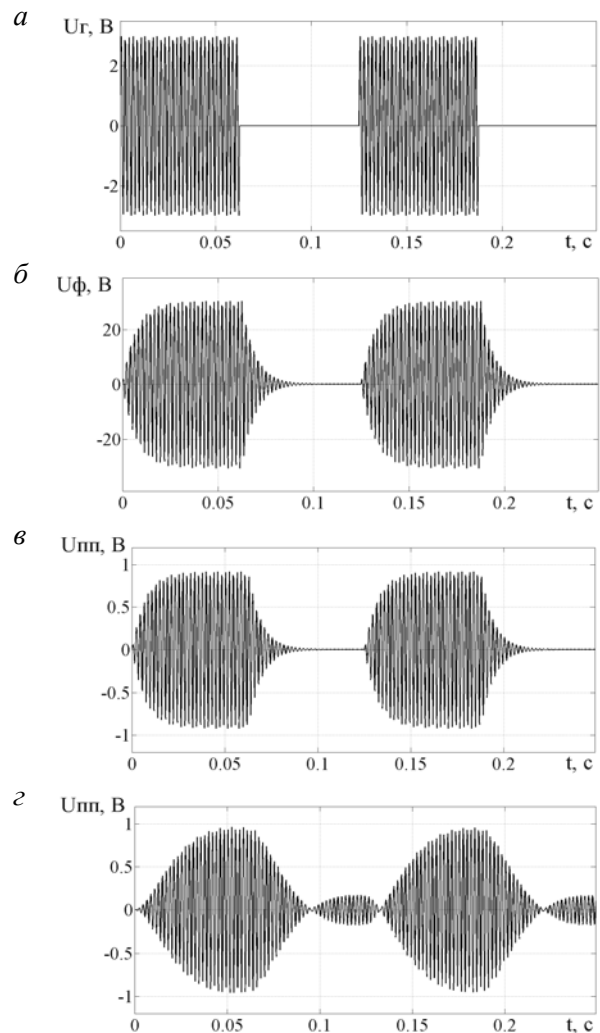


Рис. 7. Временные диаграммы сигналов:
а – на выходе генератора; б – на выходе фильтра ФПУ;
в – на входе приемника с активным сопротивлением;
г – на входе частотно-избирательного приемника

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Как видно, при прохождении через ТРЦ сигнальные импульсы заметно искажаются. Путевой фильтр ФПУ ограничивает верхнюю и нижнюю боковые полосы спектра сигнала КРЛ. Это приводит к затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов (см. рис. 7, а, б).

Напряжение на входе путевого приемника рассчитывалось для двух случаев: 1) для частотно-независимого приемника с активным входным сопротивлением $R_{\text{вх}} = 140 \text{ Ом}$; 2) для частотно-избирательного приемника, входное сопротивление которого определяется выражением (18). В первом случае форма сигнала на входе приемника соответствует форме сигнала на выходе путевого фильтра (см. рис. 7, б, в). Таким образом, рельсовая и кабельные линии, а также устройства защиты и согласования практически не влияют на форму сигнала КРЛ и изменяют только его уровень.

Зависимость входного сопротивления путевого приемника от частоты приводит к существенному искажению формы сигнальных импульсов (см. рис. 7, г). Ширина полосы пропускания приемника меньше, чем у путевого фильтра. Это приводит к еще большему ограничению спектра сигнала КРЛ и большему затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов. Кроме этого, в паузе появляется дополнительный импульс. Это можно объяснить спецификой связанных контуров, имеющих два частных резонанса. При воздействии фронта и среза сигнальных импульсов в связанных контурах на частотах частных резонансов возникают свободные колебания, в результате интерференции которых появляются биения [4].

Аналогичным образом можно исследовать шунтовой и контрольный режимы рельсовой цепи. При этом необходимо использовать соответствующую этим режимам схему замещения рельсовой линии.

Научная новизна и практическая значимость

Усовершенствован метод анализа тональных рельсовых цепей, что позволяет определить не только уровень, но и временную зависимость сигнала на входе путевого приемника при произвольном входном воздействии.

Полученная временная зависимость сигнала на входе путевого приемника будет полезна

при разработке новых более совершенных методов определения свободности тональной рельсовой цепи. Предложенный метод анализа рельсовых цепей может быть использован для поиска новых более информативных форм сигнального тока.

Выводы

1. Одно из направлений дальнейшего совершенствования тональных рельсовых цепей связано с использованием статистических методов обнаружения сигнала контроля рельсовой линии, которые базируются на знании формы и параметров такого сигнала.

2. Путевой фильтр ограничивает верхнюю и нижнюю боковые полосы спектра сигнала контроля рельсовой линии, что приводит к затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов.

3. Рельсовая и кабельные линии, а также устройства защиты и согласования практически не влияют на форму сигнальных импульсов и изменяют только их амплитуду.

4. Зависимость входного сопротивления путевого приемника от частоты приводит к заметному затягиванию фронта и среза сигнальных импульсов, а также к появлению дополнительного импульса в паузе. Последнее является результатом биений, которые возникают вследствие интерференции свободных колебаний в связанных контурах приемника.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов, А. И. Баженов, Н. Ф. Котляренко. – М. : Транспорт, 1992. – 384 с.
2. Гончаров, К. В. Исследование цифрового путевого приемника тональных рельсовых цепей / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 180–185.
3. Гончаров, К. В. Корреляционный путевого приемник тональных рельсовых цепей / К. В. Гончаров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 38. – С. 188–193.
4. Котельников, В. А. Основы радиотехники. В 2 ч. Ч. I / В. А. Котельников, А. М. Николаев. – М. : Радио и связь, 1954. – 373 с.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

5. Кулик, П. Д. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних рейкових кіл: керівний нормативний документ «Укрзалізниці» / П. Д. Кулик, О. О. Удовіков, В. І. Басов. – К. : Мінтрансв'язку України, 2006. – 236 с.
6. Кулик, П. Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. – К. : Изд. дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.
7. Майстренко, В. А. Статистические методы приема и обработки сигналов в системах радиосвязи / В. А. Майстренко, В. Ф. Попов. – Омск : ОмГТУ, 2009. – 120 с.
8. О повышении надежности рельсовых цепей с использованием цифровой обработки сигналов / А. П. Разгонов, А. Ю. Журавлев, Е. И. Ящук и др. // Электромагнитная совместимость и безопасность на ж.-д. трансп. (15.02-19.02.2011) : тез. IV междунар. науч.-практ. конф. / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 65–66.
9. Сердюк, Т. Н. Измерение электромагнитных помех в обратной тяговой сети / Т. Н. Сердюк, А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 134–139.
10. Тарасов, Е. М. Математическое моделирование рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий / Е. М. Тарасов. – Самара : СамГАПС, 2003. – 118 с.
11. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб. : Питер, 2003. – 572 с.
12. Федоров, Н. Е. Современные системы автоблокировки с тональными рельсовыми цепями / Н. Е. Федоров. – Самара : СамГАПС, 2004. – 132 с.
13. Чепцов, М. М. Методи синтезу сигнально-процесорної централізації стрілок і сигналів : монографія / М. М. Чепцов, А. Б. Бойнік, Д. М. Кузьменко. – Донецьк : ДонІЗТ, 2010. – 181 с.
14. 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. – Issue 1. – P. 33–37.
15. Gavrilyuk, V. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnij // Archives of Transport System Telematics. – 2010. – Vol. 3. – Issue 4. – P. 14–18.
16. Serdyuk, T. Automated measured of rail circuits parameters and harmonics of return tractive current to improve safety of movement / T. Serdyuk, V. Gavrilyuk // Archives of Transport System Telematics. – 2009. – Vol. 2. – Issue 3. – P. 17–21.
17. Theeg, G. Railway Signalling and Interlocking: International Compendium / G. Theeg, S. Vlasenko. – Hamburg : Eurailpress, 2009. – 448 p.

К. В. ГОНЧАРОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта goncharov_k@inbox.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТОНАЛЬНИХ РЕЙКОВИХ КОЛАХ

Мета. Пошук нових методів аналізу тональних рейкових кіл, визначення форми сигналу контролю рейкової лінії на вході колійного приймача. **Методика.** Для дослідження перехідних процесів використовувався метод частотних характеристик. За допомогою швидкого перетворення Фур'є визначався спектр сигналу на виході колійного генератора. Після визначення комплексної частотної характеристики тонального рейкового кола розраховувався спектр сигналу на вході колійного приймача. При цьому застосовувались отримані в результаті інтерполяції нормативних значень частотні характеристики первинних параметрів рейкової лінії, а також розрахована частотна характеристика вхідного опору колійного приймача. Для визначення часової залежності сигналу на вході приймача використовувалося обернене швидке перетворення Фур'є. **Результати.** У результаті виконаних досліджень було встановлено причини спотворення форми сигналів у тональних рейкових колах. Колійний фільтр, а також вхідний фільтр колійного приймача обмежують верхню та нижню бокові смуги спектру сигналу контролю рейкової лінії, що призводить до затягу-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

вання фронту та зрізу сигнальних імпульсів. Рейкова та кабельні лінії, а також пристрої захисту та узгодження практично не впливають на форму сигнальних імпульсів, а змінюють лише їх амплітуду. При дії фронту та зрізу сигнальних імпульсів у зв'язаних контурах приймача на резонансних частотах виникають вільні коливання, у результаті інтерференції яких відбуваються биття і з'являється додатковий міжсигнальний імпульс. **Наукова новизна.** Удосконалено метод аналізу тональних рейкових кіл, що дозволяє визначити не лише рівень, але й часову залежність сигналу на вході колійного приймача при довільному вхідному впливі. **Практична значимість.** Отримана часова залежність сигналу на вході колійного приймача буде корисною при розробці нових більш досконалих методів визначення вільності тонального рейкового кола. Запропонований метод аналізу рейкових кіл може бути використаний для пошуку нових більш інформативних форм сигнального струму.

Ключові слова: тональні рейкові кола; колійний приймач; перехідні процеси; комплексна частотна характеристика; спектр; спотворення

K. V. HONCHAROV^{1*}

^{1*}Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail goncharov_k@inbox.ru

INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES IN TONAL TRACK CIRCUITS

Purpose. The purpose of investigation is the search for new analysis methods of tonal track circuits, the definition of signal waveform at the track receiver input. **Methodology.** The method of frequency characteristics was used for investigation of transient processes. Signal spectrum at the output of track generator was determined using fast Fourier transform. Signal spectrum at the input of track receiver was calculated after determining complex frequency characteristic of the tonal track circuit. To carry out such calculations the frequency characteristics of rail line parameters have been obtained resulting interpolation of reference data and the frequency characteristic of track receiver impedance has been calculated. To determine the signal time dependence at the input of track receiver the inverse fast Fourier transform was applied. **Findings.** The causes of signal distortion in the tonal track circuits have been clarified. Track filter and input filter of track receiver restrict upper and lower sidebands of the signal spectrum, which leads to prolonging the rise and fall of signal pulses. The rail line, cable lines, and the devices for protection and alignment do not affect the shape of signal pulses, and change only their amplitude. At influence of rise and fall of signal pulses in the connected RLC circuits of receiver arise free oscillations at the resonance frequencies. As a result of the interference of these oscillations occur beats and appears additional pulse. **Originality.** The method for the analysis of tonal track circuits has been improved that allows determining not only the level but also the time dependence of signal at the track receiver for any input action. **Practical value.** Obtained time dependence of signal at the track receiver input will be useful in the development of the new more perfect methods for determining the state of tonal track circuit. Proposed method of track circuit analysis may be used to search for new more informative form of signal current.

Keywords: tonal track circuits; track receiver; transient processes; complex frequency characteristic; spectrum; distortion

REFERENCES

1. Arkatov V.S., Bazhenov A.I., Kotlyarenko N.F. *Relsovyye tsepi magistralnykh zheleznykh dorog* [Track circuits of mainline railways]. Moscow, Transport Publ., 1992. 384 p.
2. Honcharov K.V. Issledovaniye tsifrovogo putevogo priyemnika tonalnykh relsovykh tsepey [Investigation of digital track receiver of the tonal track circuits]. *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. 180-185.
3. Honcharov K.V. Korrelyatsionnyy putevoy priyemnik tonalnykh relsovykh tsepey [Correlation track receiver of the tonal track circuits]. *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 38, pp. 188-193.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

4. Kotelnikov V.A., Nikolayev A.M. *Osnovy radiotekhniki. Chast I* [Fundamentals of Radio Engineering. Part I]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1954. 373 p.
5. Kulik P.D., Udovikov O.O., Basov V.I. *Praktychnyi posibnyk z tekhnichnoho utrymanna apparatury tonal'nykh reikovykh kil* [Practical guide to technical facility retention of tonal track circuits]. Kyiv, Mintransv'iazku Ukrainy Publ., 2006. 236 p.
6. Kulik P.D., Ivakin N.S., Udovikov A.A. *Tonalnyye relsovyye tsepi v sistemakh ZHAT: postroyeniye, regulirovka, obsluzhivaniye, poisk i ustraneniye neispravnostey, povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti* [Tonal track circuits in railway automatic and telemechanic systems: buildup, control, service, searching and eliminating of failures, maintainability enhancement]. Kyiv, Manufaktura Publ., 2004. 288 p.
7. Maystrenko V.A., Popov V.F. *Statisticheskiye metody priyema i obrabotki signalov v sistemakh radiosvyazi* [Statistical methods for receiving and processing signals in radio communication systems]. Omsk, OmGTU Publ., 2009. 120 p.
8. Razgonov A.P., Zhuravlev A.Yu., Yashchuk Ye.I., Lebedev A.Yu., Razgonov S.A. O povyshenii nadezhnosti relsovykh tsep'ey s ispolzovaniyem tsifrovoy obrabotki signalov [About increasing the reliability of track circuits using digital signal processing]. *Tezisy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Elektromagnitnaya sovmestimost i bezopasnost na zheleznodorozhnom transporte"* [Proc. of the 4th Int. Sci. and Practical Conf. "Electromagnetic compatibility and safety on railway transport"]. Dnipropetrovsk, 2011, pp. 65-66.
9. Serdyuk T.N., Zavgorodniy A.V., Gavrilyuk V.I. Izmereniye elektromagnitnykh pomekh v obratnoy tyagovoy seti [Measurement of electromagnetic interference in the return traction network]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 134-139.
10. Tarasov Ye.M. *Matematicheskoye modelirovaniye relsovykh tsep'ey s raspredelennymi parametrami relsovykh liniy* [Mathematical modeling of the track circuits with distributed parameters of rail lines]. Samara, SamGAPS Publ., 2003. 118 p.
11. Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Tom 2* [Fundamentals of Electrical Engineering. Vol. 2]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2003. 572 p.
12. Fedorov N.Ye. *Sovremennyye sistemy avtoblokirovki s tonalnymi relsovymi tsepyami* [Modern automatic block systems with tonal track circuits]. Samara, SamGAPS Publ., 2004. 132 p.
13. Cheptsov M.M., Boinik A.B., Kuzmenko D.M. *Metody syntezy syhnalno-protseornoi tsentralizatsii strilok i syhnaliv* [Methods of synthesis signal processor centralizing of switches and signals]. Donetsk, DonIZT Publ., 2010. 181 p.
14. Gavrilyuk V., Zavgorodniy 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.
15. Gavrilyuk V., Zavgorodniy A. Statistical analysis of electromagnetic interference between AC traction current and track circuits. *Archives of Transport System Telematics*, 2010, vol. 3, issue 4, pp. 14-18.
16. Serdyuk T., Gavrilyuk V. Automated measured of rail circuits parameters and harmonics of return tractive current to improve safety of movement. *Archives of Transport System Telematics*, 2009, vol. 2, issue 3, pp. 17-21.
17. Theeg G., Vlasenko S. *Railway Signalling and Interlocking. International Compendium*. Hamburg, Eurailpress Publ., 2009. 448 p.

Стаття рекомендована к публікації д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюком (Україна);
д.ф.-м.н., проф. А. В. Коваленко (Україна)

Поступила в редколлегию 22.05.2013

Принята к печати 01.08.2013

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 629.424.2.018

Е. П. БЛОХИН¹, Р. Б. ГРАНОВСКИЙ^{1*}, Е. М. ДЗИЧКОВСКИЙ¹, А. Е. КРИВЧИКОВ¹,
Н. И. ГРАНОВСКАЯ¹, А. ЦИЮПА²

^{1*} Отраслевая научно-исследовательская лаборатория динамики и прочности подвижного состава,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна,
ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел./факс +38 (056) 793 19 08, эл. почта onildpps@gmail.com
² Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz Spolka Akcyjna Holding, 11, ul. Zygmunt Augusta, Bydgoszcz, Polska, 85-082

РЕЗУЛЬТАТЫ ХОДОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНОГО ПОЕЗДА ТИПА 630М ПРОИЗВОДСТВА АО PESA (ПОЛЬША)

Цель. Экспериментальное определение значений динамических показателей, характеризующих безопасность движения рельсового автобуса по прямым и криволинейным участкам железнодорожного пути и стрелочным переводам, и проверка соответствия их требованиям нормативных документов. **Методика.** Методы испытаний основываются на сравнении показателей динамических качеств автобуса, полученных экспериментально, с их допускаемыми значениями. В качестве определяющих безопасность движения показателей, численные значения которых приведены далее, используются: коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса; коэффициенты вертикальной динамики в первой и второй ступенях рессорного подвешивания; рамные силы; плавность хода. Определение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса производится по известной методике. Коэффициенты вертикальной динамики в каждой ступени рессорного подвешивания определяются как отношение динамических вертикальных прогибов к величинам их статических значений, соответствующих заданной населенности автобуса. **Результаты.** Значения коэффициентов вертикальной динамики вагонов поезда в первой и второй ступенях рессорного подвешивания, а также значения рамных сил и показателей плавности хода не превышали допустимых нормативных значений, а коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса был больше минимально допустимого значения. **Научная новизна.** Получены значения показателей, характеризующих динамические качества нового типа рельсового автобуса, и показана возможность его эксплуатации на магистральных путях железных дорог Украины. **Практическая значимость.** Определены допустимые скорости движения рельсового автобуса по различным участкам железнодорожного пути.

Ключевые слова: динамические испытания; дизельный поезд типа 630М двухсекционный; коэффициенты динамики; рамная сила; показатели плавности хода

Введение

Одним из мероприятий по обеспечению пригородных перевозок пассажиров на малодеятельных участках железных дорог Украины является использование двухсекционных дизельных поездов (рельсовых автобусов) типа 630М производства АО PESA Bydgoszcz S.A. (Польша) [12, 13].

В сентябре 2011 года Отраслевой научно-исследовательской лабораторией динамики и прочности подвижного состава железных дорог ДНУЖТ были проведены приемочные ходовые динамические испытания двухсекционного дизельного поезда 630М-001 производства АО PESA (Польша) после опытной эксплуатации с пробегом 56 452 км. Каждая секция поезда имеет кабину машиниста, моторную и поддерживающую тележки.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Основные технические данные дизельного поезда типа 630М следующие [3]:

| | |
|--|-----------------------------------|
| Ширина колеи, мм | 1 520 |
| Осевая формула..... | $(1_0-1_0)-(1-1)+(1-1)-(1_0-1_0)$ |
| Длина по осям автосцепок поезда, мм | 51 600±40 |
| Ширина кузова наружная, мм..... | 3 000 |
| База секции поезда, мм..... | 19 250±20 |
| База тележки, мм..... | 2 400±20 |
| Высота автобуса от уровня головок рельсов, мм..... | 4 435±40 |
| Высота оси автосцепок от уровня головок рельсов, мм..... | 1 060±20 |
| Масса поезда в служебном состоянии, т | 116±3 |
| Количество мест для сидения | 192 |
| Нагрузка от колесной пары на рельсы, кН | 180±3 % |
| Конструкционная скорость, км/ч | 120 |
| Среднее ускорение для тягового режима, м/с ² : | |
| – до скорости 60 км/ч..... | 0,30...0,80 |
| – до скорости 100 км/ч..... | 0,20...0,75 |
| Замедление при торможении со скорости 120 км/ч, м/с ² : | |
| – в режиме..... | R1,2 |
| – в режиме..... | P0,9 |
| Габарит: | 1-Т |
| – верхнее очертание | ГОСТ 9238-86 (черт. 10) [3] |
| – нижнее очертание | ГОСТ 9238-86 (черт. 11) [3] |
| Дальность хода на одной заправке топлива, км..... | 1 000 |
| Диапазон рабочих температур, °С..... | минус 50...плюс 40 |

Цель

Целью данной работы является экспериментальное определение значений динамических показателей, характеризующих безопасность движения рельсового автобуса по прямым и криволинейным участкам железнодорожного пути и стрелочным переводам, и проверка соответствия их требованиям нормативных документов.

Методика

Методы испытаний основываются на сравнении экспериментально определенных показателей динамических качеств автобуса с их допускаемыми значениями [6–8, 10, 11]. В качестве показателей динамических качеств автобуса используются величины сил, ускорений и взаимных перемещений элементов его экипажа, полученные при различных режимах движения подвижной единицы по рельсовому пути. В качестве определяющих безопасность движения показателей, численные значения которых приведены далее, используются: ко-

эффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса; коэффициенты вертикальной динамики в первой и второй ступенях рессорного подвешивания; рамные силы; плавность хода.

Рассматривается движение по прямым участкам пути со скоростями от 120 км/ч до конструкционной + 10 % с интервалом 10 км/ч. Определение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса производится по известной методике [10], в которой необходимые для расчета величины вертикальной и горизонтальной составляющих сил взаимодействия колеса и рельса вычисляются по величинам вертикальных сил, действующих на шейки колесной пары, и рамной силы. Коэффициенты вертикальной динамики в каждой ступени рессорного подвешивания определяются как отношение динамических вертикальных прогибов к величинам их статических значений, соответствующих заданной населенности автобуса. Динамические добавки деформаций рессорного подвешивания при движении автобуса определяются при помощи оттарированных соответствующим образом датчиков переме-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

щений. В качестве критериев комфорта рассматриваются величины показателей плавности хода в вертикальном и горизонтальном поперечном направлениях [9].

Во время испытаний поезда одна секция (А) была в порожнем состоянии, а вторая (Б) – загружена мешками с песком до номинальной грузоподъемности. Обмеры колесных пар показали, что толщина гребней составляла 27...29 мм, прокат – 2...3 мм, толщина ободов колес – 57 мм [1].

Испытания проводились на магистральных путях Юго-Западной железной дороги Украины. Первым был однопутный участок бесстыкового пути Чернигов–Нежин длиной 77 км, на котором уложены рельсы типа Р65, железобетонные шпалы с эпюрой 1 840 шт/км в прямых и 2 000 шт/км в кривых участках пути, балласт щебеночный. На опытном участке, кроме прямых, имеются кривые малого ($R_m < 400$ м), среднего ($400 \text{ м} < R_c < 700$ м) и большого ($R_b > 700$ м) радиусов. Состояние пути во время проведения испытаний оценивалось средним баллом 27, а максимальная разрешенная скорость движения по прямым составляла 120 км/ч.

Вторым опытным участком был двухпутный участок бесстыкового пути Круты–Плиски длиной 39 км с рельсами типа Р65 на железобетонных шпалах с эпюрой 1 840 шт/км в прямых и 2 000 шт/км в кривых участках пути, балласт щебеночный. На этом участке, кроме прямых, имеются кривые больших радиусов. Состояние пути во время проведения испытаний оценивалось средним баллом 18 для нечетного пути и 11 – для четного. Максимальная скорость движения поезда типа 630М по этому участку составила 140 км/ч.

Результаты

Значения коэффициентов вертикальной динамики вагонов поезда в первой и второй ступенях рессорного подвешивания, а также значения рамных сил и показателей плавности хода не превысили допустимых нормативных значений, а коэффициент запаса устойчивости против схода колеса с рельса был больше минимально допустимого значения.

На рис. 1 приведены зависимости минимальных значений коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса k_y от скорости движения электропоезда по прямым (рис. 1, а) и кривым большим (рис. 1, б), средних и малых радиусов (рис. 1, в). Значения k_y определялись для первой и четвертой осей каждой секции. На рис. 1 сплошной линией показано предельно допустимое значение параметра k_y [5, 6]. На рис. 1, в данные для скоростей $V < 70$ км/ч относятся к движению по кривым малых радиусов, а для скоростей $V > 70$ км/ч – по кривым средних радиусов. Как видно из рис. 1, наименьшие значения k_y наблюдались для второй (немоторной) тележки груженой секции.

На рис. 2 приведены зависимости от скорости движения максимальных вероятных значений коэффициентов вертикальной динамики вагонов поезда в первой ($k_{дв1}$) и второй ($k_{дв2}$) ступенях рессорного подвешивания, а также значений величины отношения рамных сил к статической нагрузке на ось ($k_{дт}$) при движении поезда по прямым участкам пути. Эти же зависимости приведены на рис. 3 для случая движения поезда по кривым большим радиусов. В тех случаях, когда допускаемые значения для моторных и немоторных тележек совпадают, здесь и далее они показаны сплошной горизонтальной линией. Значения $k_{дв1}$ для моторных и немоторных тележек различны, поэтому на соответствующих рисунках показаны две горизонтальные линии – сплошная соответствует допускаемому значению для немоторной тележки, пунктирная – для моторной [5, 6]. Как видно из рис. 2 и 3, при движении поезда по прямым участкам пути значения коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики значительно меньше допускаемых значений, а при движении по кривым большого радиуса значения $k_{дт}$ приближаются к допускаемым при скоростях движения 120...130 км/ч.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

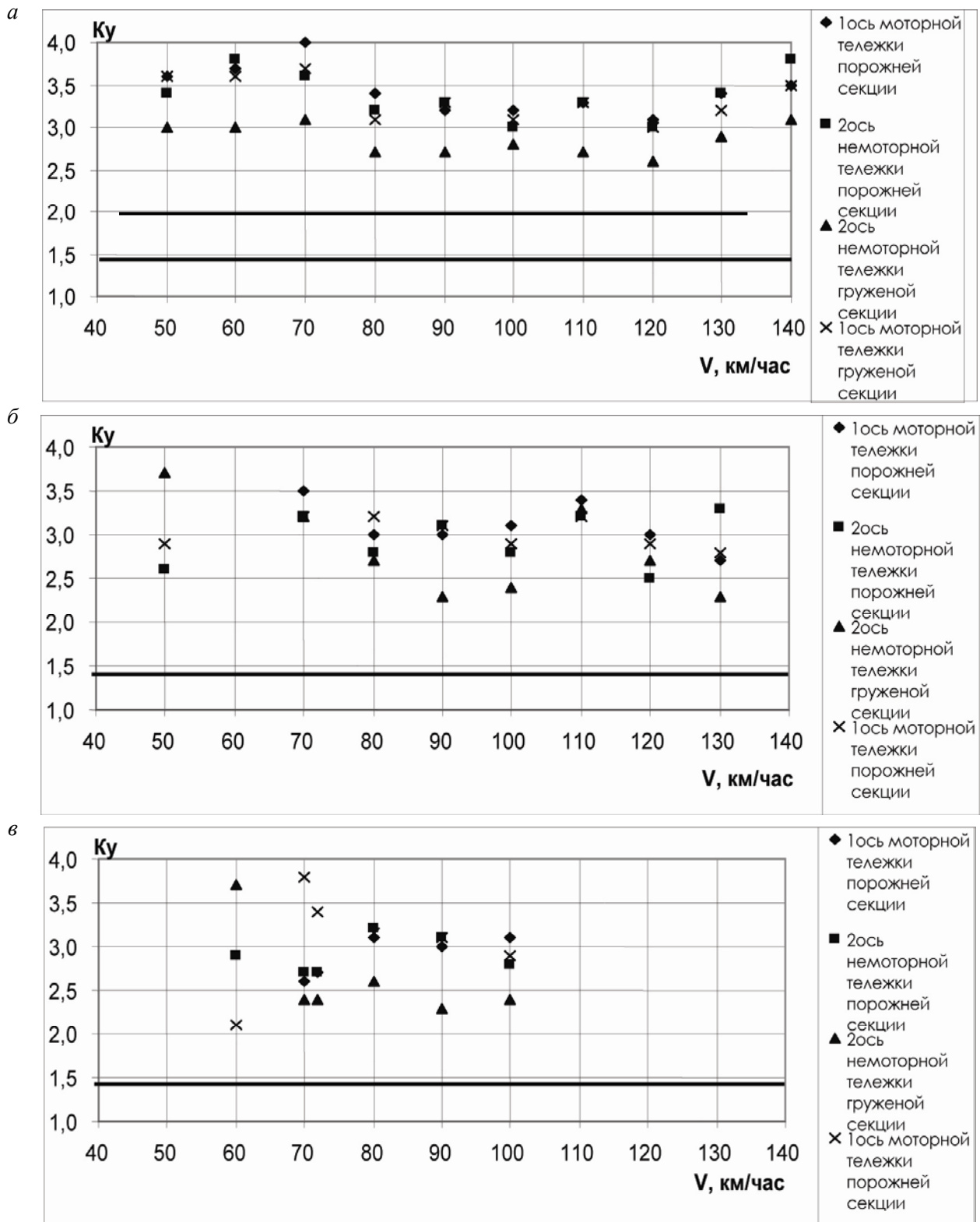


Рис. 1. Зависимости от скорости коэффициентов запаса устойчивости против схода колеса с рельса при движении дизельного поезда типа 630М:

а – по прямым; б – по кривым больших радиусов; в – по кривым малых и средних радиусов

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

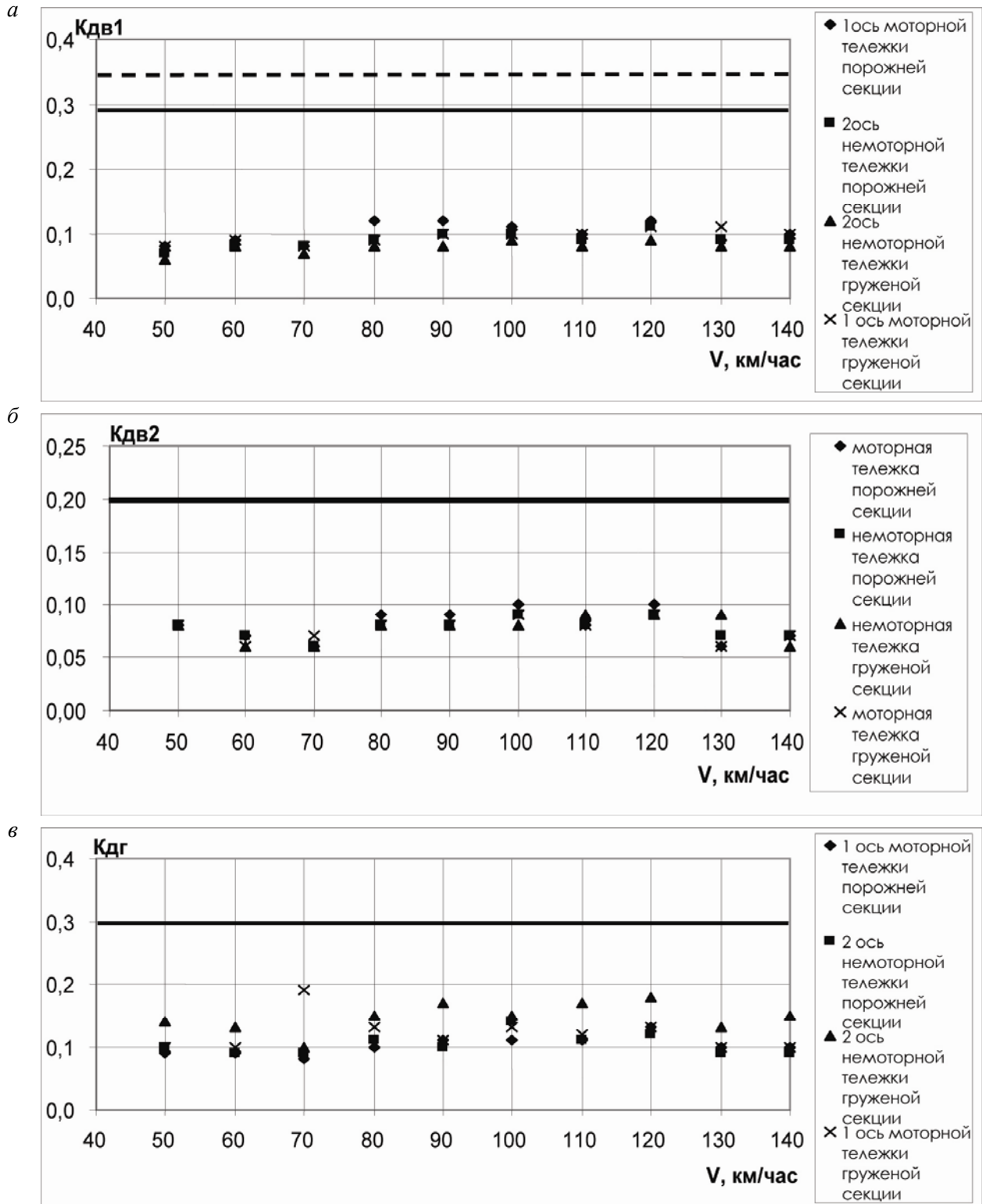


Рис. 2. Зависимости от скорости при движении дизельного поезда типа 630М по прямым:

а – коэффициентов вертикальной динамики в первой ступени рессорного подвешивания;

б – коэффициентов вертикальной динамики во второй ступени рессорного подвешивания;

в – коэффициентов горизонтальной динамики

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

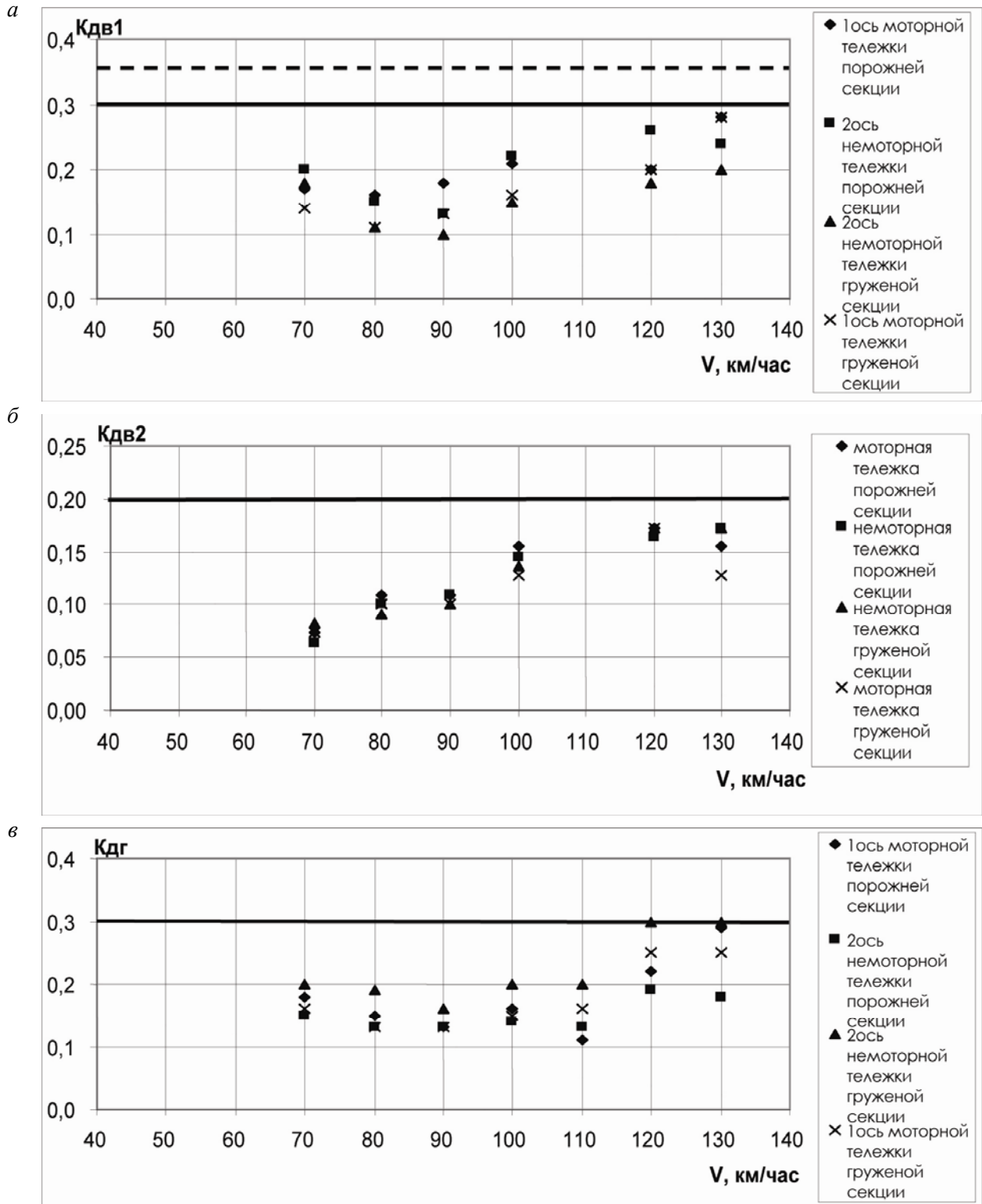


Рис. 3. Зависимости от скорости при движении дизельного поезда типа 630М по кривым больших радиусов:

а – коэффициентов вертикальной динамики в первой ступени рессорного подвешивания;*б* – коэффициентов вертикальной динамики во второй ступени рессорного подвешивания;*в* – коэффициентов горизонтальной динамики

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

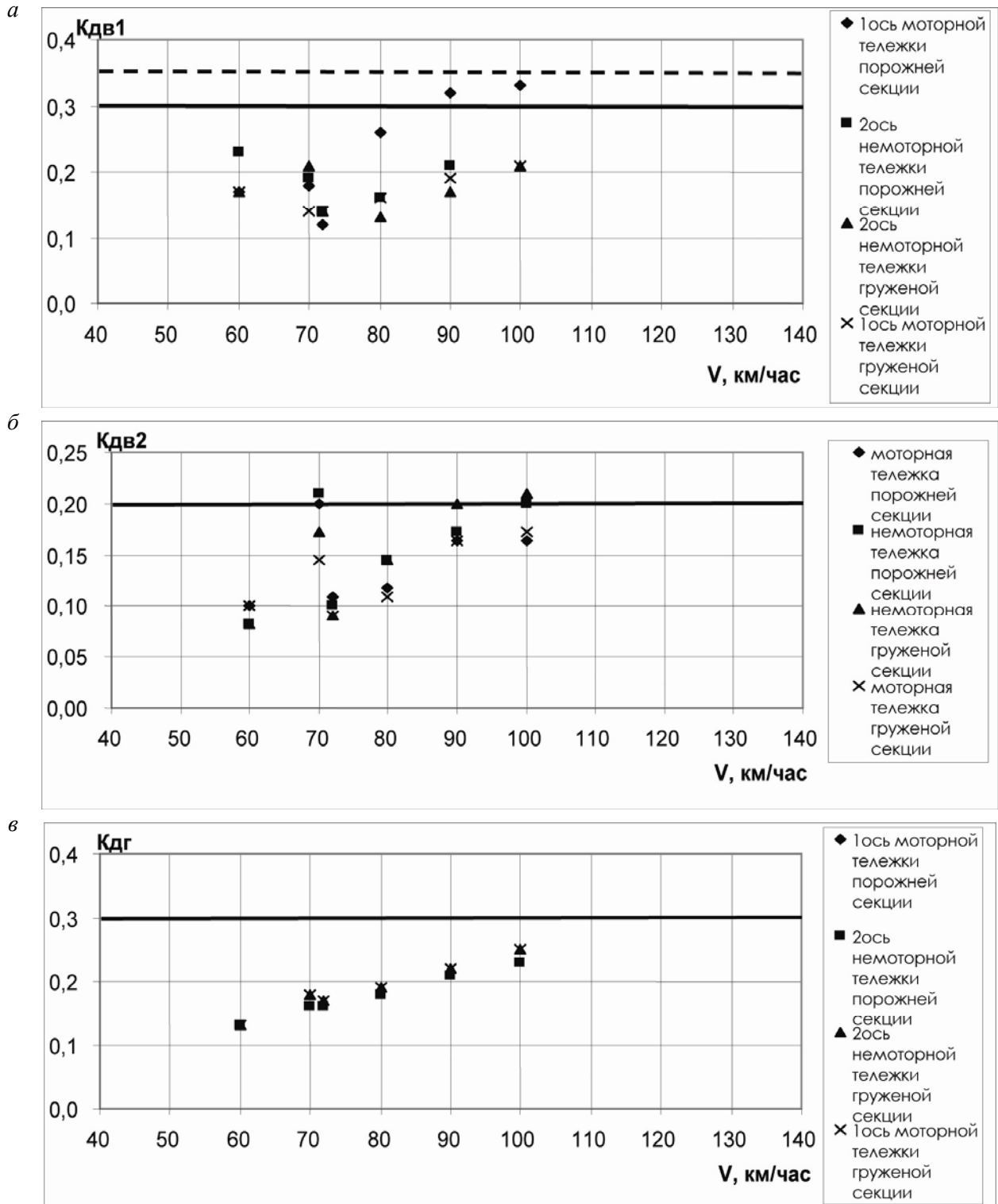


Рис. 4. Зависимости от скорости при движении дизельного поезда типа 630М по кривым малых и средних радиусов:

а – коэффициентов вертикальной динамики в первой ступени рессорного подвешивания;

б – коэффициентов вертикальной динамики во второй ступени рессорного подвешивания;

в – коэффициентов горизонтальной динамики

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

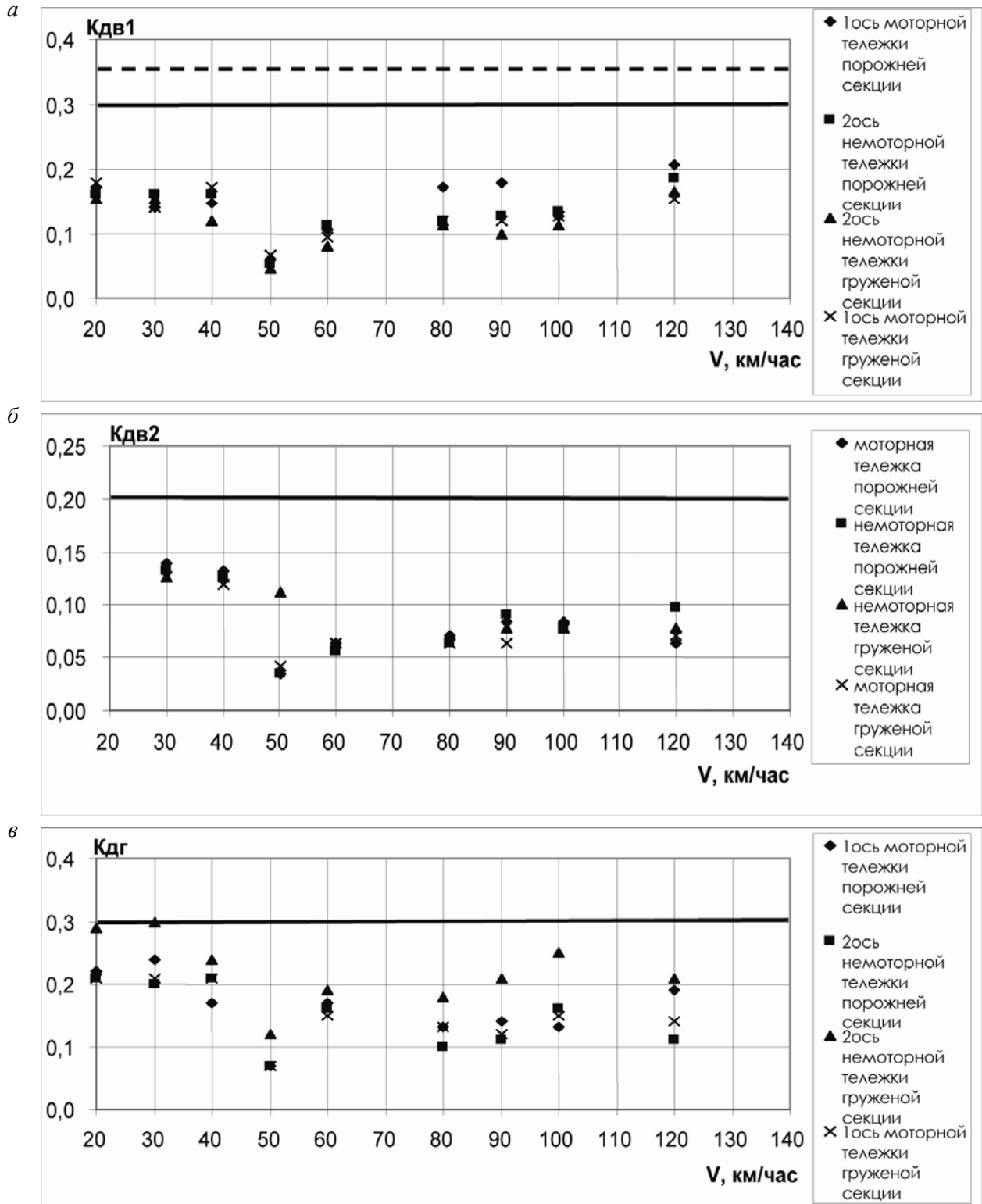


Рис. 5. Зависимости от скорости при движении дизельного поезда типа 630М по стрелкам:

а – коэффициентов вертикальной динамики в первой ступени рессорного подвешивания;

б – коэффициентов вертикальной динамики во второй ступени рессорного подвешивания;

в – коэффициентов горизонтальной динамики

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

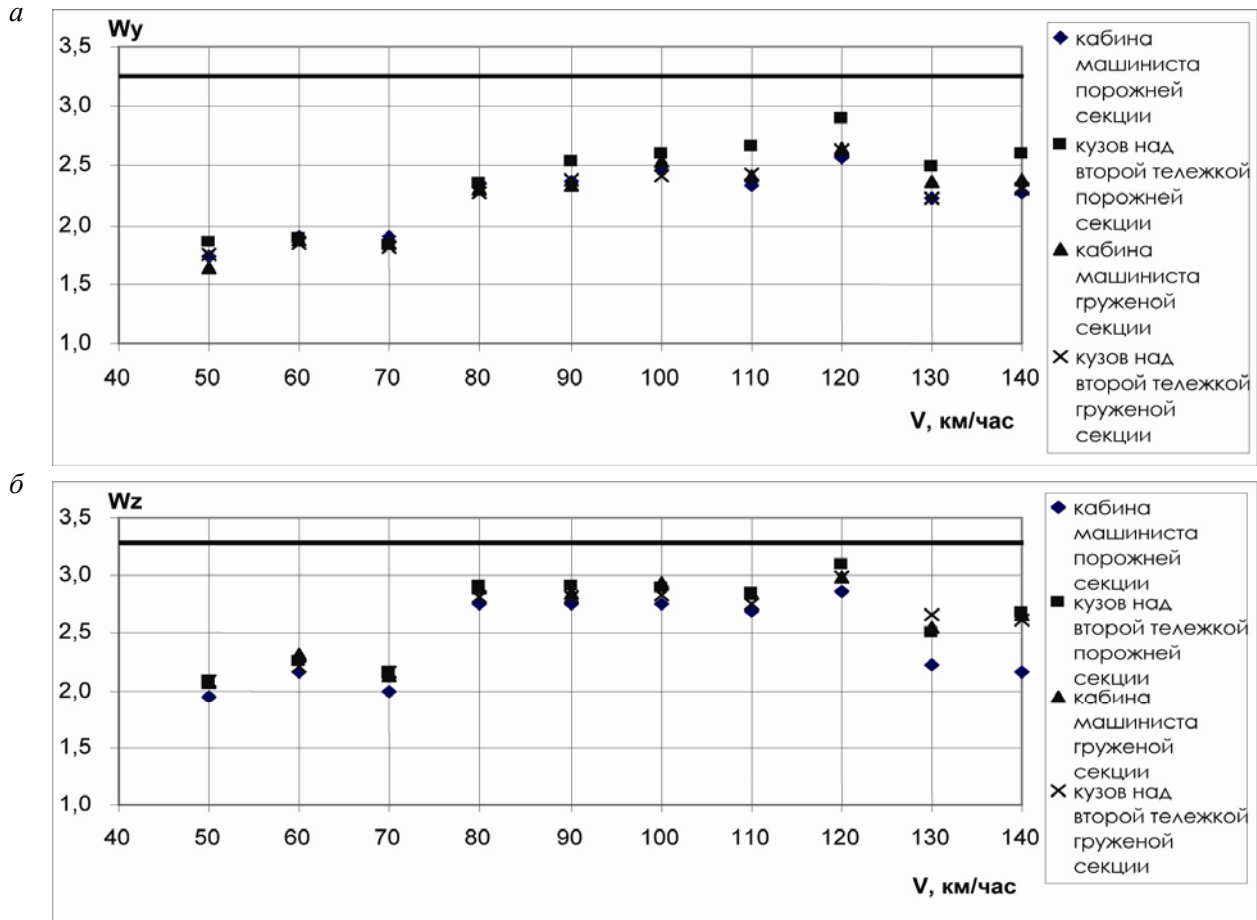


Рис. 6. Зависимости плавности хода от скорости движения дизельного поезда типа 630М:
 а – в горизонтальном направлении; б – в вертикальном направлении

На рис. 4 приведены зависимости от скорости движения максимальных вероятных значений коэффициентов вертикальной динамики вагонов поезда в первой ($k_{дв1}$) и второй ($k_{дв2}$) ступенях рессорного подвешивания, а также значений величины отношения рамных сил к статической нагрузке на ось ($k_{дг}$) при движении по кривым малого R_m ($V < 70$ км/ч) и среднего R_c ($V > 70$ км/ч) радиусов. Как видно из рис. 4, на предельных допустимых скоростях движения по кривым малых и средних радиусов значения $k_{дв}$ достигают предельно допустимых значений.

При движении по стрелочным переводам со скоростями до 40 км/ч на боковой путь, а с большими скоростями – на проход коэффициенты динамики $k_{дв1}$, $k_{дв2}$ и $k_{дг}$ не превышают допустимых значений (рис. 5).

Значения плавности хода в горизонтальном W_y и вертикальном W_z направлениях, определенные по соответствующим ускорениям, замеренным в кабине машиниста и шкворневых сечениях секций поезда, меньше допустимого значения 3,25 (рис. 6).

Научная новизна и практическая значимость

По результатам ходовых динамических испытаний нового для украинских железных дорог типа подвижного состава – двухсекционного дизельного поезда типа 630М производства АО PESA (Польша) определены допустимые скорости его движения по различным участкам железнодорожного пути, получены значения показателей, характеризующих его динамические качества.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Выводы

Дизель-поезд 630М производства АО PESA (Польша) по своим динамическим качествам и показателям безопасности движения соответствует требованиям нормативных документов и может эксплуатироваться на магистральных путях Украины с установленными скоростями для пригородного подвижного состава, имеющего конструкционную скорость движения 120 км/ч.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ВНД 32.0.07.001-2001. Інструкція з формування, ремонту та утримання колісних пар тягового рухомого складу залізниць. – К. : Минтранс, 2011. – 168 с.
- ГОСТ 9238-83. Габариты приближения строений и подвижного состава железных дорог колеи 1520 (1524) мм. – Введ. 1984-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 30 с.
- Двохсекційний дизельний поїзд 630М/630Мі для пасажирських перевезень : техн. завдання 630М.00.000-0 ТЗ/PESA Bydgoszcz S.A. ; кер. Журавський, викон. Цюпа А. – Bydgoszcz, 2010. – 54 с.
- Нормы допустимых швидкостей руху рухомого складу по залізничних коліях державної адміністрації залізничного транспорту України шириною 1520 мм : ЦП/0235 : затв. наказом Укрзалізничі від 14.12.2010 р. № 778-Ц. – К., 2011. – 72 с.
- Нормы безопасности электропоезда : НБ ЖТ ЦТ 03-98 : утв. приказом Минтранса России от 11.02.2009 г. № 22, приложение № 15. – М., 2009. – С. 139–272.
- Нормы расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М. : ВНИИЖТ, 1997. – 145 с.
- О концепциях статистических измерений / Е. П. Блохин, М. Л. Коротенко, Р. Б. Грановский и др. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2008. – Вип. 24. – С. 7–17.
- Примеры казусов, произошедших при постановке натурных испытаний и обработке их результатов / М. Л. Коротенко, Р. Б. Грановский, С. А. Кострица и др. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 22–28.
- СОУ МПП 45.060-204:2007. Вагони пасажирські. Плавність руху. Методи визначення. – К. : Мінпромполітики України, 2007. – 12 с.
- СТ ССФЖТ ЦТ 16-98. Стандарт системы сертификации на федеральном железнодорожном транспорте. Тяговый подвижной состав. Типовая методика динамико-прочностных испытаний электропоездов и дизель-поездов. – М. : МПС, 1998. – 25 с.
- Design simulation to pass tests for acceptance as defined in prEN14363 or UIC518 / B. Fisher, R. Menssen, O. Markova, H. Kovtun // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2005. – Вип. 8. – С. 115–121.
- Kettner, J. Den Schienenverkehr fit machen für Zukunft / J. Kettner // ETR: Eisenbahntechnik. Rdsch, 2011. – № 9. – P. 10–16.
- Lübke, D. Zweiteiliger Regionaltriebwagen mit Dieselantrieb / D. Lübke // ETR: Eisenbahntechnik. Rdsch, 2011. – № 9. – P. 62–65.

Є. П. БЛОХІН¹, Р. Б. ГРАНОВСЬКИЙ^{1*}, Є. М. ДЗИЧКОВСЬКИЙ¹, О. Є. КРИВЧИКОВ¹,
Н. Й. ГРАНОВСЬКА¹, А. ЦЮПА²

^{1*}Галузева науково-дослідна лабораторія динаміки та міцності рухомого складу, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел./факс +38 (056) 793 19 08, ел. пошта onildpps@gmail.com

²Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz Spolka Akcyjna Holding, 11, ul. Zygmunt Augusta, Bydgoszcz, Polska, 85-082

РЕЗУЛЬТАТИ ХОДОВИХ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДИЗЕЛЬНОГО ПОЇЗДА ТИПУ 630М ВИРОБНИЦТВА АТ PESA (ПОЛЬЩА)

Мета. Експериментальне визначення значень динамічних показників, що характеризують безпеку руху рейкового автобуса на прямих і криволінійних ділянках залізничної колії та стрілочних переводах, і перевірка їх відповідності вимогам нормативних документів. **Методика.** Методи випробувань базуються на порівнянні експе-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

риментально визначених показників динамічних якостей автобуса з їх допустимими значеннями. Як показники, що визначають безпеку руху, числові значення яких наведено далі, використовуються: коефіцієнт запасу стійкості проти сходу колеса з рейки; коефіцієнти вертикальної динаміки в першому та другому ступенях ресорного підвішування; рамні сили; плавність ходу. Визначення коефіцієнта запасу стійкості проти сходу колеса з рейки виконується за відомою методикою. Коефіцієнти вертикальної динаміки в кожному ступені ресорного підвішування визначаються як відношення динамічних вертикальних прогинів до величин їх статичних значень, що відповідають заданій населеності автобуса. **Результати.** Значення коефіцієнтів вертикальної динаміки вагонів поїзда в першому й другому ступенях ресорного підвішування, а також значення рамних сил і показників плавності ходу не перевищили допустимих нормативних значень, а коефіцієнт запасу стійкості проти сходу колеса з рейки був більшим за мінімально допустиме значення. **Наукова новизна.** Отримано значення показників, що характеризують динамічні якості нового типу рейкового автобуса, та визначена можливість його експлуатації на магістральних коліях залізниць України. **Практична значимість.** Визначено допустимі швидкості руху рейкового автобуса по різних ділянках залізничної колії.

Ключові слова: динамічні випробування; дизельний поїзд типу 630М двосекційний; коефіцієнти динаміки; рамна сила; показники плавності ходу

[E. P. BLOHIN¹], R. B. GRANOVSKIY^{1*}, E. M. DZICHKOVSKIY¹, A. E. KRIVCHIKOV¹,
N. I. GRANOVSKAYA¹, A. TSIYUPA²

¹*Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. / fax +38 (056) 793 19 08, e-mail onildpps@gmail.com

²Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz Spolka Akcyjna Holding, 11, ul. Zygmunta Augusta, Bydgoszcz, Polska, 85-082

DYNAMIC RUNNING TEST RESULTS OF DIESEL TRAIN 630M OF PRODUCTION A.S. PESA (POLAND)

Purpose. Experimental definition of values of the dynamic parameters characterizing traffic safety of the rail autobus in tangent and curved track sections and switches, and conformity check to their demands of normative documents. **Methodology.** Test methods are based on comparison of experimentally determined dynamic qualities of the autobus with their admitted values. As the parameters defining traffic safety, the numerical value of which is resulted further, are used the following ones: the derailment stability coefficient; vertical dynamics coefficients in the first and second steps of spring suspension; the frame forces; smoothness of movement. Determination of the derailment stability coefficient is performed by a known technique. Vertical dynamics coefficients in the each step of spring suspension are defined as the relation of dynamic vertical bending flexures to magnitudes of their static values corresponding to the set occupancy of the autobus. **Findings.** Coefficient values of the vertical dynamics of train carriages in the first and second steps of spring suspension, as well as the value of frame forces and parameters of movement smoothness did not exceed the admissible standard values, and was higher than the minimum admissible value. **Originality.** Values of the parameters characterizing dynamic qualities of new type of the rail autobus are obtained, and possibility of its operation on the main ways of the railways of Ukraine is shown. **Practical value.** Admissible speeds of the rail autobus traffic on various railway track sections are defined.

Keywords: dynamic tests; the diesel train 630M two-section; dynamic factor; frame strength; performance of movement smoothness

REFERENCES

1. *Instruktsiia z formuvannia, remontu ta utrymannia kolisnykh par tiahovoho rukhomoho skladu zaliznyts* [The instruction on formation, repair and the maintenance of wheel pairs of the railway traction rolling stock]. Kyiv, Mynttransport Publ., 2011. 168 p.
2. *GOST 9238-83. Gabarity priblizheniya stroyeniy i podvizhnogo sostava zheleznykh dorog kolei 1520 (1524) mm* [Approach dimensions of structures and rolling stock of the railways of the track 1520 (1524) mm]. Moscow, Standartinform Publ., 1988. 30 p.
3. Tsiyupa A. *Dvokhseksiyni dyzelnyi poizd 630M/630Mi dlia pasazhyrskykh perevezen* [Two-section diesel train 630M/630Mi for passenger conveyances]. Bydgoszcz Publ., 2010. 54 p.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

4. *Normy dopustymykh shvydkostei rukhu rukhomoho skladu po zaliznychnykh kolyakh derzhavnoi administratsii zaliznychnoho transportu Ukrainy shyrynoi 1520 mm* [Admissible motion speeds standards of the rolling stock in the tracks of the state administration of the Ukrainian railway transport with width of 1520 mm]. Kyiv, 2011. 72 p.
5. *Normy bezopasnosti elektropoyezda* [Safety standards of electric train]. Moscow, 2009, pp. 139-272.
6. *Normy rascheta i otsenki prochnosti nesushchikh elementov i dinamicheskikh kachestv ekipazhnoy chasti motorvagonnogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog MPS RF kolei 1520 mm* [Standards for calculating and assessing the supporting elements strength and the dynamic qualities of the multiple unit undercarriage of the railroads of the Ministry of Communications of RF with the track 1520 mm]. Moscow, VNIIZhT Publ., 1997. 145 p.
7. Blokhin Ye.P., Korotenko M.L., Granovskiy R.B., Garkavi N.Ya., Fedorov Ye.F., Filippenko Ye.I., Litvinenko O.N. O kontseptsyakh statisticheskikh izmereniy [About the concepts of statistical measurements]. *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 24, pp. 7-17.
8. Korotenko M.L., Granovskiy R.B., Kostritsa S.A., Sultan A.V., Glukhov V.V., Klimenko I.V., Garkavi N.Ya., Fedorov Ye.F., Karpenko V.V. Primery kazusov, proizoshedshikh pri postanovke naturnykh ispytaniy i obrabotke ikh rezultatov [Instances of the incidents, which have occurred at statement of full-scale tests and machining of their results]. *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. 22-28.
9. *SOU MPP 45.060-204:2007. Vahony pasazhyrski. Plavnist rukhu. Metody vyznachennia* [SOU MPP 45.060-204:2007. Passenger cars. Ride quality. Determination methods]. Kyiv, Minprompolityky Ukrainy Publ., 2007. 12 p.
10. *ST SSFZhT TsT 16-98. Standart sistemy sertifikatsii na federalnom zheleznodorozhnom transporte. Tyagovyy podvizhnoy sostav. Tipovaya metodika dinamiko-prochnostnykh ispytaniy elektro-poyezdov i dizel-poyezdov* [ST SSFZhT TsT 16-98. Standards of certification systems on the federal railway transport. Traction rolling stock. Typical methodology of dynamic-strength tests of electric and diesel trains]. Moscow, MPS Publ., 1998. 25 p.
11. Fisher B., Menssen R., Markova O., Kovtun H. Design simulation to pass tests for acceptance as defined in prEN14363 or UIC518. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2005, issue 8, pp. 115-121.
12. Kettner J. Den Schienenverkehr fit machen für Zukunfft. *ETR: Eisenbahntechnik.Rdsch*, 2011, no. 9, pp.10-16.
13. Lübke D. Zweiteiliger Regionaltriebwagen mit Dieselantrieb. *ETR: Eisenbahntechnik.Rdsch*, 2011, no. 9, pp. 62-65.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Л. Горобцом (Украина); д.т.н.,
чл.-кор. НАНУ В. Ф. Ушкаловым (Украина)

Поступила в редколлегию 14.05.2013

Принята к печати 05.08.2013

UDC 621.331:621.311.4:621.3.025

D. O. BOSIY^{1*}^{1*}Dep. «Railways Power Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician
V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (050) 698 23 95, e-mail dake@i.ua

POWER QUALITY COMPLEX ESTIMATION AT ALTERNATING CURRENT TRACTION SUBSTATIONS

Purpose. At alternating current traction substations are used three-winding transformers. This scheme comes to significant costs from power quality disturbances at each supplier. The most significant power quality indices at alternating current traction substation are voltage deviation, voltage unbalance and harmonic distortion. The purpose of this article is power quality complex estimation at two traction substations that work on the one district of traction network. **Methodology.** The measurements were made according to accepted program during 24 hours with 1 sec discretization. A few power quality analyzers PM175 are used to record data with time synchronization. The scheme of measurements means that devices are connected through current and potential transformers at the each level of voltage. **Findings.** Voltage level at different substation is various due to power losses in primary network. The voltage in one phase of 1-st substation is bigger than in other phases. Voltage THD values according to standard requirements are below norm only for primary 154 kV networks. For another traction and regional networks voltage THD values are above norm value. The voltage unbalances in 154 kV networks are below voltage unbalance in 35 kV networks. Besides the voltage unbalance in 154 kV network is below 2% that complies with the requirements of standard. At the same time we can consider that voltage and current spectrums consist from discrete harmonics with frequencies that multiples of the fundamental frequency. **Originality.** Voltages at the connection points of traction substations to supply lines are complex stationary random process that determines the voltage mode of the external power supply system of each traction substation. The flows of active and reactive power of the higher harmonics at AC traction substation are directed opposite power of the fundamental harmonic. The power flows on higher harmonics create the disturbing impact on related devices. The total power at AC traction substation consists of 61.8% of the active power, 32.5% of the reactive power of the 1st harmonic and 5.7% of the distortion power in the quadrature components. **Practical value.** Analysis of the quadrature components suggests that traditional approaches to reactive power compensation at the fundamental frequency will be sufficiently effective. But the influence of the distortion power on reducing energy losses must be also researched. Besides reactive power compensation should be considered with the issue of reducing the basic power quality indices to standardized values.

Keywords: power quality; alternating current; three-phase system; traction substation; measurement; harmonic; distortion; unbalance; spectrum; powers flow

Introduction

The global electrification of railway transport in Soviet Union force to use three-winding transformers at AC traction substation. The advantage of this scheme is in refusing from individual transformer for regional power supply. In that case all regional suppliers consume electric power from third winding of transformer which called regional. But in real these scheme comes to significant costs from power quality disturbances at each supplier.

The most significant power quality indices at AC traction substation are voltage deviation, voltage unbalance and harmonic distortion.

As a rule regional suppliers have some voltage increasing in one of three phases. Such increasing caused not equaling load of left and right side of traction substation. Currents of left and right sides

load two working windings. In the third winding flows the difference of that currents with 1/3 multiplier. Therefore third winding are not fully loaded and it caused power quality problems.

Each power transformer at AC traction substation has voltage regulation device which works under load. But it regulates voltage in all windings together and can't be used for three-phase balancing. Besides the voltage mode at AC traction substation is choose to provide minimal voltage level at the most difficult district of traction network.

Purpose

The purpose of this article is power quality complex estimation at two traction substation that works on the one district of traction network.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Methodology

The measurements were made according to accepted program during 24 hours with 1 sec discretization. A few power quality analyzers such PM175 are used to record data with time synchronization. Simplified scheme of measurements are shown at Fig. 1. The scheme means that devices are connected through current and potential transformers at the each level of voltage.

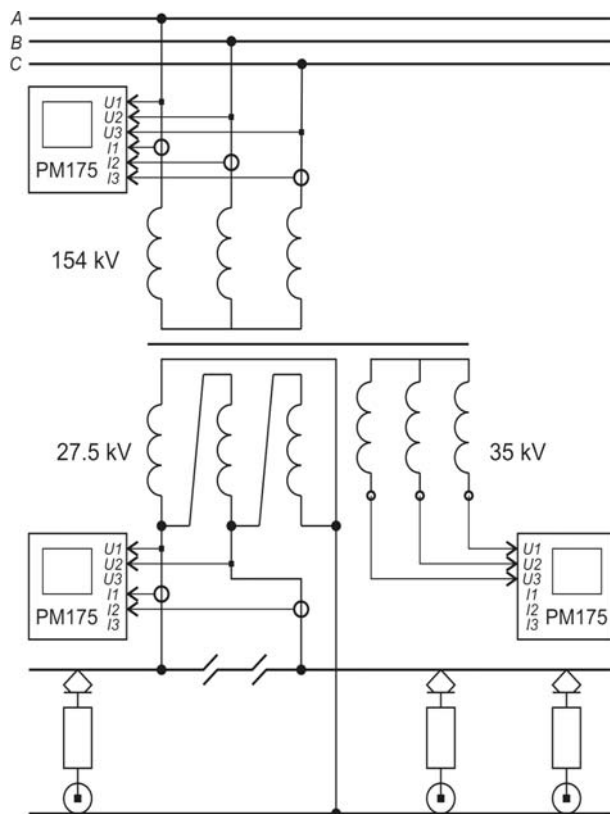


Fig. 1. The scheme of measurements at AC traction substation

Voltage deviations in primary network 154 kV of each traction substation are shown at Fig. 2 during 24 hours. Voltage level at different substation is various due to power losses in primary network. Besides, the voltage in one phase of 1-st substation is bigger than in other phases.

Voltage regulating devices helps to align voltages at other points of coupling either 35 kV or 27.5 kV. Voltage deviations in these networks of one traction substation are shown at Fig. 3. When voltage equalization in 35 kV is needed the compensation current may flows throw traction network. In this case compensation current causes additional useless power losses.

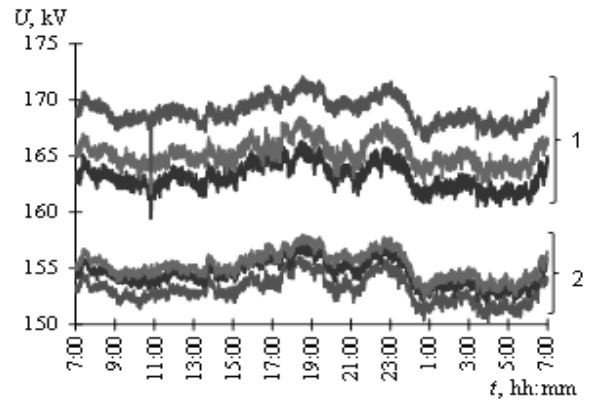


Fig. 2. Voltage deviations in 154 kV primary networks

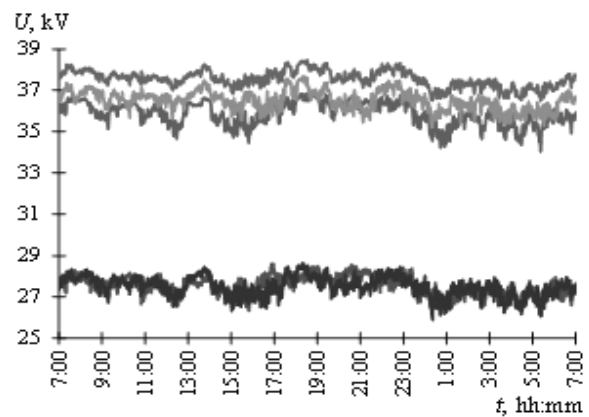


Fig. 3. Voltage deviations in 35 kV and 27.5 kV networks

Total harmonic distortion and three-phase unbalance

Voltage total harmonics distortions (THD) for each phase are similar. Voltage THD values according to standard requirements [4] are below norm only for primary 154 kV networks (Fig. 4). For another traction and regional networks voltage THD values are above norm value.

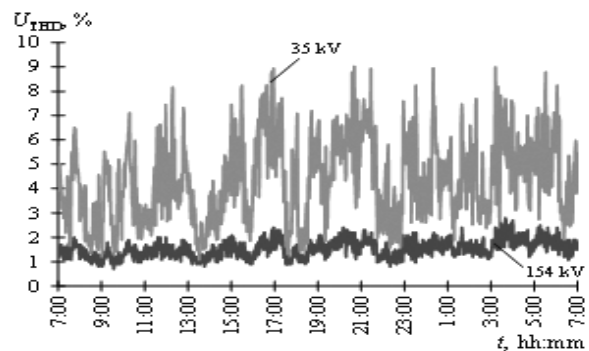


Fig. 4. Voltage distortions in 35 kV and 154 kV networks

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

According to standard [4] the norm of voltage THD values for 110 – 330 kV networks are below 2%. As for 35 kV and 27.5 kV networks the norm values are below 4%.

The norm of voltage unbalance is 2% and it doesn't depend on the voltage range.

The voltage unbalance series are shown at Fig. 5. As can be seen the voltage unbalance in 154 kV networks are below voltage unbalance in 35 kV networks. Besides the voltage unbalance in 154 kV network is below 2% that complies with the requirements of standard. The voltage unbalance in 35 kV network is higher than 2% and its maximum reached within 4.7% value.

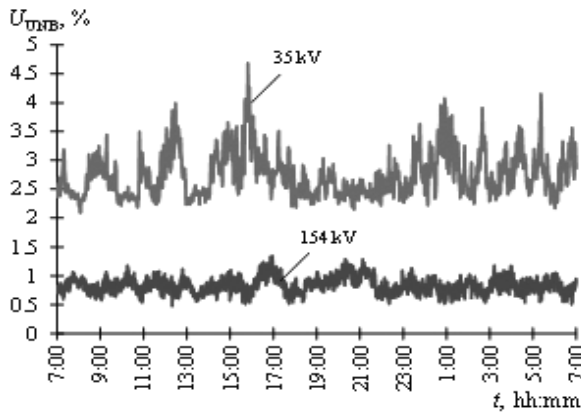


Fig. 5. Voltage unbalance in 35 kV and 154 kV networks

Traditionally the voltage unbalance caused by unbalancing currents in a three-phase system. The primary currents at one substation are shown at Fig. 6 as fields of points. Each point is defining the end of primary current vector at complex plot.

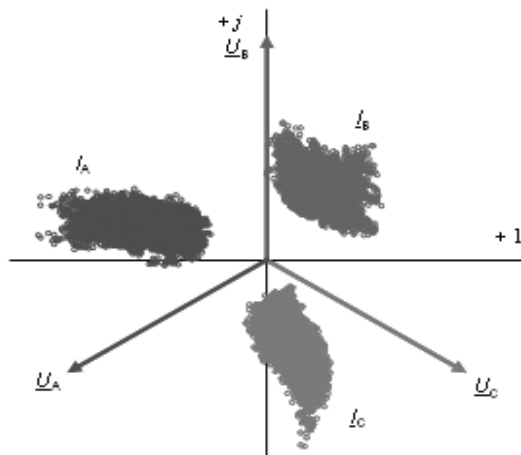


Fig. 6. Currents in 154 kV primary network at complex plot

It can be seen from Fig. 6 that currents in second phase (B) are lower than in other phase. In this case phase A and C are working. The phase B is the least loaded. Besides the phase A has the lowest power factor because the angle of load in this phase is the higher than in other phases.

Detail waveform researching

The voltage and current waveforms are very different from the sine (Fig. 7). Besides the current waveform are lags from the voltage waveform due to inductive component in traction load.

Before Fourier analysis check the discreteness of spectrum is needed. This check may be performed by comparing RMS values that defined by various methods.

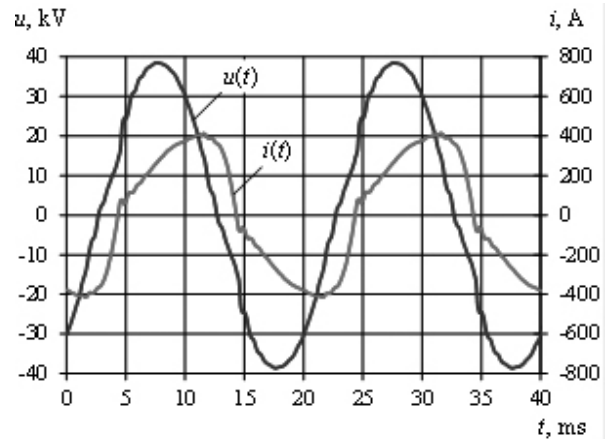


Fig. 7. Voltage and current waveforms in traction network

The RMS values may be evaluated by integration of waveform and discrete Fourier transform methods. So the conditions that used to check spectrum discreteness may be written as follows

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^N U^{(k)^2}}, \quad (1)$$

$$\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^N I^{(k)^2}}, \quad (2)$$

where $u(t)$, $i(t)$ – instantaneous voltage and current; $U^{(k)}$, $I^{(k)}$ – voltage and current RMS harmonic value; T – fundamental harmonic period, $T = 0.02$ sec; N – number of harmonics in a discrete transform, $N = 40$.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

As can be seen from table 1 the conditions (1)-(2) are satisfied with 0.001% error. This means that we can consider that voltage and current spectrums consist from discrete harmonics with frequencies that multiples of the fundamental frequency.

Table 1

Voltage and current RMS comparing

| Magnitude | Definition method | | Error, % |
|-----------|-------------------------|----------------------------|----------|
| | integration of waveform | discrete Fourier transform | |
| U, V | 27 317.687 | 27 317.767 | < 0.001 |
| I, A | 297.848 | 297.851 | 0.001 |

The relative spectrums of voltage and current at AC traction substation consist of odd harmonics (Fig. 8). The fundamental harmonics are shown not in scale. When spectrums of voltage and currents will be compared it can be seen that in current spectrum with frequency increasing the harmonics values are decreasing. But in voltage spectrum some harmonics are gained and some are weakened.

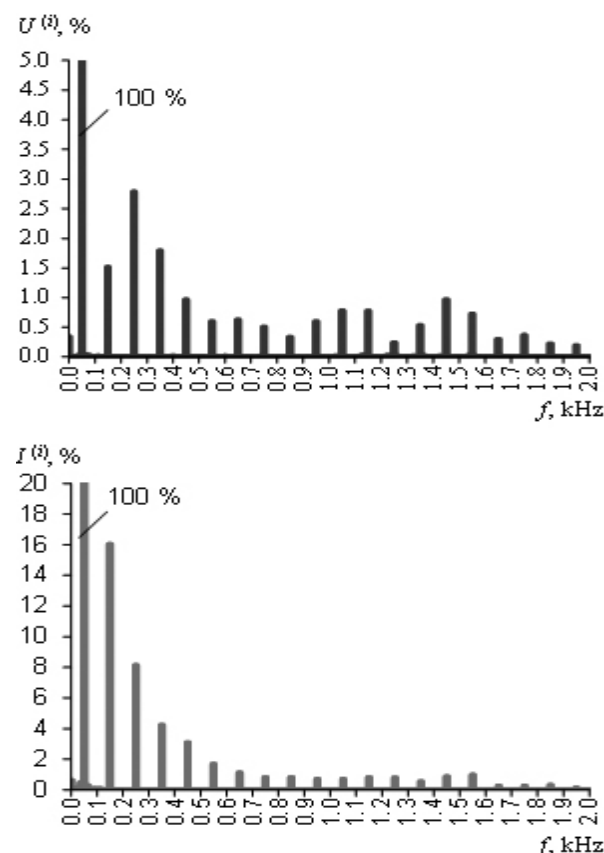


Fig. 8. Voltage and current relative spectrums

For example, in current spectrum the harmonic with a frequency of 150 Hz has a maximum. But in voltage spectrum the harmonic with maximum value has a frequency of 250 Hz. This indicates for non-linear resistance characteristics of traction network as a function of frequency.

Findings

Using these spectra, we can calculate the components of the balance of the total power in an AC circuit. Notable is the fact that the flows of active and reactive power of the higher harmonics are directed opposite power of the fundamental harmonic (Fig. 9).

This suggests that the AC electric rolling stock is a load at the fundamental frequency and a noise generator on the higher harmonics.

In percentage terms power flows on higher harmonics are less than 1 % and create more disturbing impact on related communication devices, automation and remote control than the effect of the losses increasing.

The results of power components evaluation showed as keeping the balance in the quadrature components of active power P , reactive power of the 1st harmonic Q_1 and distortion power D (Fig. 10).

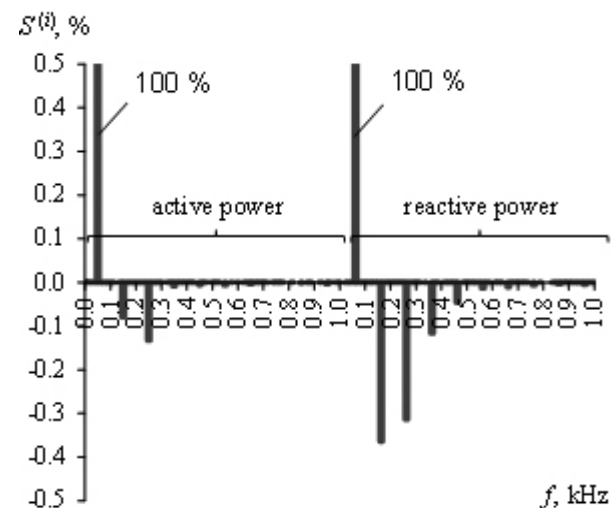


Fig. 9. Active and reactive power spectrums

In calculations the total power was determined by the product of the RMS values of current and voltage.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

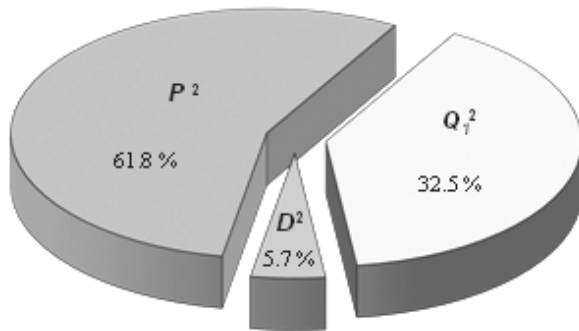


Fig. 10. Power balance in the quadrature components

The obtained result shows that the total power consists of 61.8% of the active power, 32.5% of the reactive power of the 1st harmonic and 5.7% of the distortion power in the quadrature components.

Originality and Practical value

The voltage and current spectrums at AC traction substation may be considered as spectrums that consist from discrete harmonics with frequencies that multiples of the fundamental frequency.

The AC electric rolling stock is a noise generator on the higher harmonics because the flows of active and reactive power of the higher harmonics are directed opposite power of the fundamental harmonic.

Analysis of the quadrature components suggests that traditional approaches to reactive power compensation at the fundamental frequency will be sufficiently effective. But the influence of the distortion power on reducing energy losses must be also researched. Besides reactive power compensation should be considered with the issue of reducing the basic power quality indices to standardized values.

Conclusions

1. The most significant power quality indices at AC traction substation are voltage deviation, voltage unbalance and harmonic distortion.

2. Voltages at the connection points of traction substations to supply lines are complex stationary random process that determines the voltage mode of the external power supply system of each traction substation.

3. Voltage waveform distortions according to standard requirements are below norm only for primary networks. On the other connection the dis-

turbances are outside the allowable range. The situation is similar for the voltage unbalance.

4. The flows of active and reactive power of the higher harmonics at AC traction substation are directed opposite power of the fundamental harmonic. The power flows on higher harmonics create the disturbing impact on related devices.

5. The total power at AC traction substation consists of 61.8% of the active power, 32.5% of the reactive power of the 1st harmonic and 5.7% of the distortion power in the quadrature components.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М. : УМК МПС РФ, 2002. – 638 с.
2. Босий, Д. О. Оптимізація керування регульованою компенсацією реактивної потужності на тягових підстанціях змінного струму / Д. О. Босий // Інформ.-керуючі системи на заліз. трансп. – 2010. – № 1. – С. 24–32.
3. Босий, Д. О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко // Техн. електродинаміка, тематичний вип. – 2009. – Ч. 3. – С. 86–89.
4. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. – Введ. 1999.01.01. – К. : Госстандарт Украины, 1999. – 35 с.
5. Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества / О. Г. Гриб, В. И. Васильченко, Г. А. Сендерович и др. ; под ред. О. Г. Гриба. – Х. : ХНУРЭ, 2010. – 444 с.
6. Кузнецов, В. Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В. Г. Кузнецов, Э. Г. Куренный, А. П. Лютый. – Донецк : Донбасс, 2005. – 249 с.
7. Марквардт, К. Г. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
8. Полях, О. М. Застосування матриць та графів до розрахунку систем електропостачання / О. М. Полях // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 133–137.
9. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Вісник

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 82–87.
10. Электромагнитная совместимость потребителей / И. В. Жежеленко, А. К. Шидловский, Г. Г. Пивняк и др. – М. : Машиностроение, 2012. – 351 с.
 11. A Comparative Study of Signal Processing and Pattern Recognition Approach for Power Quality Disturbance Classification / B. K. Panigrahi, S. K. Sinha, A. Mohapatra et al. // IETE Journal of Research. – 2011. – № 57. – P. 5–11.
 12. Arrillaga, J. Power System Harmonics / J. Arrillaga, N. R. Watson. – New York : John Wiley & Sons, 2004. – 399 p.
 13. Bollen, M. H. J. Signal Processing of Power Quality Disturbances / M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. – Piscataway : NJ, IEEE Press, 2006. – 861 p.
 14. Impedances of contact lines and propagation of current harmonics / A. Zynovchenko, Xie Jian, J. Steffen, K. Franz // Elektrische Bahnen. – 2006. – № 5. – P. 12–17.
 15. Sutherland, P. E. System impacts evaluation of a single-phase traction load on a 115 kV transmission system / P. E. Sutherland, M. Wacławski, M. F. McGranaghan // IEEE Transactions on power delivery. – 2006. – Vol. 21, № 2. – P. 837–843.

Д. О. БОСИЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 698 23 95, ел. пошта dake@i.ua

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета. На тягових підстанціях змінного струму застосовуються триобмоткові трансформатори. Така схема живлення призводить до значних спотворень показників якості електроенергії в кожного споживача, який живиться від тягової підстанції. Найбільш важливими показниками якості для тягових підстанцій змінного струму є відхилення, несиметрія та гармонійні спотворення напруги. Метою цієї роботи є комплексна оцінка показників якості електроенергії двох тягових підстанцій, які паралельно працюють на одну міжпідстанційну зону. **Методика.** Вимірювання показників якості виконані відповідно до програми протягом 24 годин з дискретизацією в часі 1 с. Застосовано декілька аналізаторів потужності РМ175 із синхронізацією в часі. Вимірювальні прилади підключались через відповідні трансформатори напруги і струму на кожному рівні напруги. **Результати.** Рівень напруги на різних підстанціях відрізняється через втрати потужності в первинній мережі. Крім того, напруга в одній фазі мережі більша, ніж у інших фазах. Гармонійні спотворення напруги можуть бути менші норми, встановленої стандартом, лише для первинної мережі 154 кВ. Для інших – тягової та районної мереж – вони перевищують встановлені норми. Несиметрія напруги в мережі 154 кВ нижча, ніж у районній мережі 35 кВ. Крім того, рівень несиметрії в первинній мережі відповідає вимогам стандарту. У той же час можна вважати, що спектри напруги і струму містять дискретні гармонійні складові, частоти яких кратні основній частоті мережі. **Наукова новизна.** Напруги в точках приєднання тягових підстанцій до живильної мережі являють собою складний стаціонарний випадковий процес, який визначає режим напруги системи зовнішнього електропостачання кожної тягової підстанції. Потоки активної та реактивної потужностей на вищих гармоніках спрямовані протилежно потокам потужностей на основній гармоніці. Потоки потужностей на вищих гармоніках створюють перешкоджаючий вплив на суміжні пристрої. Повна потужність тягової підстанції змінного струму складається на 61,8 % з активної, 32,5 % з реактивної 1-ї гармоніки і 5,7 % потужності спотворення у квадратурних складових. **Практична значимість.** Аналіз квадратурних складових вказує на те, що застосування традиційної компенсації реактивної потужності на основній частоті буде достатньо ефективним. Проте необхідно враховувати вплив потужності спотворень на зниження втрат електроенергії. Крім того, компенсацію реактивної потужності необхідно застосовувати як спосіб зниження основних показників якості електроенергії до нормованих значень.

Ключові слова: якість електроенергії; змінний струм; трифазна система; тягова підстанція; вимірювання; гармоніка; спотворення; несиметрія; потоки потужностей

Д. А. БОСЫЙ^{1*}

^{1*}Каф. «Електроснабження залізничних доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 698 23 95, ел. пошта dake@i.ua

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель. На тяговых подстанциях переменного тока применяются трехобмоточные трансформаторы. Такая схема питания приводит к значительным искажениям показателей качества электроэнергии у каждого потребителя, который питается от тяговой подстанции. Для тяговых подстанций переменного тока наиболее важными показателями качества электроэнергии являются отклонения, несимметрия и гармонические искажения напряжения. Цель данной работы состоит в комплексной оценке показателей качества электроэнергии для двух тяговых подстанций, которые параллельно работают на одну межподстанционную зону. **Методика.** Измерения показателей качества выполнены в соответствии с программой на протяжении 24 часов с дискретизацией во времени 1 с. Применено несколько анализаторов мощности РМ175 с синхронизацией времени. Измерительные приборы подключались через соответствующие трансформаторы напряжения и тока на каждом уровне напряжения. **Результаты.** Уровень напряжения на разных подстанциях отличается ввиду потерь мощности в первичной сети. Кроме того, напряжение в одной фазе больше, чем в остальных фазах. Гармонические искажения могут быть ниже нормы, установленной стандартом, только для первичной сети 154 кВ. Для других – тяговой и районной сетей – гармонические искажения превышают установленные нормы. Несимметрия напряжений в сети 154 кВ ниже, чем в районной сети 35 кВ. Кроме того, уровень несимметрии в первичной сети соответствует требованиям стандарта. В то же время можно считать, что спектры напряжения и тока содержат дискретные гармонические составляющие, частоты которых кратны основной частоте сети. **Научная новизна.** Напряжения в точках присоединения тяговых подстанций к питающей сети представляют собой сложный стационарный случайный процесс, который определяет режим напряжения системы внешнего электроснабжения каждой тяговой подстанции. Потоки активной и реактивной мощностей на высших гармониках направлены противоположно потокам мощностей на основной гармонике. Потоки мощностей на высших гармониках создают мешающее влияние на смежные устройства. Полная мощность тяговой подстанции переменного тока состоит на 61,8 % из активной, 32,5 % из реактивной 1-й гармоники и 5,7 % мощности искажений в квадратурных составляющих. **Практическая значимость.** Анализ квадратурных составляющих указывает на то, что применение традиционной компенсации реактивной мощности на основной частоте будет достаточно эффективным. Но также необходимо учесть влияние мощности искажений на общее снижение потерь электроэнергии. Кроме того, компенсацию реактивной мощности необходимо применять как способ снижения основных показателей качества электроэнергии до нормируемых значений.

Ключевые слова: качество электроэнергии; переменный ток; трехфазная система; тяговая подстанция; измерения; гармоника; искажения; несимметрия; потоки мощностей

REFERENCES

1. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovместimost* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, UMK MPS RF Publ., 2002. 638 p.
2. Bosiy D.O. Optymizatsiia keruvannia rehulovanoiu kompensatsiieiu reaktyvnoi potuzhnosti na tiahovykh pidstantsiakh zminnoho strumu [Optimizing the controlled compensation of reactive power at the AC traction substations]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information and control systems on railway transport*, 2010, no. 1, pp. 24-32.
3. Bosiy D.O., Sichenko V. G. Matematychni modeliuvannia elektrotiahovoho navantazhennia v zadachakh vyvchennia elektromahnitnykh protsesiv dlia system elektropostachannia elektrychnoho transportu zminnoho strumu [Mathematical modeling of electric traction load in tasks of electromagnetic processes studying for AC electric traction power systems]. *Tekhnichna elektrodinamika, tematychnyi vypusk – Technical electrodynamics, Special issue*, 2009, part 3, pp. 86-69.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

4. GOST 13109-97. *Elektricheskaya energiya. Trebovaniya k kachestvu elektricheskoy energii v setyakh obshchego naznacheniya* [Electrical energy. Power quality requirements for electrical energy in electric utility networks]. Kiev, Gosstandart Ukrainy Publ., 1999. 35 p.
5. Grib O.G., Vasilchenko V.I., Gromadskiy Yu.S., Dovgalyuk O.N., Manov I.A., Rozhkov P.P., Sapryka V.A., Senderovich G.A., Shcherbakova P.G. *Kontrol potrebleniya elektroenergii s uchetom yeye kachestva* [Electric energy consumption control taking into account its quality]. Kharkov, KhNURE Publ., 2010. 444 p.
6. Kuznetsov V.G., Kurennyy E.G., Lyutyy A.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost. Nesimmetriya i nesinusoidalnost napryazheniya* [Electromagnetic compatibility. Voltage unbalance and harmonic distortion]. Donetsk, Donbass Publ., 2005. 249 p.
7. Markvardt K.G. *Energosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Power supply of electric railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
8. Poliakh O.M. Zastosuvannia matryts ta hrafiv do rozrakhunku system elektropostachannia [Using the matrices and graphs for power systems evaluating]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 133-137.
9. Sychenko V.H., Bosyi D.O. Analiz rezhymiv napruhy na pryednanniakh tiahovykh pidstantsii zminnoho strumu [The mode of voltage analysis at AC traction substations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 82-87.
10. Zhezhelanko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Sayenko Yu. L., Noyberger N.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost potrebiteley* [Electromagnetic compatibility of power consumers]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2012. 351 p.
11. Panigrahi B.K., Sinha S.K., Mohapatra A., Dash P., Mallick M.K. A Comparative Study of Signal Processing and Pattern Recognition Approach for Power Quality Disturbance Classification. *IETE Journal of Research*, 2011, no. 57, pp. 5-11.
12. Arrillaga J., Watson N.R. *Power System Harmonics*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2004, 399 p.
13. Bollen M.H.J., Gu I.Y.H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Piscataway, NJ, IEEE Press Publ., 2006. 861 p.
14. Zynovchenko Andriy, Xie Jian, Jank Steffen, Klier Franz. Impedances of contact lines and propagation of current harmonics. *Elektische Bahnen*, 2006, no. 5, pp. 12-17.
15. Sutherland P.E., Wacławski M., McGranaghan M.F. System impacts evaluation of a single-phase traction load on a 115 kV transmission system. *IEEE Transactions on power delivery*, 2006, vol. 21, no. 2, pp. 837-843.

D. Sc. (Phys.&Math), Prof. V. I. Gavriluk (Ukraine); D. Sc. (Tech.), Prof. S. P. Denisyuk (Ukraine) recommended this article to be published.

Received Jun. 04, 2013

Accepted Aug. 06, 2013

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.424.027.4:620.19

Г. ВАЙЧУНАС¹, Г. ГЕЛУМБИЦКАС¹, Л. П. ЛИНГАЙТИС^{1*}

^{1*}Фак. «Железнодорожный транспорт», Вильнюсский технический университет Гедиминаса, ул. Ж. Басанавичюса, 28, LT-03224, Вильнюс, Литва, тел. +37 (052) 74 48 05, эл. почта lionginas.liudvinavicius@vgtu.lt

ПРОБЛЕМЫ ИЗНОСА КОЛЕС ТЕПЛОВОЗОВ ПРИ ОБНОВЛЕНИИ ПАРКА

Цель. Провести исследование и выяснить причины появления дефектов на поверхности катания колес грузовых тепловозов серии 2М62 и SIEMENS ER20CF. **Методика.** Путем сопоставления строений локомотивов и условий их эксплуатации найти методы решения этой проблемы. **Результаты.** В ходе изучения характера износа колес было установлено основное различие: на тепловозах 2М62 изнашивается гребень, а на тепловозах SIEMENS ER20CF – поверхность катания колес. После установки на 2М62 системы смазки гребней интенсивность их износа значительно уменьшилась. Новые грузовые тепловозы SIEMENS ER20CF уже оснащены такими системами, однако изнашивается поверхность катания. Как на локомотивах серии 2М62, так и на локомотивах серии SIEMENS ER20CF больше всего изнашивается профиль катания колес первой колесной пары. После достижения пробега в 170 тысяч километров поверхность катания колес некоторых колесных пар начинает крошиться. Возникло подозрение, что причиной такого крошения может быть недостаточная/избыточная твердость или неподходящий химический состав поверхности колеса. С целью подтвердить или опровергнуть это подозрение были выполнены: осмотровое исследование поверхности обода; исследование твердости металла колеса; анализ документов по изготовлению колес и сравнение их с полученными результатами измерения твердости колеса. **Практическая значимость.** Техническое состояние тепловозов является одной из основ надежности и безопасности движения подвижного состава, а уменьшение степени износа их колесных пар значительно сокращает эксплуатационные расходы железнодорожного транспорта. В результате исследований можно сделать такой вывод: нет оснований утверждать, что соотношение твердости колесо–рельс могло быть причиной выкрашивания поверхности колеса.

Ключевые слова: тепловоз; колесная пара; колесо; металл; твердость; износ

Введение

После распада Советского Союза на Литовских железных дорогах эксплуатировались грузовые тепловозы серии 2М62. При этом одной из наиболее типичных проблем был износ гребней колес из-за трения о рельсы при прохождении кривых. В связи с этим каждые 100–125 тысяч километров пробега нужно было исправлять профиль катания колеса путем его обточки. Отчасти эта проблема была решена за счет установки на тепловозах системы смазки гребней, что увеличило пробег колес между

обточками до 30 процентов (в зависимости от условий эксплуатации). По достижении тепловозами 2М62 30-летнего возраста их постепенно заменили на произведенные в Германии тепловозы SIEMENS серии ER20CF. На колесах некоторых из этих локомотивов после 170 тысяч километров пробега были обнаружены дефекты поверхности катания. Для установления причин их возникновения и были выполнены исследования.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Цель

Целью данной работы является выполнение исследований и выяснение причин появления дефектов на поверхности катания колес грузовых тепловозов серии 2М62 и SIEMENS ER20CF.

Методика

В ходе исследований сначала были сопоставлены строение и условия эксплуатации ранее использованных тепловозов 2М62 и новых локомотивов SIEMENS ER20CF (рис. 1).

На рис. 1 видно, что оба локомотива (изучалось по одной секции) являются шестиосными. Поэтому можно предположить, что нагрузка на колеса и их эксплуатация (учитывая ускорения, а также прохождение кривых) должны быть аналогичны. Дальнейшая цель исследования – сравнить особенности износа колес локомотивов 2М62 и SIEMENS ER20CF: характер износа, очередность износа (по очередности колесных пар на локомотиве), ресурс колеса. Изучив строение локомотивов, следует выяснить, являются ли дефекты колес типичными (рис. 2) или они уникальны.

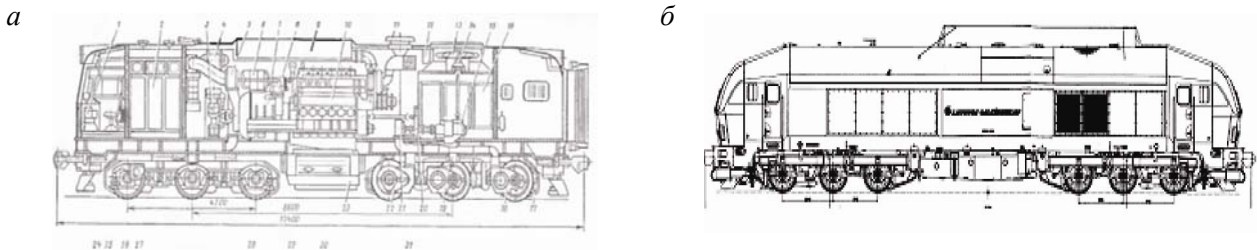


Рис. 1. Локомотивы серии 2М62 (а); SIEMENS ER20CF (б)

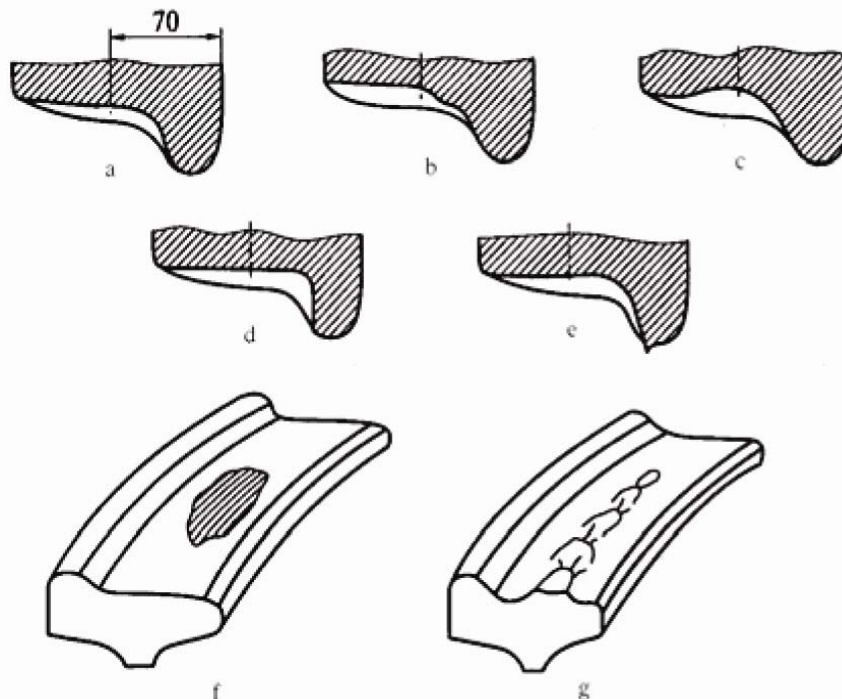


Рис. 2. Традиционные дефекты профиля колес:

а – равномерный износ; б, с – ступенчатый износ (из-за разницы диаметров колес); d – вертикальный износ гребня (из-за разницы диаметров колес, характерный в кривых участках); e – острый износ гребня (из-за трения о рельсы при прохождении кривых); f – ползун (из-за проскальзывания колеса); g – «навар» (из-за проскальзывания при торможении)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В результате исследований характера износа колес локомотивов установлено основное различие: на 2М62 изнашивается гребень (см. рис. 2, е), а на локомотиве SIEMENS ER20CF – поверхность катания колеса (такой износ не был найден среди типичных). После установки на локомотивах 2М62 системы смазки гребней интенсивность их износа заметно уменьшилась (рис. 3).

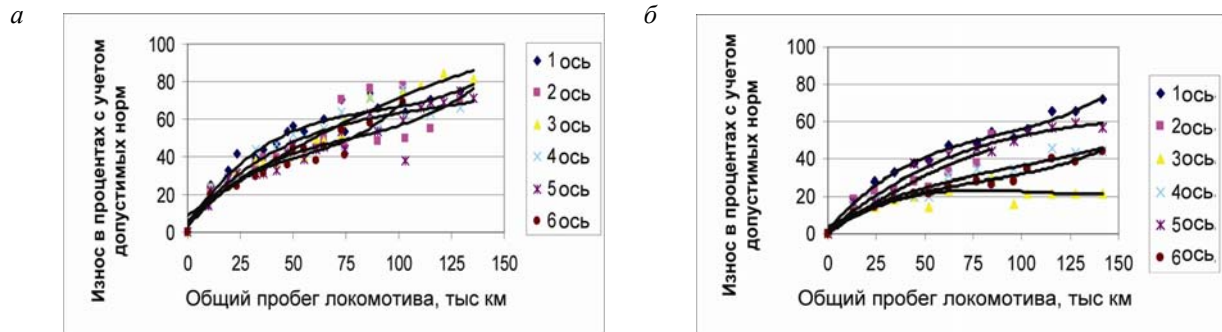


Рис. 3. Интенсивность износа колесных пар локомотива серии 2М62:
а – без смазки; б – со смазкой гребней колес

Сравнивая интенсивность износа колесных пар локомотивов 2М62 без смазки и со смазкой гребней их колес (см. рис. 3), видно, что при смазке не только уменьшается интенсивность износа, но и можно проследить зависимость износа от месторасположения колесной пары в локомотиве.

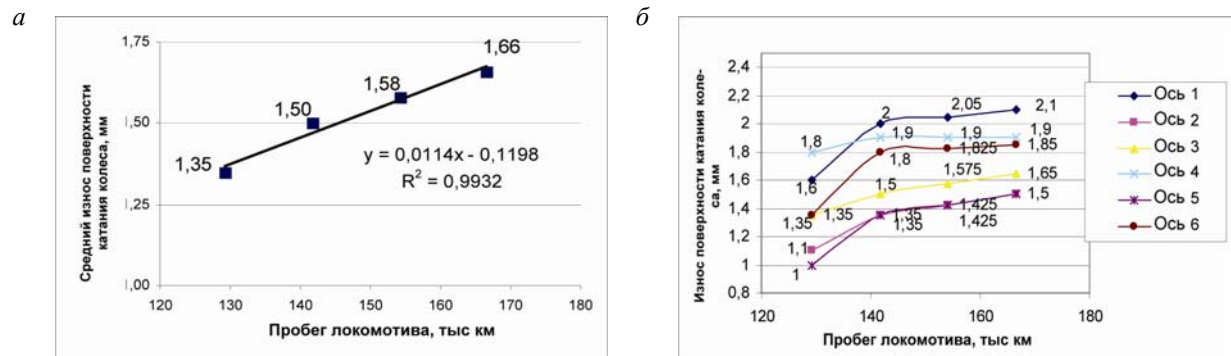


Рис. 4. Износ поверхности катания колеса локомотива SIEMENS серии ER20CF

Более всего изнашиваются гребни колес первой оси, а менее – третьей. Такая закономерность объясняется тем, что гребень колеса первой оси более всего нагружен эксцентрической силой при прохождении локомотивом кривых, а третьей – наименее. Заменив 2М62 на произведенные в Германии тепловозы SIEMENS серии ER20CF, проблема износа гребней колесных пар перестала быть столь

острой, поскольку на новых тепловозах имеются установленные на заводе системы смазки гребней колесных пар, помимо этого подвеска тепловоза собрана точнее и качественнее. Однако изнашивается поверхность катания. Интенсивность износа поверхности катания колеса локомотива SIEMENS ER20CF и его зависимость от месторасположения колесной пары в локомотиве показаны на рис. 4, а и б соот-

ветственно. Из него видно, что колесные пары локомотива SIEMENS ER20CF изнашиваются в таком порядке: 1, 4, 6, 3, 5, 2. Иначе говоря, как у 2М62, так и у SIEMENS ER20CF наиболее изнашивается профиль колес первой колесной пары. Однако после 170–200 тысяч километров пробега выяснилось, что не это является

самой большой проблемой колесных пар тепловоза SIEMENS ER20CF. По достижении указанного предела пробега тепловоза начинает крошиться поверхность катания некоторых его колесных пар (рис. 5).

На рис. 5 видно, что эксплуатировать колеса с такими дефектами невозможно. Обточив до 5 миллиметров металла, можно восстановить профиль поверхности колеса и эксплуатировать

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

его дальше. В связи с этим уменьшается диаметр катания колеса. Так как разница диаметра колес тепловоза регламентирована, то, обточив одно колесо после крошения, приходится обтачивать и другие (еще 11 колес). Таким образом, в сумме получают большие убытки ресурса колес, не говоря уже об убытках ресурса токарного станка, стачиваемого металла и рабочего времени работников.



Рис. 5. Дефекты поверхности колеса, возникающие после 170–200 тысяч километров пробега

Было предположено, что причинами крошения поверхности колеса могут являться неподходящая твердость колеса или его химический состав. С целью подтвердить или опровергнуть это предположение были выполнены: осмотровое исследование поверхности обода колеса; исследование твердости металла колеса; анализ документов по производству колес и сравнение их с полученными результатами измерения твердости колеса. Твердость (твердость Бринелля) поверхности катания колеса измерялась с использованием твердомера DinaMIC. Металлическая поверхность испытуемого колеса сточена до плоской поверхности. Твердость измерена в 8 зонах поверхности катания колеса (рис. 6).

Поверхность разделена на зоны для удобства измерения, результаты измерения представлены по расстоянию от внутреннего края колеса. Расстояние первой зоны от внутреннего края составляет 60 мм, второй – 70 и так каждые 10 мм. В каждой зоне с одинаковым интервалом выполнено по 5 измерений твердости. Для каждой зоны вычислено арифметическое

среднее. Обобщенные результаты измерений (изменение твердости поверхности колеса в зависимости от расстояния от внутреннего края) показаны на рис. 7.

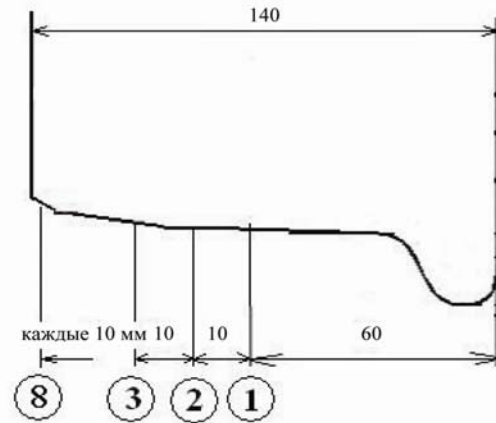


Рис. 6. Зоны измерения твердости поверхности катания колес

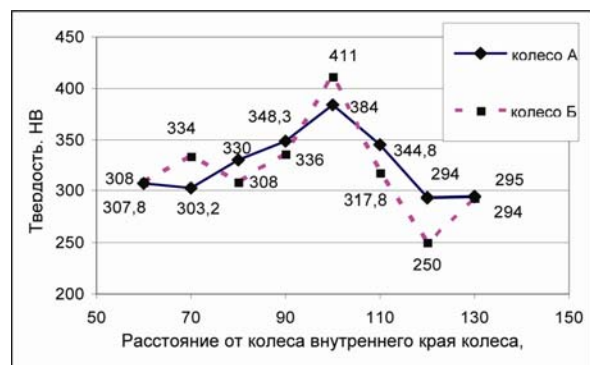


Рис. 7. Изменение твердости поверхности колеса в зависимости от расстояния от внутреннего края (согласно техническим паспортам тепловозов твердость поверхности их колес колеблется от 279 до 292 НВ, что удовлетворяет требованиям EN13262-2004)

В соответствии с ГОСТ 398-96 твердость, в зависимости от марки стали, должна быть 269–275 НВ. Анализируя рис. 5, замечаем, что наибольшая твердость изучаемого колеса (411 и 384 НВ) находится не в центре катания (расстояние от внутреннего края составляет 70 мм), а на 30 мм дальше. Зона повышенной твердости находится примерно на расстоянии 90...110 мм от внутреннего края колеса. Это соответствует зоне появления большинства трещин. Поэтому можно предположить, что трещины, вызвавшие выкрашивание, появились из-за повышения

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

твердості деформованого металу.

Твердість бокової поверхні колеса вимірюється в 8 зонах (рис. 8). Результати вимірювання показані на рис. 9 і 10.

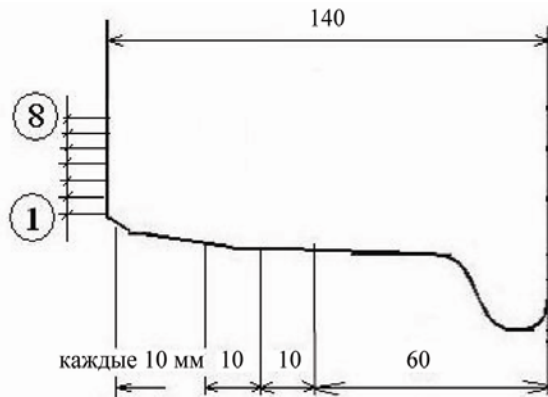


Рис. 8. Схема вимірювання твердості бокової поверхні колеса:
1,..., 8 – зони вимірювання твердості

При порівнянні двох діаграм твердості на бокової поверхні колес видно, що, незважаючи на те, що вони різняться, у них є загальна риса: по мірі віддалення від краю поверхні катання колеса твердість зменшується. Під поверхнею катання (на глибині від 5 до 25 мм) зменшення твердості становить в середньому 1,5 НВ/мм. Тем не менше, ніде твердість не буває нижче 255 НВ, значить, при виробництві колеса було дотримано вимогу по твердості стандарту EN13262-2004.

Після обточки поверхні катання колеса її твердість була виміряна знову. Твердість на поверхні катання колес (починаючи від центру – 70 мм і просуваючись до зовнішньої сторони колеса) розподілена майже рівномірно, однак у зоні, де до обточки було збільшення твердості металу і тріщини (20–32 мм від центру катання), після обточки також спостерігається збільшення твердості до 50 НВ (рис. 11).

В документах регламентується така твердість металу колеса:

Технічний паспорт 286 і 284 НВ
ГОСТ 398-96, не менше 269–275 НВ
EN 13262-2004, не менше 255 НВ
Твердість головки рейки до 401 НВ

По витязі з технічного паспорта видно, що твердість металу колес тепловозів SIEMENS ER20CF коливається від 280 до 292 НВ (она відповідає вимогам стандарту EN 13262-2004 – не менше ніж 255 НВ), а твердість металу 2 досліджуваних колес колесної пари – 286 і 284 НВ. По ГОСТ 398-96 твердість, в залежності від марки сталі, повинна бути не менше ніж 269 і 275 НВ. Стандарти ГОСТ 398-96 і EN 13262-2004 регламентують тільки нижній межу твердості металу колеса. Формально твердість колеса задовольняє вимогам обох стандартів. Тому робити припущення, що (з точки зору твердості металу) колесо може бути не сумісним з рейками, виготовленими по ГОСТам, немає підстав.



Рис. 9. Розподіл твердості на боковій поверхні колеса А

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ



Рис. 10. Распределение твердости на беговой поверхности колеса Б

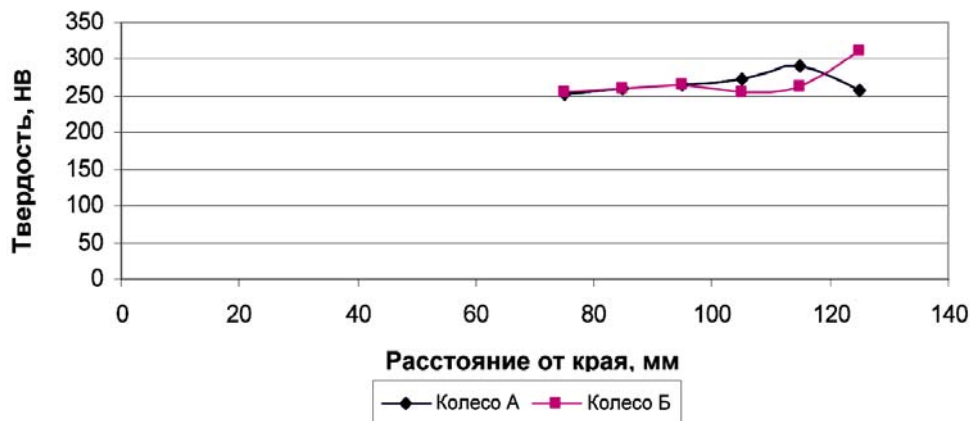


Рис. 11. Распределение твердости на поверхности катания колес

Результаты

Изучив характер износа колес, было установлено основное различие: на тепловозах 2М62 изнашивается гребень, а на тепловозах SIEMENS ER20CF – поверхность катания колес. После установки на 2М62 системы смазки гребней интенсивность их износа значительно уменьшилась. Новые грузовые тепловозы SIEMENS ER20CF уже оснащены такими системами смазки гребней колесных пар, однако изнашивается поверхность катания. Как на локомотивах серии 2М62, так и на локомотивах серии SIEMENS ER20CF больше всего изнашивается профиль катания колес первой колесной пары. После достижения пробега в 170 тысяч километров поверхность катания колес некоторых колесных пар начинает крошиться. Возникло подозрение, что причиной такого крошения может быть недостаточная/избыточная твердость или неподходящий

химический состав поверхности колеса. С целью подтвердить или опровергнуть это подозрение были выполнены: осмотровое исследование поверхности обода; исследование твердости металла колеса; анализ документов по изготовлению колес и сравнение их с полученными результатами измерения твердости колеса.

Практическая значимость

Техническое состояние тепловозов является одной из основ надежности и безопасности движения подвижного состава, а уменьшение степени износа их колесных пар значительно сокращает эксплуатационные расходы железнодорожного транспорта. Выполнив исследования, можно сделать такой вывод: нет оснований утверждать, что соотношение твердости колесо–рельс могло быть причиной выкрашивания поверхности колеса.

Выводы

1. В соответствии с техническими паспортами тепловозов SIEMENS ER20CF твердость металла их колес колеблется от 280 до 292 HB (она соответствует требованиям EN 13262-2004 – не менее чем 255 HB). По стандарту ГОСТ 398-96 твердость, в зависимости от марки стали, должна быть не менее чем 269–275 HB. Следовательно, твердость металла колес удовлетворяет требованиям ГОСТ 398-96.

2. Стандарты ГОСТ 398-96 и EN 13262-2004 регламентируют только нижний предел твердости металла колеса. Формально твердость колеса удовлетворяет требованиям обоих стандартов. Поэтому делать предположение, что (с точки зрения твердости металла) колесо может быть не совместимо с рельсами, изготовленными по стандартам, нет основания.

3. Самые большие значения твердости поверхности катания изучаемых колес до обточки были соответственно 411 и 384 HB, когда согласно техническим паспортам тепловозов твердость поверхности их колес колеблется от 280 до 300 HB.

4. Наибольшая твердость изучаемого колеса находится не в центре катания, а на 30 мм дальше. Зона повышенной твердости совпадает с зоной возникновения большинства трещин.

5. По мере углубления от поверхности катания колеса твердость уменьшается. На глубине от 5 до 25 мм уменьшение твердости составляет в среднем 1,5 HB/мм.

6. Твердость металла колеса нигде не бывает ниже 255 HB, значит, при производстве колеса было соблюдено требование по твердости стандарта EN13262-2004.

7. Механизм износа колеса является следующим. Во время долгосрочной эксплуатации колес происходит накопление пластической деформации. Как известно, при пластической деформации в металле возрастает плотность дислокаций. Новые дислокации возникают из-за внутренних источников, наиболее известный из них источник Франка-Рида. Рост плотности дислокаций способствует постоянному увеличению твердости металла, которое сопровождается увеличением его хрупкости. Вследствие этого на поверхности колес в зоне максимальной твердости образуются микротрещины. При дальнейшей эксплуатации эти микротрещины становятся

макротрещинами. Далее происходит крошение металла. Этот факт был подтвержден визуальным осмотром и цветной дефектоскопией.

8. В результате выполненных исследований нет основания утверждать, что соотношение твердости колесо–рельс могло стать причиной крошения поверхности колеса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасов, А. М. Анализ влияния условий сцепления на фактор износа гребней колесных пар локомотивов / А. М. Афанасов, А. И. Кийко, С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 71–74.
2. Вакуленко, Л. И. Оценка влияния содержания углерода в стали на формирование дефектов на поверхности катания железнодорожных колес / Л. И. Вакуленко, Ю. Л. Надеждин // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 226–229.
3. Грищенко, М. А. Причины виникнення дефектів на поверхні кочення залізничних коліс / М. А. Грищенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27. – С. 223–225.
4. Грищенко, М. А. Систематизація дефектів залізничних коліс / М. А. Грищенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2008. – Вип. 24. – С. 199–200.
5. Исследование причин образования дефектов на поверхности катания высокопрочных колес в процессе эксплуатации / А. И. Бабаченко, П. Л. Литвиненко, А. В. Книш и др. // Залізн. трансп. України : науково-практ. журн. – 2010. – № 5. – С. 35–38.
6. Рухлов, И. В. Влияние повышения твердости колеса на количество дефектов на его поверхности катания и интенсивность износа гребня / И. В. Рухлов // Техническая механика. – 2011. – № 1. – С. 12–17.
7. Determining Major Factors Causing the Wear of Wheelset Tyres / G. Vaičiūnas, V. Gediminas, L. P. Lingaitis, Š. Mikaliūnas // Solid State Phenomena. – 2006. – Vol. 113. – P. 425–428.
8. Dukkipati, R. V. Independently rotating wheel systems for railway vehicles / R. V. Dukkipati, S. Narayanaswamy, M. O. M. Osman // Vehicle System Dynamics. – 1992. – Vol. 21, № 5. – P. 297–327.
9. Fang, L. An explanation of the relation between wear and material hardness in three-body abrasion / L. Fang, Q. D. Zhou // Wear. – 1991. – Vol. 151. – P. 313–321.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

10. Lingaitis, L. P. Research on railway traction rolling stocks tyres wear / L. P. Lingaitis, Š. Mikaliūnas, G. Vaičiūnas // *Mechatronic Systems and Materials MSM : proc. of International Conference (20–23 October 2005)*. – Vilnius : Technika, 2005. – 123 p.
11. Lingaitis, L. P. The analysis of wear intensity of lubricated and unlubricated locomotive wheel sets flanges / L. P. Lingaitis, Š. Mikaliūnas, G. Vaičiūnas // *Transport*. – 2004. – Vol. XIX, №. 1. – P. 32–36.
12. Lingaitis, L. P. The analysis of wear intensity of the locomotive wheel - sets / L. P. Lingaitis, Š. Mikaliūnas, G. Vaičiūnas // *Eksplotacija i niezawodność*. – 2004. – № 3. – P. 23–28.
13. Povilaitienė, I. Influence of Geometrical Parameters of Railway Gauge upon Rail Durability on Curves : summary of Doctoral Dissertation / Inesa Povilaitienė. – Vilnius : Technika, 2004. – 32 p.

Г. ВАЙЧУНАС¹, Г. ГЕЛУМБИЦКАС¹, Л. П. ЛИНГАЙТИС^{1*}

^{1*}Фак. «Залізничний транспорт», Вільнюський технічний університет Гедимінаса, вул. Ж. Басанавічюса, 28, LT-03224, Вільнюс, Литва, тел. +37 (052) 74 48 05, ел. пошта lionginas.liudvinavicius@vgtu.lt

ПРОБЛЕМИ ЗНОСУ КОЛІС ТЕПЛОВОЗІВ ПРИ ОНОВЛЕННІ ПАРКУ

Мета. Виконати дослідження та з'ясувати причини появи дефектів на поверхні катання коліс вантажних тепловозів серії 2М62 і SIEMENS ER20CF. **Методика.** Шляхом зіставлення будов локомотивів та умов їх експлуатації знайти методи вирішення цієї проблеми. **Результати.** У ході вивчення характеру зносу коліс було встановлено основну різницю: на тепловозах 2М62 зношується гребінь, а на тепловозах SIEMENS ER20CF – поверхня катання коліс. Після установки на 2М62 системи змащення гребенів інтенсивність їхнього зносу значно зменшилася. Нові вантажні тепловози SIEMENS ER20CF вже оснащені такими системами, однак зношується поверхня катання. Як на локомотивах серії 2М62, так і на локомотивах серії SIEMENS ER20CF найбільше зношується профіль катання коліс першої колісної пари. Після досягнення пробігу 170 тисяч кілометрів поверхня катання коліс деяких колісних пар починає кришитися. Виникла підозра, що причиною цього може бути недостатня/надлишкова твердість або невідповідний хімічний склад колеса. З метою підтвердити або спростувати цю підозру були виконані: оглядове дослідження поверхні обода; дослідження твердості металу колеса; аналіз документів з виготовлення коліс і порівняння їх з отриманими результатами вимірювання твердості колеса. **Практична значимість.** Технічний стан тепловозів є однією з основ надійності та безпеки руху рухомого складу, а зменшення ступеня зносу їх колісних пар значно скорочує експлуатаційні витрати залізничного транспорту. Виконавши дослідження, встановлено, що немає підстав стверджувати, що співвідношення твердості колесо–рейка могло бути причиною викришування поверхні колеса.

Ключові слова: тепловоз; колісна пара; колесо; метал; твердість; знос

G. VAYCHUNAS¹, G. GELUMBITSKAS¹, L. P. LINGAYTIS^{1*}

^{1*}Fac. «Railway Transport», Vilnius Gediminas Technical University, J. Basanavichyus Str., 28, LT-03224, Vilnius, Lithuania, tel. + 37 (052) 74 48 05, e-mail lionginas.liudvinavicius@vgtu.lt

PROBLEMS OF LOCOMOTIVE WHEEL WEAR IN FLEET REPLACEMENT

Purpose. To conduct a research and find out the causes of defects appearing on the wheel thread of freight locomotives 2M62 and SIEMENS ER20CF. **Methodology.** To find the ways to solve this problem comparing the locomotive designs and their operating conditions. **Findings.** After examining the nature of the wheel wear the main difference was found: in locomotives of the 2M62 line wears the wheel flange, and in the locomotives SIEMENS ER20CF – the tread surface. After installation on the 2M62 locomotive the lubrication system of flanges their wear rate significantly decreased. On the new freight locomotives SIEMENS ER20CF the flange lubrication systems of the wheel set have been already installed at the factory, however the wheel thread is wearing. As for locomotives 2M62, and on locomotives SIEMENS ER20CF most wear profile skating wheels of the first wheel set. On both locomotive lines the 2M62 and the SIEMENS ER20CF the tread profile of the first wheel set most of all is subject to the wear. After reaching the 170 000 km run, the tread surface of some wheels begins to crumble. There was a sus-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

picion that the reason for crumb formation of the wheel surface may be insufficient or excessive wheel hardness or its chemical composition. In order to confirm or deny this suspicion the following studies were conducted: the examination of the rim surface, the study of the wheel metal hardness and the document analysis of the wheel production and their comparison with the results of wheel hardness measurement. **Practical value.** The technical condition of locomotives is one of the bases of safety and reliability of the rolling stock. The reduction of the wheel wear significantly reduces the operating costs of railway transport. After study completion it was found that there was no evidence to suggest that the ratio of the wheel-rail hardness could be the cause of the wheel surface crumbling.

Keywords: locomotive; wheel set; wheel; metal; hardness; wear

REFERENCES

1. Afanasov A.M., Kiyko A.I., Arpul S.V. Analiz vliyaniya usloviy stsepleniya na faktor iznosa grebney kole-snykh par lokomotivov [Impact analysis of the cohesion conditions on the wear factor of s locomotive wheel flanges]. *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 41, pp. 71-74.
2. Vakulenko L.I., Nadezhdin Yu.L. Otsenka vliyaniya soderzhaniya ugleroda v stali na formirovaniye defektov na poverkhnosti kataniya zheleznodorozhnykh koles [Influence evaluation of the carbon content in the steel on the formation of the wheel thread defects]. *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 41, pp. 226-229.
3. Hryshchenko M.A. Prychyny vynyknennia defektiv na poverkhni kochennia zaliznychnykh kolis [Causes of defect arising on the wheel thread]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 223-225.
4. Hryshchenko M.A. Systematyzatsiia defektiv zaliznychnykh kolis [Systematization of the wheel defects]. *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 24, pp. 199-200.
5. Babachenko A.I., Litvinenko P.L., Knish A.V., Dementeva Zh.A., Khulin A.M., Shpak O.A. Issledovaniye prichin obrazovaniya defektov na poverkhnosti kataniya vysokoprochnykh koles v protsesse ekspluatatsii [Research of causes of defects arising on the tread surface of high-impact wheels during operation]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2010, no. 5, pp. 35-38.
6. Rukhlov I.V. Vliyaniye povysheniya tverdsti kolesa na kolichestvo defektov na yego poverkhnosti kataniya i intensivnost iznosa grebnya [Impact of hardening of the wheel on the defects number on its tread and the flange wear rate]. *Tekhnicheskaya mekhanika – Technical Mechanics*, 2011, no. 1, pp. 12-17.
7. Vaičiūnas G., Gediminas V., Lingaitis L.P., Mikaliūnas Š. Determining Major Factors Causing the Wear of Wheelset Tyres. *Solid State Phenomena*, 2006, vol. 113, pp. 425-428.
8. Dukkupati R.V., Narayanaswamy S., Osman M.O.M. Independently rotating wheel systems for railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 1992, vol. 21, no. 5, pp. 297-327.
9. Fang L., Zhou Q.D. An explanation of the relation between wear and material hardness in three-body abrasion. *Wear*, 1991, vol. 151, pp. 313-321.
10. Lingaitis L.P., Mikaliūnas Š., Vaičiūnas G. Research on railway traction rolling stocks tyres wear. Proc. of Int. Conf. "Mechatronic Systems and Materials MSM". Vilnius, 2005, pp. 123.
11. Lingaitis L.P., Mikaliūnas Š., Vaičiūnas G. The analysis of wear intensity of lubricated and unlubricated locomotive wheel sets flanges. *Transport*, 2004, vol. XIX, no. 1, pp. 32-36.
12. Lingaitis L.P., Mikaliūnas Š., Vaičiūnas G. The analysis of wear intensity of the locomotive wheel – sets. *Eksploatacja i niezawodność*, 2004, no. 3, pp. 23-28.
13. Povilaitienė, I. Influence of Geometrical Parameters of Railway Gauge upon Rail Durability on Curves: summary of Doctoral Dissertation. Vilnius, Technika Publ., 2004. 32 p.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Л. Горбцом (Украина); д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина)

Поступила в редколлегию 08.04.2013.

Принята к печати 18.07.2013.

УДК 656.212

Д. Н. КОЗАЧЕНКО^{1*}

^{1*} Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 371 51 09, эл. почта kozachenko@upr.dnii.edu.ua

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ**

Цель. Целью статьи является совершенствование функциональной модели железнодорожных станций, направленное на сокращение затрат времени на формализацию технологических процессов их работы за счет использования типовых элементов технологии. **Методика.** В качестве основных элементов функционирования железнодорожной станции рассматриваются технологические операции, исполнители и объекты технологии. В ходе исследования использовались методы теории массового обслуживания, имитационного моделирования, конечных автоматов и объектно-ориентированного анализа. **Результаты.** В результате исследования разработаны формальные структуры данных, которые позволяют моделировать функционирование железнодорожной станции с любой степенью детализации. В соответствии с принципами объектно-ориентированного подхода в разработанной модели отдельные элементы станционной технологии представляются совместно с описанием их поведения. Предложенная модель реализована в виде программного комплекса. **Научная новизна.** За счет применения объектно-ориентированного подхода при организации данных усовершенствована модель функционирования железнодорожных станций, что позволяет создавать библиотеки элементарных технологических процессов и сократить затраты времени на формализацию технологии работы станций. **Практическая значимость.** Использование программного комплекса, разработанного на базе предложенной модели, позволяет сократить затраты времени технологов на получение технико-эксплуатационной оценки проектируемых и существующих железнодорожных станций.

Ключевые слова: железнодорожная станция; технологический процесс; план-график работы; математическая модель; объектно-ориентированный подход

Введение

Эффективным средством анализа и оценки показателей функционирования железнодорожных станций, их технико-технологических и экономических параметров является имитационное моделирование станционных процессов. Использование имитационных моделей при выполнении проектных работ, а также при оперативном управлении на станциях позволяет принимать наиболее рациональные решения, направленные на сокращение собственных расходов станций и увеличение прибыли от перевозок.

Исследования по проблемам создания имитационных моделей железнодорожных станций для анализа и оптимизации их работы были начаты в 60-х годах прошлого века с появлением серийных ЭВМ [6, 12]. В указанных работах для изучения загрузки технических устройств станций предлагалось использовать статистическое моделирование технологических процессов. При этом для учета неравномерности

моделируется случайный входящий поток поездов, а продолжительность обслуживания поезда на станции моделируется как случайная величина с заданным законом распределения. По результатам моделирования определяются «узкие» места на станции, задержки и простои поездов.

Появление ЭВМ более высокой производительности создало возможности для разработки имитационных моделей, позволяющих детально моделировать сложные технологические процессы, происходящие на сортировочных станциях и в железнодорожных узлах [7, 11]. Недостатком таких моделей являлось то, что они представляли программное описание функционирования конкретной станции и для их создания необходимы были как технологи, так и программисты.

Преодоление данной проблемы достигается путем отделения формального представления технологии работы станции от универсального моделирующего модуля. Такой подход позво-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ляет использовать различные специализированные редакторы для автоматизированного построения технологических процессов работы станций. Для формализации технологических процессов применяются сети Петри [13–15], сетевые графики [1], конечные автоматы [2, 3, 8, 9] и др.

Опыт практического использования модели, предложенной в [3], показал ее высокую эффективность при моделировании функционирования технических станций. Преимуществами данной модели является возможность проведения имитационных экспериментов как в автоматическом, так и в автоматизированном режиме с участием человека. Это позволило построить на ее основе широкий круг приложений [5, 8].

В то же время были выявлены и недостатки модели [3], связанные со значительными затратами времени на описание технологии работы станций, особенно грузовых и промышленных. В отличие от условий работы технических станций, где обрабатывается большое количество однотипных объектов, для грузовых и промышленных станций характерна обработка небольшого количества объектов, но со сложной и уникальной технологией. Решением данной проблемы может быть разработка методов, позволяющих формализовывать технологию работы станции с использованием библиотеки типовых элементов.

Цель

Целью статьи является совершенствование функциональной модели железнодорожной станции, направленное на сокращение трудозатрат на формализацию технологических процессов их работы за счет использования типовых элементов технологии.

Методика

Решение поставленной задачи совершенствования модели функционирования железнодорожной станции выполнялось с применением методов имитационного моделирования, конечных автоматов и объектно-ориентированного анализа.

В качестве базовой в исследовании использовалась модель, представленная в [3]. В данной модели станция или ее отдельный техно-

логический комплекс рассматривается как управляемая многофазная многоканальная система массового обслуживания. При этом входящий поток образуют объекты, требующие обслуживания на станции (поезда, составы, локомотивы). Фазами обслуживания являются отдельные технологические операции (закрепление состава, технический осмотр и др.), которые выполняются в определенной последовательности в соответствии с технологическим процессом. Продолжительности операций технологического процесса могут принимать постоянные значения или моделируются как случайные величины, параметры которых зависят от характеристик объекта. Как обслуживающие устройства рассматриваются исполнители технологических операций (маневровые локомотивы, сортировочные горки, бригады ПТО и др.).

Основными элементами технологического процесса на станции являются технологические операции **Q**, исполнители **E** и объекты технологии **O**.

Для возможности создания библиотеки типовых элементов станционной технологии необходимо разработать структуры данных для формального представления функционирования отдельных объектов станций независимо от работы других элементов станций.

Функционирование станции связано с выполнением технологических операций с грузами, вагонами, локомотивами, поездами и др., предусмотренных ее технологическим процессом. В разработанной модели каждая технологическая операция представляется структурой

$$q_i = \{I_w, U_q, F_q, t_q, s_q\}, i = 1, 2, \dots, n_{qj},$$

где I_w – идентификатор шаблона технологической операции; U_q – список исполнителей, занятых выполнением операции; F_q – список условий окончания технологической операции; t_q – момент окончания выполнения технологической операции; s_q – состояние выполнения технологической операции; n_{qj} – общее количество операций, выполняемых с j -м объектом.

Параметр s_q представляет собой переменную, которая характеризует текущее состояние операции q_i для объекта O_j . При этом

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$s_q = 0$, если операция q_i может быть начата с объектом O_j и ожидает освобождения исполнителей необходимой специализации; $s_q = 1$, если операция q_i выполняется; $s_q = 2$, если выполнено условие продолжительности операции и она находится в состоянии выполнения условий ее завершения.

Шаблоны технологических операций w_k содержат информацию, которая необходима для параметризации отдельных операций q

$$w_k = \{I_w, f_t, \mathbf{f}_w, s_w, z_w, \mathbf{p}_w\}, j = 1, 2, \dots, n_w,$$

где f_t – функция, которая определяет продолжительность выполнения технологической операции; \mathbf{f}_w – функции, выполняемые в момент разрешения начала выполнения операции, после ее начала, перед завершением и после завершения; s_w – сигнал, посылаемый в конечный автомат, описывающий технологический процесс обработки объекта при завершении операции; z_w – тип значка, соответствующего технологической операции; \mathbf{p}_w – список исполнителей, необходимых для выполнения технологической операции; n_w – общее количество шаблонов технологических операций.

Порядок выполнения технологической операции отдельным исполнителем p_w из списка \mathbf{p}_w описывается как

$$p_w = \{\gamma, f_p, z_p, z_d, z_n\},$$

где γ – специализация исполнителя; f_p – параметр, указывающий на порядок освобождения исполнителя после окончания технологической операции; z_p, z_d, z_n – параметры, указывающие на необходимость графического вывода значка работы на плане-графике станции [10] при использовании исполнителя, а также значков ожидания технологической операции перед и после ее выполнения соответственно.

Выполнение технологических операций на станции обеспечивают исполнители. Принято, что каждую технологическую операцию должны выполнять исполнители строго определенной специализации (например, закрепление состава выполняет сигналист, осмотр вагонов –

бригада ПТО, роспуск состава – маневровый локомотив и сортировочная горка и т. д.). В то же время исполнитель определенной специализации может выполнять несколько различных операций (например, сигналист выполняет закрепление состава и уборку тормозных башмаков). Для упрощения модели станции пути и стрелочные зоны также могут рассматриваться как исполнители.

Каждый исполнитель, который работает на станции, в модели технологического процесса может представляться структурой

$$E_r = \{I_e, \gamma, g_e\}, r = 1, 2, \dots, n_e,$$

где I_e – идентификатор исполнителя; g_e – показатель активности исполнителя; n_e – общее число исполнителей на станции.

Исполнители имеют специализацию γ , определяющую работы, которые они могут выполнять. Если на станции есть несколько исполнителей одной специализации, то для выполнения работы может использоваться любой из свободных исполнителей данной специализации.

Использование исполнителей для выполнения работ на станции моделируется с помощью динамически изменяемых списков \mathbf{U} . Исполнитель E_r считается занятым, если в текущий момент времени он выполняет некоторую технологическую операцию (находится в списке \mathbf{U}_q какой-либо операции) или находится в списке ожидания выполнения следующих операций с тем же объектом (список \mathbf{U}_o какого-либо объекта). Для учета свободных исполнителей в модели технологического процесса ведется динамический список \mathbf{U}_r . Например, после выполнения операции закрепления состава тормозными башмаками выполняющий ее сигналист освобождается и может выполнять другую операцию с любым объектом. Напротив, после выполнения операции прицепки маневрового локомотива к составу для расформирования этот локомотив не освобождается, а ожидает уборки башмаков и выполняет с данным составом надвиг и роспуск.

Порядок освобождения исполнителей определяется параметром f_p шаблона работы:

– если $f_p = -1$, то после окончания выпол-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

нения технологической операции исполнителя необходимо переместить в список свободных исполнителей станции U_r ;

– если $f_p = 0$, то после окончания выполнения технологической операции исполнителя необходимо переместить в список исполнителей, ожидающих выполнения операций U_o того же объекта, который им обслуживался;

– если $f_p > 0$, то после окончания выполнения технологической операции исполнителя необходимо переместить в список исполнителей, ожидающих выполнения операций U_o объекта, идентификатор которого равен f_p .

В начале моделирования все исполнители считаются свободными.

В процессе занятия и освобождения исполнителя в соответствии с параметрами z_p, z_d, z_n , а также типом значка z_w выполняемой им технологической операции подаются команды в информационную модель [10] для формирования плана-графика.

В качестве объектов в модели [3] рассматриваются локомотивы и составы. При этом в процессе моделирования предполагается, что объект по мере обслуживания должен перейти из исходного состояния s_o в конечное состояние s_k , после чего он исключается из системы обслуживания. На грузовых и промышленных станциях, в отличие от технических, работа производится с отдельными вагонами; при этом могут реализовываться различные варианты их обслуживания. В результате возникает необходимость создания большого количества объектов, соответствующих отдельным вагонам, со сложной технологией. Кроме того, на промышленных станциях обращаются вагоны внутреннего парка, которые после выполнения определенного цикла операций не исключаются из системы обслуживания, а используются для выполнения того же или другого цикла операций. Для преодоления указанных проблем предлагается рассматривать функционирование станции не как обслуживание отдельных объектов от момента их поступления до момента убытия со станции, а как процесс согласованного взаимодействия элементарных технологических объектов. В качестве таких объектов

могут рассматриваться как объекты, поступающие на станцию для обслуживания (поезда, поездные локомотивы, вагоны, грузы и т.п.), так и отдельные технические средства станции (маневровые локомотивы, сортировочные пути, фронты грузовой работы и т.п.).

В соответствии с объектно-ориентированной парадигмой каждый отдельный объект характеризуется свойствами и поведением [4]. В модели станции под поведением объекта рассматриваются технологические операции, которые с ним выполняются, а также определенный технологическим процессом порядок выполнения этих операций. Формализация объектов совместно с их поведением позволяет создавать библиотеки элементарных технологических процессов и за счет их использования сократить затраты времени на формализацию технологии работы станций.

Свойства объектов и их поведение описываются в шаблонах d . Шаблоны объектов представляются структурами

$$d_y = \{I_d, P_c, W_d, E_d, A\}, y = 1, 2, \dots, n_d,$$

где I_d – идентификатор шаблона объекта; P_c – множество свойств объекта со значениями, устанавливаемыми по умолчанию; W_d – шаблоны технологических операций, выполняемых с объектом; E_d – список исполнителей, необходимых для обслуживания объекта; A – конечный автомат, описывающий порядок выполнения технологических операций с объектом.

При этом параметры P_c представляют свойства объекта, а W_d и A – его поведение.

Технологический процесс (ТП) объекта представляется в виде детерминированного конечного автомата (КА)

$$A = \{X, Z, S, F_z, F_s\},$$

где X, Z – соответственно входной и выходной алфавиты; S – множество состояний автомата; F_z, F_s – функции выходов и переходов.

Каждое состояние автомата соответствует определенному состоянию ТП обслуживания объекта. Множество состояний автомата определяется числом различных фаз обслуживания объекта, которые различаются комбинациями

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

технологических операций, имеющих разную степень завершенности.

Входной алфавит X автомата включает три подмножества входных сигналов $X = \{X_1, X_2, X_3\}$; здесь X_1 – окончание технологических операций; X_2 – эксплуатационное событие; X_3 – команды, поступающие от лица, выполняющего моделирование (ЛВМ).

Функции выходов F_z и переходов F_s автомата A выполняют превращение входной последовательности сигналов $x_j = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ в соответствующую исходящую последовательность $z_j = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$. Для формализации разных вариантов технологии обслуживания некоторого объекта используются разные входные последовательности x_j . Выбор последовательности x_j осуществляется ЛВМ. Порядок обработки сигналов при их поступлении в КА зависит от того, к какому из подмножеств они относятся. По завершению некоторой последовательности операций объекты исключаются из модели станции либо остаются в состоянии ожидания выполнения следующей последовательности операций.

Учитывая, что таблицы выходов и переходов соответствующих КА являются сильно разреженными, то для представления автоматов выбран ориентированный граф.

При добавлении шаблона объектов к модели станции из библиотеки устанавливается соответствие между исполнителями объекта E_d и исполнителями станции E .

В процессе моделирования на основании шаблонов классов объектов d_j при инициализации модели станции по командам, поступающим от генератора входного потока или от других объектов, производится создание экземпляров объектов O_j . При этом объекты представляются с помощью структур:

$$O_j = \{I_o, d_{ш}, P, s, U_o, Q_o\}, j = 1, 2, \dots, n_o,$$

где I_o – идентификатор объекта; P – множество свойств объекта; s – текущее состояние объекта, которое определяет фазу технологического процесса его обслуживания; U_o – список исполнителей, которые ожидают начала выполнения операций с объектом; Q_o – список

технологических операций, выполняемых с объектом в текущий момент времени; n_o – общее число объектов, находящихся в системе обслуживания.

Свойства объектов в памяти ЭВМ хранятся в виде ассоциативного списка, каждый элемент которого описывается структурой, содержащей ключ и данные. Ключ представляет собой целое число. Значение ключа соответствует типу данных:

1001–1999 – целые числа;

2001–2999 – вещественные числа;

3001–3999 – текстовые значения.

При этом значения ключей 1001–1500, 2001–2500, 3001–3500 используются для обязательных свойств, а ключей 1501–1999, 2501–2999, 3501–3999 для свойств, определяемых пользователем.

Технологический процесс отдельного объекта моделируется последовательностью переходов КА из одного состояния в другое по мере выполнения предусмотренных операций.

Результаты

Предложенная модель реализована в виде программного комплекса для функционального моделирования железнодорожных станций. Программный комплекс содержит две основные программы – редактор технологического процесса работы станций и суточный план-график работы станций.

Редактор технологического процесса работы станций, главное окно которого представлено на рис. 1, позволяет в графическом виде создавать графы переходов конечного автомата, а также заполнять данные об объектах, их свойствах, работах и др. в виде специальных форм.

Программа «Суточный план-график работы станции» предназначена для имитационного моделирования работы железнодорожных станций с целью определить технико-эксплуатационные показатели их работы. Использование этой программы позволяет находить узкие места в работе станций и разрабатывать мероприятия по их ликвидации.

Главное окно программы содержит изображение технологического процесса работы станции на часовой сетке в виде суточного плана-графика и элементы управления. Общий вид главного окна изображен на рис. 2.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

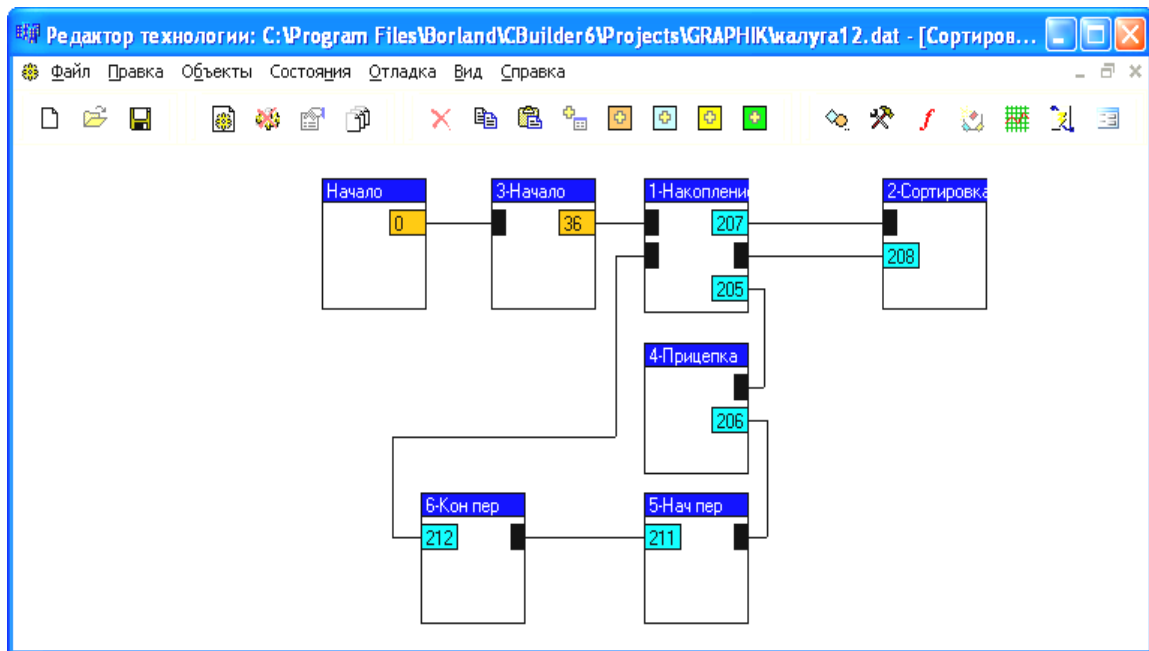


Рис. 1. Главное окно редактора технологического процесса работы станций

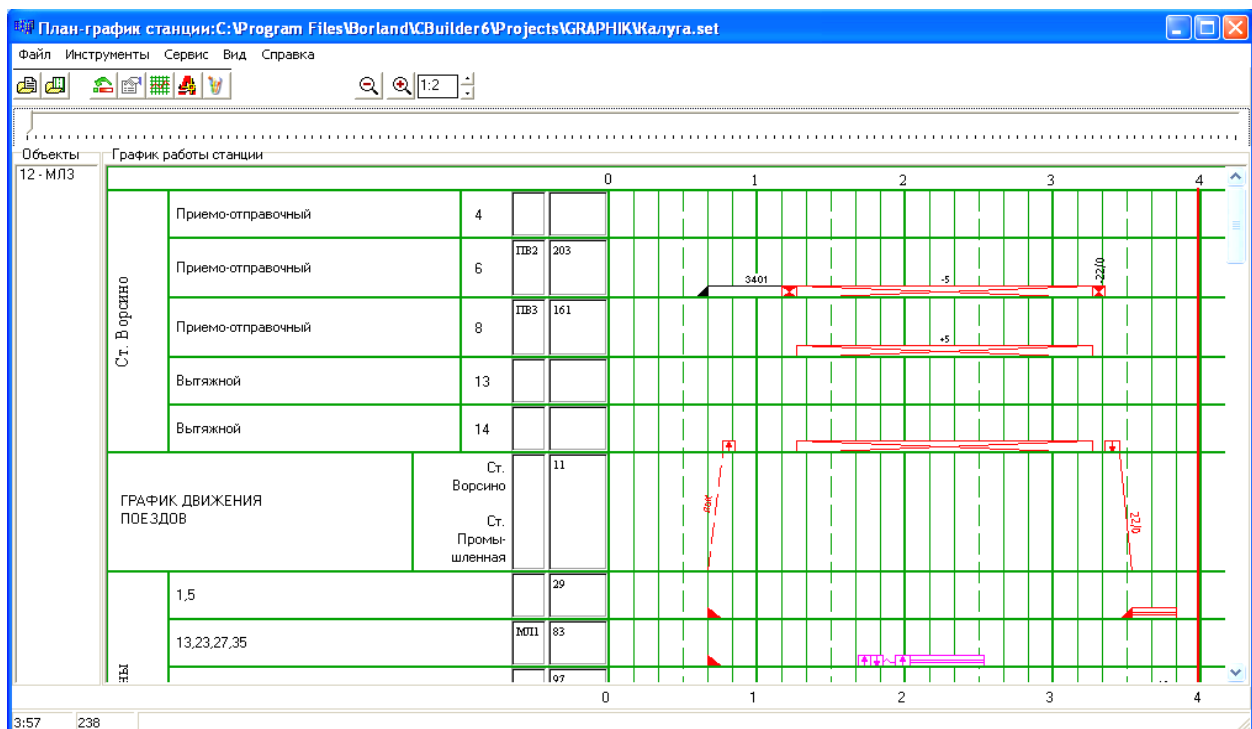


Рис. 2. Главное окно программы «Суточный план-график работы станции»

Результатами функционального моделирования работы железнодорожной станции с помощью программы «Суточный план-график» является план-график работы станции, который может быть экспортирован в формате графиче-

ских файлов *dxg*, *wmf* и *eps*, а также показатели работы станции, такие как загрузка отдельных исполнителей и продолжительности нахождения объектов в отдельных фазах обслуживания.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Научная новизна и практическая значимость

В результате выполненных исследований с применением объектно-ориентированного подхода при организации данных усовершенствована модель функционирования железнодорожных станций, что позволяет создавать библиотеки элементарных технологических процессов и за счет этого сократить затраты времени на формализацию технологии работы станций.

Разработанная модель реализована в виде программного комплекса, использование которого позволяет сократить затраты времени технологов при решении задач получения технико-эксплуатационной оценки проектируемых и существующих железнодорожных станций.

Выводы

1. В соответствии с принципами объектно-ориентированного подхода предложена структура модели, обеспечивающая формализацию объектов совместно с их поведением. Такой подход позволяет описывать функционирование отдельных объектов независимо от работы других элементов станций и создавать на их основании библиотеки типовых элементов технологических процессов.

2. Использование библиотеки типовых элементов технологических процессов при формализации технологии работы станций позволяет ускорить разработку их моделей и повысить эффективность работы проектировщиков и технологов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бобровский, В. И. Функциональное моделирование железнодорожных станций в тренажерах оперативно-диспетчерского персонала / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора // Математичне моделювання. – 2000. – № 2 (5). – С. 68–71.
- Бобровский, В. И. Эргатические модели железнодорожных станций / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // 36. наук. пр. КУЕТТ. Сер. «Трансп. системи і технології». – К., 2004. – Вип. 5. – С. 80–86.
- Бобровский, В. И. Техничко-економічне управління залізничними станціями на основі ергатических моделей / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2004. – № 6. – С. 17–21.
- Буч, Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений (UML 2) / Г. Буч, Р. А. Максимчук, М. У. Энгл. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2010. – 720 с.
- Вернигора, Р. В. Підготовка ДСП станцій ділянки з використанням тренажерного комплексу / Р. В. Вернигора, В. В. Малашкін // Трансп. системи та технології перевезень. – Д., 2010. – Вип. 1. – С. 34–37.
- Ветухов, Е. А. Определение уровня загрузки станций методом моделирования их работы на ЭЦВМ / Е. А. Ветухов, Е. А. Сотников // Ж.-д. трансп. – 1969. – № 7. – С. 34–37.
- Ивницкий, В. А. Оперативный анализ работы и нормирование простоев на станциях с использованием имитационного моделирования / В. А. Ивницкий, А. Г. Миркин // Вестн. ВНИИЖТа. – 1990. – № 7. – С. 7–10.
- Козаченко, Д. М. Программний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіку / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, Р. Г. Коробйова // Залізн. трансп. України. – 2008. – № 4 (70). – С. 18–20.
- Коробйова, Р. Г. Адекватність математичних моделей для визначення техніко-експлуатаційних показників роботи станцій / Р. Г. Коробйова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 28. – С. 29–33.
- Коробьева, Р. Г. Информационная модель для анализа станционных процессов на ЭВМ / Р. Г. Коробьева // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 31. – С. 50–54.
- Лещинский, Е. И. Имитационное моделирование на железнодорожном транспорте / Е. И. Лещинский. – М. : Транспорт, 1977. – 176 с.
- Шабалин, Н. Н. Моделирование процессов массового обслуживания на станциях / Н. Н. Шабалин // Ж.-д. трансп. – 1971. – № 5. – С. 64–65.
- A fuzzy Petri net model to estimate train delays / S. Milinkovic, M. Markovic, S. Veskovic et al. – 2013. – № 33. – P. 144–157.
- Giua, A. Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets / A. Giua, C. Seatzu // IEEE Trans. on Automation Science and Engineering. – 2008. – Vol. 5, № 3. – P. 431–445.
- Szűcs, G. Railway Simulation with the CASSANDRA Simulation System / G. Szűcs // Journal of Computing and Information Technology – CIT. – 2001. – Vol. 9, № 2. – P. 133–142.

Д. М. КОЗАЧЕНКО^{1*}

^{1*} Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 371 51 09, ел. пошта kozachenko@upp.diit.edu.ua

ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

Мета. Метою статті є вдосконалення функціональної моделі залізничної станції, спрямоване на скорочення трудовитрат на формалізацію технологічних процесів їх роботи за рахунок використання типових елементів технології. **Методика.** Як основні елементи функціонування залізничної станції розглядаються технологічні операції, виконавці та об'єкти технології. У ході дослідження використовувалися методи теорії масового обслуговування, імітаційного моделювання, кінцевих автоматів і об'єктно-орієнтованого аналізу. **Результати.** У результаті дослідження розроблено формальні структури даних, які дозволяють моделювати функціонування залізничної станції з будь-яким рівнем деталізації. Відповідно до принципів об'єктно-орієнтованого підходу в розробленій моделі окремі об'єкти станційної технології представляються разом з описом їх поведінки. Запропонована модель реалізована у вигляді програмного комплексу. **Наукова новизна.** За рахунок застосування об'єктно-орієнтованого підходу при організації даних удосконалено модель функціонування залізничних станцій, що дозволяє створювати бібліотеки елементарних технологічних процесів і скоротити витрати часу на формалізацію технології роботи станцій. **Практична значимість.** Використання розробленого на базі запропонованої моделі програмного комплексу дозволяє скоротити витрати часу технологів на вирішення завдань отримання техніко-експлуатаційної оцінки проєктованих та існуючих залізничних станцій.

Ключові слова: залізнична станція; технологічний процес; план-графік роботи; математична модель; об'єктно-орієнтований підхід

D. M. KOZACHENKO^{1*}

^{1*} Dep. «Management of Operational Work», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail kozachenko@upp.diit.edu.ua

OBJECT-ORIENTED MODEL OF RAILWAY STATIONS OPERATION

Purpose. The purpose of this article is improvement of the railway stations functional model; it leads to time expenditure cut for formalization technological processes of their work through the use of standard elements of technology. **Methodology.** Some technological operations, executives and technology objects are considered as main elements of the railway station functioning. Queuing techniques were used as the methods of research, simulation, finite state machines and object-oriented analysis. **Findings.** Formal data structures were developed as the result of research that can allow simulating the operation of the railway station with any degree of detail. In accordance with the principles of object-oriented approach in the developed model, separate elements of station technology are presented jointly with a description of their behavior. The proposed model is implemented as a software package. **Originality.** Functional model of railway stations was improved through the application of object-oriented approach to data management. It allow to create libraries of elementary technological processes and reduce time expenditure for formalization the technology of stations work. **Practical value.** Using of software package that was developed on the base of proposed model will reduce time expenditure of technologists in order to obtain technical and operational assessment of projected and existing rail stations.

Keywords: railway station; technical process; plan-schedule of work; mathematical model; an object-oriented approach

REFERENCES

1. Bobrovskiy V.I., Vernigora R.V. Funktsionalnoye modelirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy v trenazherakh operativno - dispetcherskogo personala [Functional modeling of railway stations in simulators of operational - dispatching personnel]. *Matematychnye modeliuvannia – Mathematical modeling*, 2000, no. 2 (5), pp. 68-71.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

2. Bobrovskiy V.I., Kozachenko D.N., Vernigora R.V. Ergaticheskiye modeli zheleznodorozhnykh stantsiy [Ergatic models of railway stations]. *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohii transportu: Seriya "Transportni systemy i tekhnolohii"* [Proc. of State Economy and Technology University of Transport: Series "Transportation Systems and Technology"], 2004, issue 5, pp. 80-86.
3. Bobrovskiy V.I., Kozachenko D.N., Vernigora R.V. Tekhniko-ekonomicheskoye upravleniye zheleznodorozhnyimi stantsiyami na osnove ergaticheskikh modeley [Technical and economic management of railway stations on the basis of ergatic models]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information management systems for railways transport*, 2004, no. 6, pp. 17-21.
4. Buch G., Maksimchuk R.A., Engl M.U. *Obyektno-orientirovanny analiz i proyektirovaniye s primerami prilozheniy (UML 2). 3-ye izdaniye* [Object-Oriented Analysis and Design with Applications (UML 2). The 3-rd edition]. Moscow, Vilyams Publ., 2010. 720 p.
5. Vernygora, R.V., Malashkin V.V. Pidhotovka DSP stantsii dilyanky z vykorystanniam trenazhernoho kompleksu [Attendants Stations Training at a plot using a training set]. *Transportni systemy ta tekhnolohii per-evezen* [Transport systems and technologies of transportation], 2010, issue 1, pp. 34-37.
6. Vetukhov Ye.A., Sotnikov Ye.A. Opredeleniye urovnya zagruzki stantsiy metodom modelirovaniya ikh raboty na ETsVM [Determination of stations charging floor with simulation technique of their work on a electronic digital computer]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 1969, no. 7, pp. 34-37.
7. Ivitskiy V.A., Mirkin A.G. Operativnyy analiz raboty i normirovaniye prostoyev na stantsii s ispolzovaniyem imitatsionnogo modelirovaniya [Operational work analysis and detention settings at a station with the simulation technique use]. *Vestnik VNIIZhTa – VNIIZhT Bulletin*, 1990, issue 7, pp. 7-10.
8. Kozachenko D.N., Vernigora R.V., Korobyova R.H. Prohramnyi kompleks dlia imitatsiinoho modeliuvannia roboty zaliznychnykh stantsii na osnovi dobovoho planu – hrafiku [Software system for simulation of railway stations operation based on a daily plan - schedule]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2008, no. 4 (70), pp. 18-20.
9. Korobyova R.H. Adekvatnist matematychnykh modelei dlia vyznachennia tekhniko-eksploatatsiinykh pokaznykiv roboty stantsii [Adequacy of mathematical models for determining the technical and process indicators of station activity]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnogo universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 28, pp. 29-33.
10. Korobyova R.G. Informatsionnaya model dlya analiza stantsionnykh protsessov na EVM [The information model for the analysis of station processes on a computer]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnogo universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 31, pp. 50-54.
11. Leshchinskiy Ye.I. *Imitatsionnoye modelirovaniye na zheleznodorozhnom transporte* [Simulation on railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1977. 176 p.
12. Shabalin N.N. Modelirovaniye protsessov massovogo obsluzhivaniya na stantsiyakh [Simulation of queuing processes at the stations]. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, 1971, no. 5, pp. 64-65.
13. Milinkovic S., Markovic M., Veskovic S., Ivic M., Pavlovic N. A fuzzy Petri net model to estimate train delays. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2013, no. 33, pp. 144-157.
14. Giua A., Seatzu C. Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets. *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 431-445.
15. Szűcs G. Railway Simulation with the CASSANDRA Simulation System. *Journal of Computing and Information Technology, CIT*, 2001, vol. 9, no. 2, pp.133-142.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. И. Бобровским (Украина);
д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина)

Поступила в редколлегию 21.11.2012

Принята к печати 18.07.2013

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 625.12.033.37-047.58

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Д. О. ЯМПОЛЬСЬКИЙ¹, І. О. СВЯТКО^{1*}

¹*Каф. «Тунелі, основи та фундаменти», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 79, ел. пошта i-svjatko@yandex.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ЗАЛІЗНИЧНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Мета. Під час розрахунків взаємодії ґрунту земляного полотна з верхньою будовою колії постає актуальне завдання визначення параметрів опору зрушенню й параметрів, що визначають розвиток глибоких деформацій у ґрунтах основи. Необхідно виконати пошук узагальнених методів числового моделювання роботи ґрунту основи земляного насипу, що містять аналіз не тільки напруженого стану ґрунту основи, а й деформованого. **Методика.** Виконано аналіз існуючих сучасних та класичних способів числового моделювання роботи зразків ґрунту під дією статичного навантаження. **Результати.** Згідно з традиційними методиками аналізу роботи ґрунтових масивів, обмеження та якісне визначення деформацій земляного полотна можливо лише побічно, через визначення напружень та порівняння отриманих значень із граничними. **Наукова новизна.** Запропоновано створення нової розрахункової моделі, у якій крім класичного підходу до аналізу напруженого стану ґрунту земляного полотна також буде враховуватись і деформований стан. **Практична значимість.** Дослідження показали, що для точного аналізу роботи ґрунтових масивів виникає гостра необхідність у розробці узагальненої методики аналізу сумісної роботи рухомого складу із земляним полотном залізниць, яка може використовуватись при модернізації земляного полотна під швидкісний рух.

Ключові слова: земляне полотно; методи числового моделювання; механічні властивості ґрунтів; моделі ґрунтових основ; деформації

Вступ

Знання механічних властивостей ґрунтів є однаково важливим як для проектування земляного полотна, так і для розрахунків взаємодії рухомого складу з насипом. Зрозуміло, що механічні властивості будь-якого ґрунту в різних умовах роботи повинні істотно відрізнятися.

Під час розрахунків взаємодії ґрунту, наприклад, земляного полотна з верхньою будовою колії актуальним є завдання визначення параметрів опору зрушенню й параметрів, що визначають розвиток глибоких деформацій у ґрунтах основи.

Слід зауважити, що розробка розрахункових моделей ґрунтових основ з урахуванням реаль-

них механічних властивостей ґрунтів та фізичної природи деформацій відбувається повільніше, ніж розробка методів розрахунку конструкцій на ґрунтовій основі. Основна увага в останні 20 років була приділена розвитку теорії плит і балок на суцільній основі. Але незважаючи на розвиток електронних методів обчислення, фізичні основи залишилися незмінними.

Мета

Пошук узагальнених методів числового моделювання роботи ґрунту основи земляного насипу, що містять аналіз не тільки напруженого стану ґрунту основи, а й деформованого.

Методика

Відомо, що складність структури дисперсних ґрунтів і зміни цієї структури в процесі навантаження не дають можливості відобразити в розрахунках усі числові фізичні властивості ґрунтів. Розрахунки взаємодії ґрунтів основи земляного полотна з рухомим складом ведуться на основі механічних розрахункових моделей ґрунту та емпіричних припущень.

Процеси деформації ґрунту проф. Н. Я. Денисов розподіляє на чотири категорії [3]:

- пружні деформації мінеральних зерен;
- структурні деформації, пов'язані зі зміною взаємного розташування зерен і об'єму деформованого ґрунту;
- структурно-адсорбційні деформації, що виникають у результаті зміни товщини водних плівок у контактах між мінеральними зернами;
- псевдопластичні деформації в текучих глинистих ґрунтах, які відбуваються без зміни об'єму й пов'язані з переміщенням частинок і агрегатів, але не з пластичними деформаціями самих зерен.

Н. А. Цитович [12] ділить деформації ґрунтів на пружні та залишкові. Замість терміна «пружні» було б правильніше користуватися терміном «відновлювальні» і відносити до них пружні деформації зерен і структурно-адсорбційні, а також деформації, пов'язані з пружним стиском та розширенням повітря, затисненого в порах. До залишкових деформацій Н. А. Цитович відносить структурні та псевдопластичні деформації.

Численні дослідження й спостереження показали, що ґрунтовим основам властиві деформації загального характеру (за термінологією Н. А. Цитовича), що поширюються за межі навантаженої площі, і деформації місцеві, що розвиваються тільки під навантаженням. Зв'язок деформацій з напруженнями може бути лінійним та нелінійним. Звісно, між механічними параметрами ґрунтів у області малих деформацій і параметрами, що визначають його міцність при великих деформаціях, існують деякі кореляційні залежності.

Відомі розрахункові моделі основ тією чи іншою мірою відображають усі ці властивості, проте більшість з них розглядають лише пружні деформації, що відновлюються з часом, або не відділяють їх від залишкових, а також вважають залежність між напруженнями й дефор-

маціями лінійною, незважаючи на те, що вона майже не властива природним ґрунтам.

При проектуванні штучних споруд у нормальних умовах псевдопластичні деформації випирання ґрунту виключаються й доводиться мати справу з пружними і структурно-адсорбційними, а також із залишковими структурними деформаціями ущільнення.

Результати

Для наочного відображення основних розрахункових характеристик кожної з наведених моделей ґрунтових основ розглянемо їх поведінку при вдавлюванні круглого жорсткого штампа, встановленого на горизонтальній поверхні моделі. Процес вдавлювання штампа широко використовується під час польових досліджень ґрунтів, і результати вдавлювання служать основою для вибору розрахункової моделі та обчислення її параметрів.

Основні розрахункові деформативні характеристики ґрунту під штампом та навколо штампа під час застосування різних моделей ґрунту зведено до табл. 1 та 2 відповідно.

Найбільш проста модель – модель Вінклера, яка набула широкого застосування в розрахунках балок на ґрунтовій основі й полягає в тому, що осадка штампа пропорційна навантаженню. Деформації моделі досить пружні й після зняття навантаження зникають. Вони мають місцевий характер, тобто розвиваються безпосередньо під штампом, не поширюючись в сторони. Єдиним механічним параметром служить коефіцієнт постелі.

Згідно з «Правилами розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість» [10], під час виконання практичних інженерних розрахунків верхньої будови колії на міцність рейка розглядається як балка нескінченної довжини незмінного перерізу, що вільно лежить на суцільній рівнопружній основі або на окремих точених рівнопружних опорах (застосовується саме модель Вінклера). Можливість наявності залишкових деформацій у баласті та земляному полотні, що розвиваються під рухомим навантаженням, враховують лише побічно, через визначення напружень. Розрахунок напружень у баласті ведеться на основі розв'язання плоскої задачі теорії пружності для навантаження однорідного ізотропного півпростору статичним прямокутним або трикутним смуговим розподіленим навантаженням.

Таблиця 1

Основні розрахункові деформативні характеристики ґрунту під штампом під час застосування розглянутих моделей ґрунтових основ

| Розрахункова модель ґрунтової основи | Осадка поверхні під штампом D при дії тиску p | |
|---|--|--|
| | Пружна S , см | Залишкова S_0 , см |
| Модель Вінклера | $S = \frac{p}{C}$ | 0 |
| Модель Фусса | 0 | $S_0 = \frac{p}{C}$ |
| Модель пружного півпростору | $S = \frac{\pi}{4} D \frac{(1-\mu^2)}{E} p$ | 0 |
| Модель лінійно-деформівного півпростору | | $S_0 = \frac{\pi}{4} D \left(\frac{(1-\mu_0^2)}{E_0} - \frac{(1-\mu^2)}{E} \right) p$ |
| Модель Пастернака | $S = \frac{Dp}{DC_1 + 4\sqrt{C_1 C_2} + 8\frac{C_2}{D}}$ | 0 |
| Модель Синіцина | $S = \frac{\pi}{4} D \frac{(1-\mu^2)}{E} p$ | $S_0 = \frac{p}{C}$ |
| Модель Черкасова–Клейна | | $S_0 = D \sqrt[3]{\frac{p}{A}}$ |

Таблиця 2

Основні розрахункові деформативні характеристики ґрунту навколо штампа під час застосування розглянутих моделей ґрунтових основ

| Розрахункова модель ґрунтової основи | Осадка поверхні навколо штампа D при дії тиску p | |
|---|---|--|
| | Пружна S' , см | Залишкова S'_0 , см |
| Модель Вінклера | 0 | 0 |
| Модель Фусса | 0 | 0 |
| Модель пружного півпростору | $S' = \frac{D(1-\mu^2)}{2E} p \arcsin \frac{D}{2r}$ | 0 |
| Модель лінійно-деформівного півпростору | | $S'_0 = \frac{D}{2} \left(\frac{(1-\mu_0^2)}{E_0} - \frac{(1-\mu^2)}{E} \right) p \arcsin \frac{D}{2r}$ |
| Модель Пастернака | $S' = \frac{Dp}{DC_1 + 4\sqrt{C_1 C_2} + 8\frac{C_2}{D}} e^{-\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} r}$ | 0 |
| Модель Синіцина | $S' = \frac{D(1-\mu^2)}{2E} p \arcsin \frac{D}{2r}$ | 0 |
| Модель Черкасова–Клейна | | 0 |

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Згідно з цією методикою обмеження та якісне визначення деформацій земляного полотна можливо лише побічно, через визначення напружень та порівняння отриманих значень із граничними. Але не слід забувати, що можуть також виникати залишкові деформації ґрунту земляного полотна при напруженнях, нижчих за нормативні максимально допустимі значення. Це може бути зумовлене низьким модулем деформацій ґрунту земляного полотна.

У наведених таблицях прийнято такі позначення: C – коефіцієнт постелі, кгс/см³; E – модуль пружності, кгс/см²; μ – коефіцієнт Пуассона; r – відстань від центру штамп до точки визначення осадок поза штампом, см; E_0 – модуль загальної деформації, кгс/см²; μ_0 – коефіцієнт поперечної деформації; H – товщина шару, см; C_1 – коефіцієнт стиснення, кгс/см³; C_2 – коефіцієнт зсуву, кгс/см; A – число твердості, кгс/см²; n – ступінь зміцнення.

На відміну від моделі Вінклера, деформації в моделі Фусса місцеві та цілком залишкові і після розвантаження зберігаються. Через відсутність урахування пружних деформацій ця модель ґрунтової основи мало придатна для застосування в розрахунках взаємодії насипу з рухомих складом.

Особливість моделі, що була запропонована П. Л. Пастернаком [8], – швидке затухання деформацій поверхні в міру віддалення від штамп. Модель передбачається цілком пружною.

Більш складна модель – модель пружного однорідного півпростору. Тут також деформації прямо пропорційні навантаженням на штамп, але, на відміну від моделей Фусса і Вінклера, вони мають загальний характер, тобто розвиваються не тільки під штампом, але й поширюються далеко за його межі. Природа цих деформацій пружна і після зняття навантаження зі штамп вони зникають.

Методи моделювання за П. Л. Пастернаком та за теорією пружного однорідного півпростору можуть бути застосовані для дослідження деформації земляного полотна на його бровці, тобто поза межами дії навантаження, що передається від рухомого складу.

Модель, запропонована А. П. Синіциним [4], є комбінацією моделі Фусса і пружного однорідного півпростору. Вона складається зі сти-

снutoго шару кінцевої потужності на поверхні, який здатний тільки на залишкові деформації місцевого характеру; нижче цього шару лежить пружний однорідний півпростір. Модель Синіцина дозволяє змодельовати цілу низку випадків складної будови ґрунтових основ, що трапляються на практиці.

Універсальна модель ґрунтової основи була вперше запропонована П. І. Черкасовим та Г. К. Клейном [13]. Під час розробки своєї універсальної моделі ґрунтової основи вчені прагнули врахувати такі особливості деформацій реальних ґрунтових основ:

- залишкові деформації ґрунту мають в основному місцевий характер і нелінійно пов'язані з напруженнями;

- відновлювальні деформації мають загальний характер, і зв'язок їх з напруженнями наближається до лінійного.

Модель ґрунтової основи як лінійно-деформівного однорідного півпростору відрізняється від пружного здатністю до одночасного розвитку пружних та залишкових деформацій. Зв'язок між деформаціями і навантаженням на штамп лінійний, але після розвантаження штамп деформації зникають не повністю – частково вони зберігаються як під самим штампом, так і за його межами.

Цей метод моделювання ґрунту земляного полотна доцільно застосовувати в розрахунках як загальний, що може враховувати найбільшу кількість якісних нюансів деформованого стану ґрунту насипу земляного полотна.

Наукова новизна та практична значимість

Загальна умова застосування всіх розглянутих розрахункових моделей – робота ґрунту в області малих деформацій, тобто далеко від початку руйнування ґрунтової основи. Але накопичування залишкових деформацій під регулярною дією динамічного навантаження від рухомого складу призводить до виникнення певної групи дефектів земляного полотна або зниження його несучої здатності.

У той же час, метод розрахунку елементів земляного полотна, що застосовується під час проектування залізничних колій, відповідно до ЦП 0117, не дозволяє повністю оцінити вплив рухомого складу на ґрунт земляного по-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

лотна, оскільки мірою впливу в цьому випадку мають бути саме значення деформацій, а не напружень у товщі баласту чи земляного полотна.

Висновки

Виходячи з вищезазначеного, за умови зростання швидкості рухомого складу та інтенсивності руху на залізницях України, виконані дослідження дозволяють розробити узагальнену методику аналізу сумісної роботи рухомого складу із земляним полотном залізниць, у якій крім класичного підходу до аналізу напруженого стану ґрунту земляного полотна буде враховуватись і деформований стан. Така методика дозволила б запобігати виникненню дефектів земляного полотна під час проектування та будівництва нових залізничних колій, а також прогнозувати виникнення дефектів земляного полотна на коліях, що підлягають реконструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Банах, В. А. Моделирование работы строительных конструкций эксплуатируемых зданий при передаче динамических воздействий через ґрунтовый массив / В. А. Банах // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39. – С. 18–22.
2. Голли, А. В. Мониторинг напряженно-деформированного состояния ґрунтов в основании сооружений / А. В. Голли // Реконструкция городов и геотехническое стр-во. – 2003. – № 5. – С. 128–132.
3. Денисов, Н. Я. О природе деформации глинистых ґрунтов / Н. Я. Денисов. – М. : Речиздат, 1951. – 200 с.
4. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. – М. : Госстройиздат, 1962. – 240 с.
5. Зоценко, М. Л. Расчет деформаций зданий и сооружений / М. Л. Зоценко. – Запорожье : ООО «ИПО Запорожье», 2008. – 496 с.
6. Зоценко, М. Л. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, А. В. Яковлев. – Полтава : ПНТУ, 2004. – 568 с.
7. Малышев, М. В. Механика ґрунтов. Основания и фундаменты / М. В. Малышев, Г. Г. Болдырев. – М. : Изд-во ассоциации строит. вузов, 2004. – 328 с.
8. Пастернак, П. Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П. Л. Пастернак. – М. : Стройиздат, 1954. – 56 с.
9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К. : Сталь, 2002. – 600 с.
10. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП-0117 : затв. : Наказом Укрзалізниці від 13.12.2004 р. № 960-ЦЗ. – К. : ЦП УЗ, 2004. – 69 с.
11. Тюткин, А. Л. Сравнительный анализ конечно-элементных моделей свайного фундамента при взаимодействии с основанием / А. Л. Тюткин, А. В. Гулак // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 32. – С. 122–126.
12. Цитович, Н. А. Механика ґрунтов / Н. А. Цитович. – М. : Стройиздат, 1951. – 528 с.
13. Черкасов, И. И. Механические свойства ґрунтовых оснований / И. И. Черкасов. – М. : Авто-трансиздат, 1958. – 156 с.
14. Elliott, Robert P. Permanent Deformation of Subgrade Soils / Robert P. Elliott, Norman D. Dennis, Yanjun Qiu. – Fayetteville : Mack-Blackwell Transportation Center, 1998. – 216 p.
15. Monismith, C. L. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading / C. L. Monismith, N. Ogawa, C. R. Freeme // Transportation Research Record. – 2006. – Vol. 1975. – P. 1–17.
16. Simi, H. Building Simulation Tools for Retrofitting Residential Structures / H. Simi, Amherst // Energy Engineering. – 2012. – Vol. 109. – Issue 3. – P. 53–74.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Д. А. ЯМПОЛЬСКИЙ¹, И. А. СВЯТКО^{1*}

^{1*} Каф. «Тоннели, основания и фундаменты», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 79, эл. почта i-svjatko@yandex.ua

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Цель. При расчетах взаимодействия грунта земляного полотна с верхним строением пути встает актуальная задача определения параметров сопротивления сдвигу и параметров, определяющих развитие глубоких деформаций в грунтах основания. Необходимо выполнить поиск обобщенных методов численного моделирования работы грунта основания земляной насыпи, которые включают в себя анализ не только напряженного состояния грунта основания, а и деформированного. **Методика.** Проведен анализ существующих современных и классических способов численного моделирования работы образцов грунта под действием статической нагрузки. **Результаты.** Согласно традиционных методик анализа работы грунтовых массивов, ограничение и качественное определение деформаций земляного полотна возможны только косвенно, через определение напряжений и сравнение полученных значений с предельными. **Научная новизна.** Предложено создание новой расчетной модели, в которой кроме классического подхода к анализу напряженного состояния грунта земляного полотна будет учитываться и деформированное состояние. **Практическая значимость.** Исследования показали, что для точного анализа работы грунтовых массивов возникает острая необходимость в разработке обобщенной методики анализа совместной работы подвижного состава с земляным полотном железной дороги, которая может использоваться при модернизации земляного полотна под скоростное движение.

Ключевые слова: земляное полотно; методы численного моделирования; механические свойства грунтов; модели грунтовых оснований; деформации

V. D. PETRENKO¹, D. O. YAMPOLSKIY¹, I. O. SVIATKO^{1*}

^{1*}Dep. «Tunnels, bases and foundations», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. + 38 (056) 373 15 79, e-mail i-svjatko@yandex.ua

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATION MODELS OF RAILWAY SUBGRADE

Purpose. In transport engineering structures design, the primary task is to determine the parameters of foundation soil and nuances of its work under loads. It is very important to determine the parameters of shear resistance and the parameters, determining the development of deep deformations in foundation soils, while calculating the soil subgrade - upper track structure interaction. Search for generalized numerical modeling methods of embankment foundation soil work that include not only the analysis of the foundation stress state but also of its deformed one. **Methodology.** The analysis of existing modern and classical methods of numerical simulation of soil samples under static load was made. **Findings.** According to traditional methods of analysis of ground masses work, limitation and the qualitative estimation of subgrade deformations is possible only indirectly, through the estimation of stress and comparison of received values with the boundary ones. **Originality.** A new computational model was proposed in which it will be applied not only classical approach analysis of the soil subgrade stress state, but deformed state will be also taken into account. **Practical value.** The analysis showed that for accurate analysis of ground masses work it is necessary to develop a generalized methodology for analyzing of the rolling stock - railway subgrade interaction, which will use not only the classical approach of analyzing the soil subgrade stress state, but also take into account its deformed one.

Keywords: subgrade; numerical modeling methods; mechanical properties of soil; foundation models; deformation

REFERENCES

1. Banakh V.A. Modelirovaniye raboty stroitelnykh konstruktsiy ekspluatiruyemykh zdaniy pri peredache dinamicheskikh vozdeystviy cherez gruntovyy masiv [Structural behavior modeling of the operated constructions during dynamic impacts transfer through the soil]. *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 39, pp. 18-22.
2. Golli A.V. Monitoring napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntov v osnovanii sooruzheniy [Monitoring of the stress-strain state of soils in the structure bases]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitelstvo – Urban renewal and geotechnical construction*, 2003, no. 5, pp. 128-132.
3. Denisov N.Ya. *O prirode deformatsii glinistykh gruntov* [On the nature of the clay soils distortions]. Moscow, Izd. Min. Rech. Flota Publ., 1951. 200 p.
4. Zhemochkin B.N., Sinitsyn A.P. *Prakticheskiye metody rascheta fundamentnykh balok i plit na uprugom osnovanii* [Practical methods for calculating of the foundation beams and plates on the elastic foundation]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1962. 240 p.
5. Zotsenko M.L. *Raschet deformatsiy zdaniy i sooruzheniy* [Calculation of deformations of buildings and structures]. Zaporozhye, OOO “IPO Zaporozhye” Publ., 2008. 496 p.
6. Zotsenko M.L., Kovalenko V.I., Yakovlev A.V. *Inzhenerna heolohiia. Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenti* [Engineering geology. Soil mechanics, bases and foundations]. Poltava, PNTU Publ., 2004. 568 p.
7. Malyshev M.V., Boldyrev G.G. *Mekhanika gruntov. Osnovaniya i fundamenti* [Soil mechanics. Bases and foundations]. Moscow, Izd-vo assotsiatsii stroitelnykh vuzov Publ., 2004. 328 p.
8. Pasternak P.L. *Osnovy novogo metoda rascheta fundamentov na uprugom osnovanii pri pomoshchi dvukh koeffitsientov posteli* [Foundations of the new calculation method of basis on an elastic foundation by means of two coefficients of subgrade resistance]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1954. 56 p.
9. Perelmutter A.V., Slivker V.I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Simulation model of constructions and possibility of their analysis]. Kyiv, Stal Publ., 2002. 600 p.
10. *Pravyly rozrakhunkiv zaliznychnoi kolii na mitsnist i stiikist* [Rules of railway track calculating for strength and durability]. Kyiv, TsP UZ Publ., 2004. 69 p.
11. Tyutkin A.L., Gulak A.V. Sravnitelnyy analiz konechno-elementnykh modeley svaynogo fundamenta pri vzaimodeystvii s osnovaniyem [Comparative analysis of finite element models of the pile foundation during interaction with the foundation]. *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. 122-126.
12. Tsitovich N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1951. 528 p.
13. Cherkasov I.I. *Mekhanicheskiye svoystva gruntovykh osnovaniy* [Mechanical properties of subgrades]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1958. 156 p.
14. Robert P. Elliott, Norman D. Dennis, Yanjun Qiu. Permanent Deformation of Subgrade Soils. Fayetteville, Mack-Blackwell Transportation Center Publ., 1998. 216 p.
15. Monismith C.L., Ogawa N., Freeme C.R. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading. *Transportation Research Record*, 2006, vol. 1975, pp. 1-17.
16. Simi H., Amherst. Building Simulation Tools for Retrofitting Residential Structures. *Energy Engineering*, 2012, vol. 109, issue 3, pp. 53-74.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н. А. О. Скоковою (Україна); к.т.н., доц. І. К. Бадалахою (Україна)

Надійшла до редколегії 04.06.2013

Прийнята до друку 08.08.2013

УДК 625.173-752.3

О. С. ЧЕРНИШОВА^{1*}, М. І. УМАНОВ², В. В. КОВАЛЬОВ¹, Ю. С. МАРКОВ¹, О. В. ГУБАР²

^{1*}Каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел./факс + 38 (056) 373 15 48, ел. пошта okschernysh@mail.ru

²Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел./факс + 38 (056) 373 15 42, ел. пошта gubarav@mail.ru

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ У ПІСЛЯРЕМОНТНИЙ ПЕРІОД НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ

Мета. Проаналізувати сили взаємодії колії та рухомого складу при застосуванні динамічних стабілізаторів, а також визначити ділянки, на яких стабілізація колії доцільна не лише за технічними показниками, але й за економічними. **Методика.** Для досягнення мети дослідження використано методи аналізу матеріальних потоків, характерні для місць, що потребують застосування динамічних стабілізаторів на коліях залізничного транспорту. **Результати.** Дослідження щодо економічної ефективності використання динамічних стабілізаторів, які виконувалися вченими останнім часом, не поширюються на порівняння вартості робіт зі стабілізації колії та витрат залізниці за період дії обкатки. Під час обкатки поїзди рухаються з обмеженою швидкістю, що викликає відповідні фінансові втрати. Обмеження швидкості призводить не лише до зростання часу руху, але й у деяких випадках до підвищеного споживання паливно-енергетичних ресурсів. А на ділянках гальмування та розгону безпосередньо перед та за ділянками обмеження спостерігається більш інтенсивне розладнання колії та зростання витрат на її поточне утримання. Розроблено методику оцінки економічної ефективності застосування динамічних стабілізаторів після виконання ремонтів колії для ділянок залізниць України з різними умовами експлуатації. Ця методика містить розрахунок витрат залізниці, що зумовлені додатковим часом руху, підвищеним споживанням паливно-енергетичних ресурсів та витратами на поточне утримання. **Наукова новизна.** Розроблено методику оцінки економічної ефективності застосування динамічних стабілізаторів у післяремонтний термін. Запропонований підхід дозволяє отримувати раціональне рішення з урахуванням особливостей ділянок, на яких виконано ремонти колії. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють раціонально призначати роботи з динамічної стабілізації колії з урахуванням експлуатаційних характеристик ділянок залізниць та економічної доцільності виконання запланованих робіт.

Ключові слова: динамічна стабілізація колії; сили взаємодії; експлуатаційні витрати; економічний ефект

Вступ

На залізницях України після виконання модернізації або капітального ремонту колії призначають так звану обкатку колії з метою ущільнення щебеневого шару, зменшення сил взаємодії рухомого складу та колії, забезпечення рівномірної осадки колії та її стійкості. У цей час рух поїздів відбувається з обмеженими швидкостями, що впливає на експлуатаційні витрати залізниць. Згідно з «Інструкцією з улаштування та утримання колії залізниць України» ЦП-0269 [3] обкатка вважається завершеною після пропуску по ділянці 350 тис. т вантажу.

Дослідження, що проводилися вітчизняними та закордонними вченими, доводять, що застосування динамічних стабілізаторів у процесі ремонту колії дозволяє уникнути необхідності

призначення обкатки. З 2008 р. до «Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України» ЦП-0113 [6] було включено доповнення, яке зобов'язує після глибокого очищення щебеню виконувати суцільну після осадкову виправку та стабілізацію колії після пропуску 1,0...1,5 млн т бруто вантажу. Отже, вивчення й розробка технологій застосування динамічних стабілізаторів є важливим завданням колійного господарства, актуальним у сучасних умовах розвитку залізничного транспорту.

Мета

Метою цього дослідження є аналіз зменшення сил взаємодії колії та рухомого складу під час застосування динамічних стабілізаторів,

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

а також визначення ділянок, на яких стабілізація колії доцільна не лише за технічними, а й за економічними показниками.

Методика

Проблема ефективності застосування динамічних стабілізаторів широко висвітлюється в сучасній науковій літературі багатьох країн, у тому числі України, Росії та Німеччини. Зокрема, дослідження ефективності застосування динамічних стабілізаторів з технічної точки зору викладено в працях [1, 5, 12–15]. Низку досліджень із зазначеного питання виконано вченими кафедри «Колія та колійне господарство» ДПТУ [8–10].

У цей час на залізницях України використовують різні за конструкцією динамічні стабілізатори колії: DGS (виробництва австрійської компанії «Plasser & Theurer»), ДСП (виробництва «Калугаремпутьмаш», Росія), а з 2012 р. застосовують стабілізатор DGS 62 N вітчизняного виробництва (рис. 1).

Динамічний стабілізатор колії DGS 62 N виготовляють на Дніпропетровському заводі «Трансмаш» за підтримки австрійської фірми «Plasser & Theurer». Це самохідна колійна машина важкого типу, що застосовується для прискореної й контрольованої стабілізації колії без порушення профілю, плану та рівня під час усіх видів ремонту колії і будівництва нових залізничних колій, що відповідають вимогам Правил приймання робіт після виконання модернізації і ремонтів колії та її облаштувань [7], як самостійно, так і в комплексі з виправно-підбивальними-рихтувальними машинами. За допомогою двох стабілізуючих пристроїв, один з яких створює горизонтальне коливання поперек осі колії, другий – вертикальне навантаження, створюється ефект динамічної стабілізації, який передається на баластну призму й ущільнює її. Стабілізуючі пристрої за допомогою рейкових та затискальних роликів і автоматики витримують поперечний рівень при вібрації, ущільнюють баластну призму. Слід зазначити,



Рис. 1. Динамічний стабілізатор колії DGS 62 N виробництва Дніпропетровського заводу «Трансмаш»

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

що різні типи динамічних стабілізаторів передають на колію вібрацію різної частоти, зокрема DGS – 35 Гц, ДСП – 45 Гц.

Своєю дією динамічний стабілізатор частково замінює експлуатаційні навантаження, забезпечує стійкість колії, а також відновлює опір поперечному зсуву, що має велике значення для безпеки руху поїздів. Коливання, що створюються стабілізатором, сприяють підвищенню однорідності баласту, рівномірній осадці колії і, як наслідок, впливають на зменшення витрат на поточне утримання колії та на подовження міжремонтних термінів.

У процесі експериментів та теоретичних досліджень у поодиноких кривих (з радіусами від 500 до 2 000 м), а також на прямих ділянках колії досліджувалися зміни коефіцієнтів вертикальної динаміки (у буксовому та в централь-

ному ступені) та стійкості проти вкочування колеса на рейку. При цьому розглядалися три варіанти: ділянка після виправки колії та пропуску динамічного стабілізатора один раз; ділянка після двох виправок та двох стабілізацій; і ділянка після пропуску 1 млн т вантажу, виправки та третьої стабілізації. За результатами досліджень зроблено висновки, що застосування динамічної стабілізації зменшує сили взаємодії колії та рухомого складу і, як наслідок, – знос колії та дозволяє збільшувати міжремонтні інтервали. Також було встановлено допустимі швидкості руху поїздів залежно від плану колії, щільності баласту та допустимих величин нерівностей. Результати для ділянок з різними величинами нерівностей у плані наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Допустимі швидкості руху поїздів після застосування динамічних стабілізаторів колії

| Радіус кривої, м | Величина нерівності в плані, мм | Після однієї стабілізації колії | | | Після двох стабілізацій колії | | | Після трьох стабілізацій колії | | |
|------------------|---------------------------------|---|------|-----------------------------|---|------|-----------------------------|---|------|-----------------------------|
| | | Діапазон непогашеного прискорення, м/с ² | | Допустима швидкість, км/год | Діапазон непогашеного прискорення, м/с ² | | Допустима швидкість, км/год | Діапазон непогашеного прискорення, м/с ² | | Допустима швидкість, км/год |
| | | min | max | | min | max | | min | max | |
| Пряма | 5 | – | – | 160 | – | – | 160 | – | – | 160 |
| | 10 | – | – | 160 | – | – | 160 | – | – | 160 |
| | 16,5 | – | – | 100 | – | – | 120 | – | – | – |
| 2 000 | 5 | 0,05 | 0,43 | 160 | 0,05 | 0,43 | 160 | 0,07 | 0,78 | 160 |
| 2 000 | 10 | 0,28 | 0,48 | 130 | 0,20 | 0,57 | 140 | 0,57 | 0,68 | 150 |
| 1 500 | 5 | 0,38 | 0,57 | 160 | 0,38 | 0,57 | 160 | 0,40 | 0,70 | 160 |
| 1 500 | 10 | 0,34 | 0,52 | 100 | 0,35 | 0,55 | 120 | 0,46 | 0,68 | 140 |
| 1 000 | 5 | 0,30 | 0,50 | 110 | 0,20 | 0,56 | 120 | 0,38 | 0,60 | 130 |
| 1 000 | 8 | 0,26 | 0,44 | 90 | 0,40 | 0,58 | 100 | 0,56 | 0,77 | 120 |
| 1 000 | 10 | 0,36 | 0,56 | 85 | 0,42 | 0,62 | 90 | 0,39 | 0,70 | 95 |
| 800 | 5 | 0,05 | 0,54 | 85 | 0,37 | 0,51 | 95 | 0,57 | 0,75 | 120 |
| 800 | 8 | 0,37 | 0,61 | 80 | 0,48 | 0,56 | 85 | 0,43 | 0,63 | 100 |
| 800 | 10 | 0,10 | 0,40 | 65 | 0,43 | 0,61 | 80 | 0,39 | 0,70 | 85 |
| 600 | 5 | 0,28 | 0,45 | 70 | 0,37 | 0,60 | 80 | 0,60 | 0,78 | 95 |
| 600 | 8 | 0,37 | 0,61 | 65 | 0,30 | 0,58 | 70 | 0,61 | 0,79 | 85 |
| 600 | 10 | 0,28 | 0,46 | 60 | 0,30 | 0,54 | 65 | 0,30 | 0,63 | 70 |
| 500 | 5 | 0,37 | 0,55 | 60 | 0,30 | 0,55 | 70 | 0,60 | 0,78 | 90 |

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

З табл. 1 видно, що при динамічній стабілізації на ділянці з кривою радіусом 1 500 м та більше при невеликій величині нерівності (до 5 мм), а також на прямих ділянках кількість динамічних стабілізацій не впливає на рівень допустимої швидкості. У цьому випадку після однієї стабілізації дозволяється відкривати перегін зі швидкістю пасажирських поїздів 160 км/год. Що стосується ділянок з кривими меншого радіусу, то в цьому випадку кожна наступна стабілізація дозволяє збільшувати допустимий рівень швидкості на ділянці після виконання ремонту на 10...30 %. Так, на ділянці з кривою радіусом 600 м при нерівності величиною 5 мм проведення однієї динамічної стабілізації дозволяє встановлювати допустиму швидкість руху поїздів 70 км/год, двох стабілізацій – 80 км/год, а трьох – 95 км/год (див. табл. 1). Це дає можливість уникнути додаткових витрат, що зумовлені зростанням часу руху на ділянках, де призначається обкатка колії.

Виконані дослідження [8, 10] дозволили розробити рекомендації щодо встановлення допустимих швидкостей руху пасажирських поїздів на відремонтованих ділянках, які наведено у табл. 2 залежно від параметрів плану лінії та кількості виконаних стабілізацій колії.

Дослідження щодо економічної ефективності застосування динамічних стабілізаторів, які виконувалися вченими останнім часом, не поширюються на порівняння вартості робіт зі стабілізації колії та втрат залізниці за період дії обкатки. Оскільки під час обкатки поїзди рухаються з обмеженою швидкістю, то це викликає відповідні фінансові втрати. Обмеження швидкості призводить не лише до зростання часу руху, але й у деяких випадках до підвищеного споживання паливно-енергетичних ресурсів. А на ділянках гальмування та розгону безпосередньо перед та за ділянками обмеження спостерігається більш інтенсивне розладнання колії та зростання витрат на її поточне утримання. Більш детальна інформація із зазначеного питання наведена в працях [2, 4, 11].

Авторами запропонована методика оцінки економічної ефективності застосування динамічних стабілізаторів після виконання ремонтів колії для ділянок залізниць України з різними умовами експлуатації. Ця методика містить розрахунок втрат залізниці, що зумовлені: додатковим часом руху, підвищеним споживанням паливно-енергетичних ресурсів та витратами на поточне утримання. З метою встановлення аналітичної залежності для визначення останньої складової методики авторами було

Таблиця 2

Допустима швидкість руху пасажирських поїздів при застосуванні динамічних стабілізаторів під час виконання ремонтів колії

| План колії (радіус кривої, м) | Допустима швидкість руху пасажирських поїздів на різних етапах робіт, км/год | | |
|----------------------------------|--|----------------------------------|--|
| | Після однієї стабілізації колії | Після двох стабілізацій колії | Після пропуску 1 млн т вантажу, виправки та третьої стабілізації |
| Пряма | 100 | 120 | Встановлена |
| 2 000 | 100 | 120 | Встановлена |
| 1 500 | 100 | 120 | Встановлена |
| 1 000 | 100 | 120 | Встановлена |
| 800 | 85 | 95 | Встановлена |
| 600 | 70 | 80 | Встановлена |
| 500 | 60 | 70 | Встановлена |

Дані табл. 2 свідчать про те, що виконання третьої виправки та динамічної стабілізації після пропуску 1 млн т вантажу дозволяє відкривати перегін зі встановленим рівнем швидкості.

проаналізовано статистичні дані по Придніпровській та Львівській залізницях. Було опрацьовано інформацію про витрати на поточне утримання колії для кілометрів, на яких поїзди

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

рухаються у режимі гальмування або розгону. При цьому враховувалися параметри поздовжнього профілю та плану лінії, а також вантажо-напруженість ділянок залізниці.

Призначення обкатки колії передбачає після відкриття відремонтованої ділянки пропуск перших двох поїздів з допустимим рівнем швидкості 25 км/год, інших поїздів до кінця дня – 60 км/год, а надалі – 100 км/год. Після однієї динамічної стабілізації колії дозволяється пропуск поїздів з допустимим рівнем швидкості руху поїздів 100 км/год, після двох стабілізацій – 120 км/год. Виходячи з цього й виконувалися подальші дослідження за методикою, що розроблена у [2]. Вихідні дані до розрахунку прийнято такі: електрична та тепловозна тяга; маси вантажних поїздів коливалися від 3 000 до 5 000 т; маса пасажирського поїзда прийнята рівною 1 000 т; ухили поздовжнього профілю розглядалися в діапазоні 0...8 ‰; інтенсивність руху – 5...50 поїздів/добу.

У першу чергу додаткові витрати залізниці від дії обкатки колії залежать від терміну дії обкатки, який, у свою чергу, залежить від інтенсивності руху та маси поїздів (рис. 2).

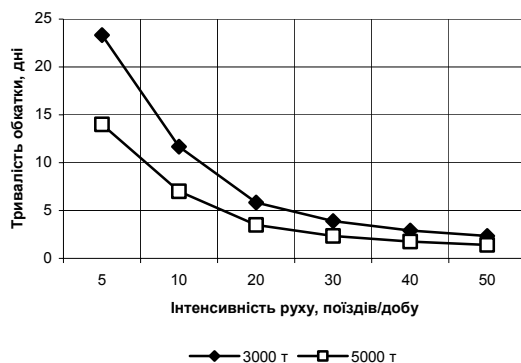


Рис. 2. Залежність терміну дії обкатки від інтенсивності руху та маси вантажного поїзда

З графіка видно (див. рис. 2), що чим більша маса поїзда та інтенсивніший рух на ділянці, тим менший термін обкатки й більші експлуатаційні витрати.

Як було зазначено вище, на додаткові витрати залізниці впливають зміни часу руху, витрат на поточне утримання та споживання паливно-енергетичних ресурсів при введенні обкатки колії. На витрати, пов'язані зі споживанням паливно-енергетичних ресурсів, впливає

значення механічної роботи локомотива, що визначалося за допомогою тягових розрахунків, а на витрати з поточного утримання – робота сил гальмування, яка також визначалася тяговими розрахунками, нарівні з часом руху. Зміни часу руху для вантажних поїздів масою 3 000 т з локомотивами серії ВЛ8 при електричній тязі та 2ТЕ116 при тепловозній зображено на рис. 3.

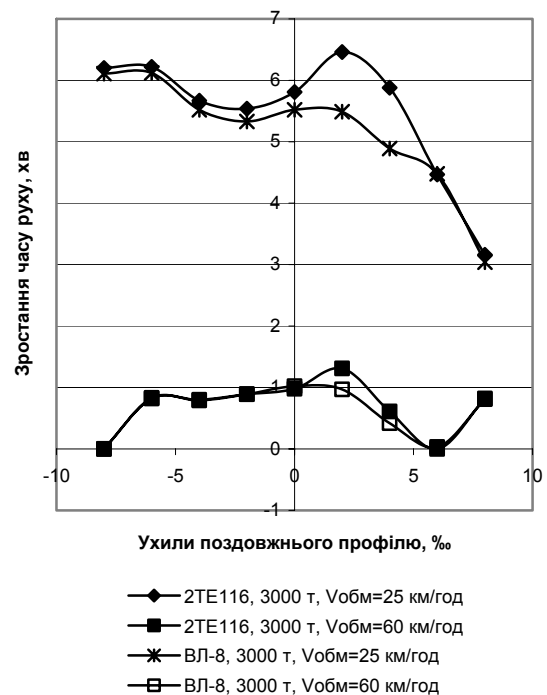


Рис. 3. Зростання часу руху при обкатці колії

З графіка (див. рис. 3) видно, що найбільш інтенсивно зростає час руху на некрутих підйомах і спусках та за меншого рівня допустимої швидкості.

На рис. 4 зображено залежність зростання механічної роботи локомотива при введенні обкатки колії. На зазначеному графіку спостерігається аналогічна до попереднього тенденція змін. Також спостерігається суттєвий вплив маси поїзда. Наприклад, під час проходження поїзда масою 5 000 т зі швидкістю 25 км/год механічна робота локомотива буде більшою майже на 30 %, ніж при проході поїзда масою 3 000 т. Але при ухилі поздовжнього профілю більшому за 5 ‰ різниця майже відсутня.

Залежність зміни роботи сил гальмування від ухилів поздовжнього профілю, мас поїздів та рівня допустимої швидкості наведена на рис. 5.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

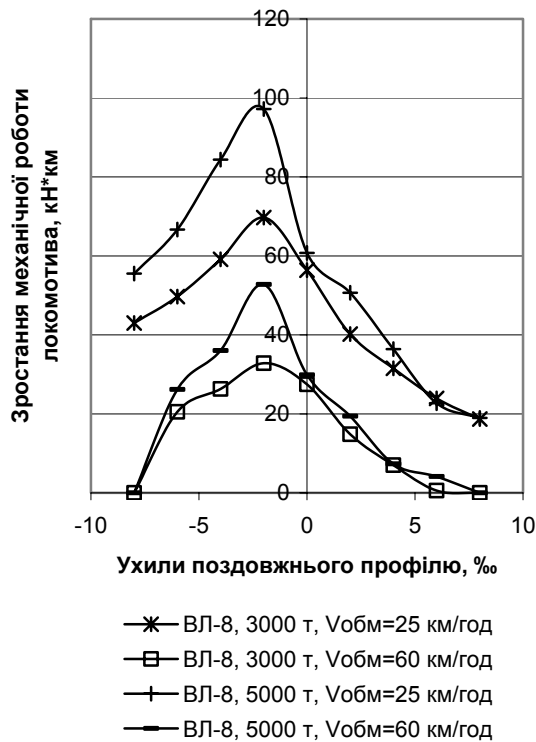


Рис. 4. Зростання механічної роботи локомотива при обкатці колії

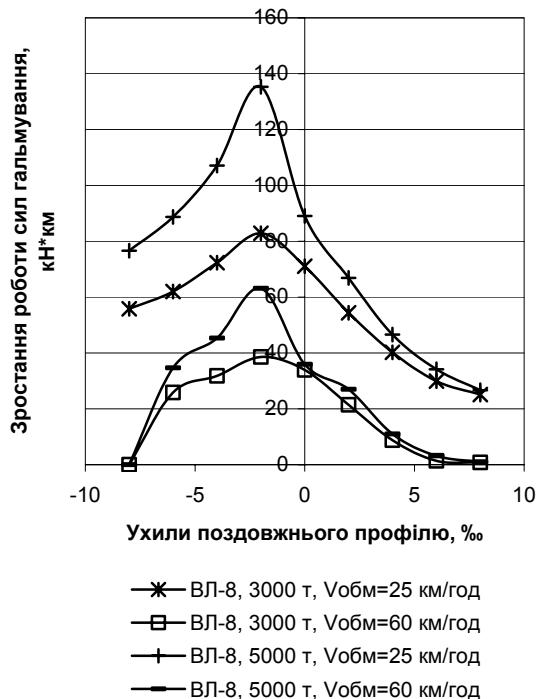


Рис. 5. Зростання сил гальмування при обкатці колії

На рис. 6 суцільною жирною лінією зображено витрати на динамічну стабілізацію колії відремонтованої ділянки, іншими лініями – додаткові витрати залізниці від дії обкатки за різної інтенсивності руху поїздів.

З попередніх графіків видно, що найбільші витрати залізниці будуть на ділянках з некрутими підйомами та спусками та інтенсивністю руху не менше 20 поїздів/добу. Так, на ділянці, якою проходить близько 50 поїздів за добу, витрати від дії обкатки колії у 2...3 рази перевищують вартість динамічної стабілізації, яка дозволяє після відкриття перегону реалізовувати швидкості 100 км/год.

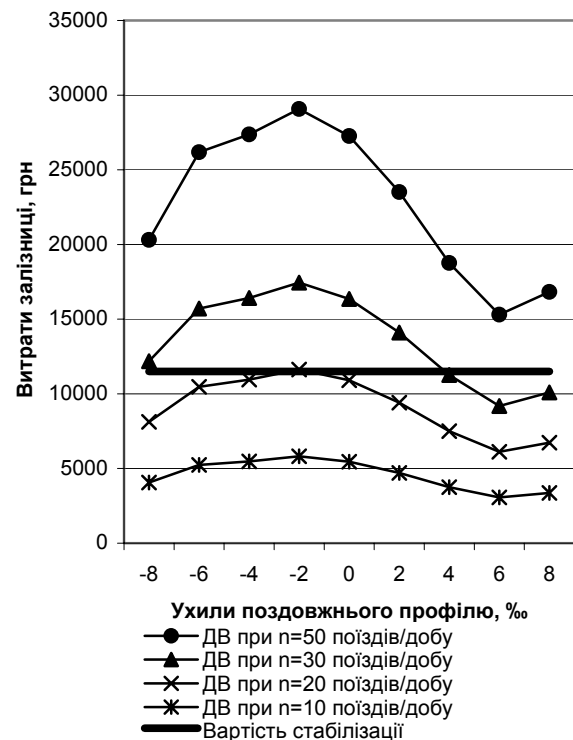


Рис. 6. Додаткові витрати залізниці від обкатки колії

Отримані результати доцільно застосовувати під час планування ремонтів залізничних колій на ділянках з різними умовами експлуатації та призначати динамічну стабілізацію, виходячи не лише з технічних, а й з економічних показників.

Результати

Дослідження щодо економічної ефективності застосування динамічних стабілізаторів, які виконувалися вченими останнім часом, не по-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

ширюються на порівняння вартості робіт зі стабілізації колії та втрат залізниці за період дії обкатки. Під час обкатки поїзди рухаються з обмеженою швидкістю, що викликає відповідні фінансові втрати. Обмеження швидкості призводить не лише до зростання часу руху, а в деяких випадках і до підвищеного споживання паливно-енергетичних ресурсів. А на ділянках гальмування та розгону безпосередньо перед та за ділянками обмеження спостерігається більш інтенсивне розладнання колії та зростання витрат на її поточне утримання. Розроблено методику щодо оцінки економічної ефективності застосування динамічних стабілізаторів після виконання ремонтів колії для ділянок залізниць України з різними умовами експлуатації. Ця методика містить розрахунок втрат залізниці, що зумовлені: додатковим часом руху, підвищеним споживанням паливно-енергетичних ресурсів та витратами на поточне утримання.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено методику оцінки економічної ефективності застосування динамічних стабілізаторів у післяремонтний термін. Запропонований підхід дозволяє отримувати раціональне рішення з урахуванням особливостей ділянок, на яких виконано ремонти колії.

Отримані результати дозволяють раціонально призначати роботи з динамічної стабілізації колії з урахуванням експлуатаційних характеристик ділянок залізниць та економічної доцільності виконання запланованих робіт.

Висновки

За результатами виконаного дослідження встановлено:

1. Застосування динамічних стабілізаторів дозволяє зменшувати сили взаємодії колії та рухомого складу, підвищувати стійкість колії та збільшувати міжремонтні інтервали до 30 %.

2. З економічної точки зору динамічна стабілізація найбільш ефективна на ділянках з інтенсивністю руху понад 20 поїздів/добу. Також суттєво впливають параметри поздовжнього профілю ділянки, що ремонтується. Найбільший економічний ефект зафіксований на некрутих підйомах та спусках (до 5 %), зі збільшенням ухилу ефект знижується.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Атаманюк, А. В. Обеспечение стабильности железнодорожного пути путевыми машинами после глубокой очистки балластного слоя / А. В. Атаманюк, Б. В. Волковойнов, М. В. Попович // Трансп. Российской Федерации. – 2008. – № 6. – С. 48–51.
2. Громова, Т. И. Окупаемость ремонтов пути / Т. И. Громова, В. О. Певзнер // Путь и путевое хоз-во. – 2000. – № 10. – С. 30–31.
3. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України : ЦП–0269 : від 22.12.2010, № 427–Ц. – К., 2011. – 450 с.
4. Курган, М. Б. Прогнозування втрат залізниць від дії обмежень швидкості руху поїздів / М. Б. Курган, О. С. Чернишова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 98–100.
5. Личтбергер, Б. Результаты применения динамического стабилизатора пути / Б. Личтбергер // Железные дороги мира. – 2002. – № 6. – С. 14–18.
6. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП–0113 : затв. наказом Укрзалізниці від 10.08.2004 р. № 630–ЦЗ. – К., 2004. – 32 с.
7. Правила приймання робіт після виконання модернізації і ремонтів колії та її облаштувань. № 737–ЦЗ. – К. : Укрзалізниця, 2006. – 53 с.
8. Рекомендации по технологии выполнения ремонта пути на длительно закрытом перегоне и по установлению скоростей движения поездов после завершения этих работ / М. И. Уманов, В. В. Цыганенко, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 17. – С. 116–122.
9. Рибкін, В. В. Моделирование руху частинок балластного шару залізничної колії за дії вібраційного навантаження на рейки / В. В. Рибкін, М. П. Сисін, О. С. Набоченко // Фізико-мех. моделювання та інформ. технології. – Л., 2009. – Вип. 10. – С. 113–122.
10. Скорости движения поездов после ремонта пути / М. И. Уманов, В. В. Цыганенко, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Путь и путевое хоз-во. – 2008. – № 6. – С. 14–15.
11. Чернишова, О. С. Підвищення ефективності заходів зі зменшення обмежень швидкості руху поїздів, зумовлених станом залізничної колії : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Чернишова Оксана Сергіївна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – 23 с.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

12. Bode, C. Three-dimensional time domain analysis of moving loads on railway tracks on layered soils / C. Bode, R. Hirschauer, S. A. Savidis. – Rotterdam : Balkema, 2000. – P. 3–12.
13. Knothe, K. Receptance behaviour of railway track and subgrade / K. Knothe, Y. Wu // Archive of applied mechanics. – 1998. – Vol. 68, № 7–8. – P. 457–470.
14. Lichtberger, B. Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit / B. Lichtberger. – Hamburg : Tetzlaff Verlag, 2003. – 318 p.
15. Popp, K. System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade / K. Popp, W. Schiehlen. – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2003. – 284 p.

О. С. ЧЕРНЫШОВА^{1*}, М. И. УМАНОВ², В. В. КОВАЛЕВ¹, Ю. С. МАРКОВ¹, А. В. ГУБАРЬ²

^{1*}Каф. «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел./факс +38 (056) 373 15 48, эл. почта okschernysh@mail.ru

²Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел./факс +38 (056) 373 15 42, эл. почта gubarav@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗАТОРОВ В ПОСЛЕРЕМОНТНЫЙ ПЕРИОД НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ

Цель. Проанализировать силы взаимодействия пути и подвижного состава при применении динамических стабилизаторов, а также определить участки, на которых стабилизация пути целесообразна не только по техническим показателям, но и по экономическим. **Методика.** Для достижения цели исследования использованы методы анализа материальных потоков, характерные для мест, которые нуждаются в применении динамических стабилизаторов на колеях железнодорожного транспорта. **Результаты.** Исследования относительно экономической эффективности применения динамических стабилизаторов, которые проводились учеными в последние годы, не распространяются на сравнение стоимости работ по стабилизации пути и потерь железной дороги за период действия обкатки. Во время обкатки поезда движутся с ограниченной скоростью, что вызывает соответствующие финансовые потери. Ограничение скорости приводит не только к увеличению времени движения, но и в некоторых случаях к повышенному потреблению топливно-энергетических ресурсов. А на участках торможения и разгона непосредственно перед и за участками ограничения наблюдается более интенсивная разладка пути и рост расходов на его текущее содержание. Разработана методика относительно оценки экономической эффективности применения динамических стабилизаторов после выполнения ремонтов пути для участков железных дорог Украины с разными условиями эксплуатации. Данная методика включает в себя расчет потерь железной дороги, которые обусловлены дополнительным временем движения, повышенным потреблением топливно-энергетических ресурсов и расходами на текущее содержание. **Научная новизна.** Разработана методика по оценке экономической эффективности применения динамических стабилизаторов в послеремонтный период. Предложенный подход позволит принимать рациональные решения с учетом особенностей участков, на которых были проведены ремонтные работы. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволят рационально назначать работы по динамической выправке пути с учетом эксплуатационных характеристик участков железных дорог и экономической целесообразности выполнения запланированных работ.

Ключевые слова: динамическая стабилизация пути; силы взаимодействия; эксплуатационные затраты; экономический эффект

O. S. CHERNYSHOVA^{1*}, M. I. UMANOV², V. V. KOVALEV¹, Y. S. MARKOV¹,
O. V. GUBAR²

^{1*}Dep. «Planning and Construction of Roads», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel./fax +38 (056) 373 15 48, e-mail okschernysh@mail.ru

²Dep. «Wagon and Wagon Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel./fax + 38 (056) 373 15 42, e-mail gubarav@mail.ru

USE EFFICIENCY OF DYNAMIC STABILIZER IN THE POST-REPAIR PERIOD OF RAILWAYS IN UKRAINE

Purpose. To analyze the interaction forces of the track and rolling stock at application of dynamic stabilizers, as well as the determination of the area, on which the track stabilization is necessary not only according to the technical indices but also according to the economic ones. **Methodology.** To achieve the research purpose the methods of analysis of material flows, peculiar to the places that need applications of dynamic stabilizers on railway transport tracks are used. **Findings.** Researches of relatively economic efficiency of dynamic stabilizers application, which were conducted by scientists during the last years, do not spread to comparison of cost of works on the track stabilizing and losses of railway for period of running. During the running period the trains move with a limited speed that causes corresponding financial losses. Speed limitation result in the both the motion time increase and in some occasions in the heavy consumption of fuel and energy resources. The more intensive track discord and expenses increase for its maintenance are observed in the sections of braking and acceleration immediately in front of and after the areas of limitation. The methodology relative to the estimation of economic efficiency of dynamic stabilizers application after completion of track repairs for the areas of Ukrainian railways with different operational conditions was developed. This methodology includes the losses calculation of railroad, which are predefined by extra motion time, heavy consumption of fuel and energy resources and charges for current maintenance. **Originality.** The methodology of cost effectiveness evaluating of the dynamic stabilizers application in the post-repair period was developed. Such an approach would allow one to take the rational decisions taking into account the features of the track sections, which were reconstructed. **Practical value.** The obtained results will rationally assign the works on the dynamic track alignment accounting the operational characteristics of the railway sections and the economic feasibility of the planned works completion.

Keywords: dynamic track stabilization; the interaction forces; operating costs; the economic effect

REFERENCES

1. Atamanyuk A.V., Volkovoyinov B.V., Popovich M.V. Obespecheniye stabilnosti zheleznodorozhnogo puti putevymi mashinami posle glubokoy ochestki ballastnogo sloya [Ensuring the stability of the railway track machines after deep cleaning of ballast]. *Transport Rossiyskoy Federatsii – Russian Federation Transport*, 2008, no. 6, pp. 48-51.
2. Gromova T.I., Pevzner V.O. Okupayemost remontov puti [Payback road repairs]. *Put i putevoye khozyaystvo – Road and track facilities*, 2000, no.10, pp. 30-31.
3. *Instruktsiia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy* [Operation and maintenance of track railways of Ukraine]. Kyiv, 2011. 450 p.
4. Kurgan M.B., Chernyshova O.S. Prohnozuvannia vtrat zaliznyts vid dii obmezhen shvydkosti rukhu poizdiv [Forecasting of losses to the railways from the restrictions in train speed]. *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. 98-100.
5. Lichtberger B. Rezultaty primeneniya dinamicheskogo stabilizatora puti [The results of the application of the dynamic stabilizer path]. *Zheleznyye dorogi mira – Railways of the world*, 2002, no. 6, pp. 14-18.
6. *Polozhennia pro provedennia planovo-zapobizhnykh remontno-koliinykh robiv na zaliznytsiakh Ukrainy* [Regulations on planned preventive repairs and track works on the railways of Ukraine]. Kyiv, 2004. 32 p.
7. *Pravyla pryimannia robiv pislia vykonannia modernizatsii i remontiv kolii ta yii oblashtuvan* [Acceptance of work after the upgrade and repair track and its equipment]. Kyiv, Ukrzaliznitsya Publ., 2006. 53 p.
8. Umanov M.I., Tsyganenko V.V., Reydeymeyster A.G., Khalipova N.V. Rekomendatsii po tekhnologii vypolneniya remonta puti na dlitelno zakrytom peregone i po ustanovleniyu skorostey dvizheniya poyezdov posle zaversheniya etikh robot [Recommendations for technology repairs the way to a long-closed railway haul

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- and setting train speeds after the completion of this work]. *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 17, pp. 116-122.
9. Rybkin V.V., Sisin M.P., Nabochenko O.S. Modeliuvannia rukhu chastynok balastnoho sharu zaliznychnoi kolii za dii vibratsiinoho navantazhennia na reiky [Modeling of particle motion railway track ballast layer under the action of vibration load on the rails]. *Fizyko-mekhanichne modeliuvannia ta informatsiini tekhnolohii* [Physics and mechanical modeling and information technologies], 2009, issue 10, pp.113-122.
 10. Umanov M.I., Tsyganenko V.V., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. Skorosti dvizheniya poyezdov posle remonta puti [Train speeds after the repair paths]. *Put i putevoye khozyaystvo – Road and track facilities*, 2008, no. 6, pp. 14-15.
 11. Chernyshova O.S. *Pidvyshchennia efektyvnosti zakhodiv zi zmenshennia obmezhen shvydkosti rukhu poizdiv, zumovlenykh stanom zaliznychnoi kolii*. Avtoreferat Diss. [The increase of the measures efficiency on the reduction of train speed limits determined by the railway track condition. Author's abstract]. Dnipropetrovsk, 2010. 23 p.
 12. Bode C., Hirschauer R., Savidis S.A. Three-dimensional time domain analysis of moving loads on railway tracks on layered soils. Rotterdam, Balkema Publ., 2000, pp. 3-12.
 13. Knothe K., Wu Y. Receptance behaviour of railway track and subgrade. *Archive of applied mechanics*, 1998, vol. 68, no. 7-8, pp. 457-470.
 14. Lichtberger B. Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. Hamburg, Tetzlaff Verlag Publ., 2003. 318 p.
 15. Popp K., Schiehlen W. System Dynamics and Long-Term Behavior of Railway Vehicles, Track and Subgrade. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag Publ., 2003. 284 p.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Д. В. Лаухіним (Україна);
д.т.н., проф. В. Д. Петренком (Україна)*

Надійшла до редколегії 21.05.2013

Прийнята до друку 07.08.2013

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 669.715:656

I. A. VAKULENKO^{1*}, YU. L. NADEZH DIN¹, V. A. SOKIRKO², I. P. VOLCHOK³,
A. A. MITIAEV³

^{1*}Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2,
49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnyzt_texmat@ukr.net

²LTD «DS», Bolshaya Morskaya Str., 63, 54001, Nikolaev, Ukraine, tel. +38 (0512) 41 52 07, e-mail ds@mksat.net

³Dep. «Materials Technology», Zaporizhzhya National Technical University, Zhukovskiy Str., 64, 69063, Zaporizhzhya,
Ukraine, tel. +38 (061) 769 82 71, e-mail volchok@zntu.edu.ua

³Dep. «Materials Technology», Zaporizhzhya National Technical University, Zhukovskiy Str., 64, 69063, Zaporizhzhya,
Ukraine, tel. +38 (061) 769 82 71, e-mail mityaev@zntu.edu.ua

ELECTRIC PULSE TREATMENT OF WELDED JOINT OF ALUMINUM ALLOY

Purpose. Explanation of the redistribution effect of residual strengthes after electric pulse treatment of arc weld-
ing seam of the aluminum alloy. **Methodology.** Alloy on the basis of aluminium of AK8M3 type served as the re-
search material. As a result of mechanical treatment of the ingots after alloy crystallization the plates with
10 mm thickness were obtained. After edge preparation the elements, which are being connected were butt welded
using the technology of semiautomatic argon arc welding by the electrode with a diameter of 3 mm of AK-5 alloy.
Metal structure of the welded joint was examined under the light microscope at a magnification of 200 and under the
scanning electronic microscope «JSM-6360 LA». The Rockwell hardness (HRF) was used as a strength characteris-
tic of alloy. Hardness measuring of the phase constituents (microhardness) was carried out using the device PMT-3,
with the indenter loadings 5 and 10 g. The crystalline structure parameters of alloy (dislocation density, second kind
of the crystalline lattice distortion and the scale of coherent scattering regions) were determined using the methods
of X-ray structural analysis. Electric pulse treatment (ET) was carried out on the special equipment in the conditions
of the DS enterprise using two modes A and B. **Findings.** On the basis of researches the previously obtained micro-
hardness redistribution effect in the area of welded connection after ET was confirmed. As a result of use of the in-
dicated treatment it was determined not only the reduction of microhardness gradient but also the simultaneous
hardening effect in the certain thermal affected areas near the welding seam. During study of chemical composition
of phase constituents it was discovered, that the structural changes of alloy as a result of ET first of all are caused by
the redistribution of chemical elements, which form the connections themselves. By the nature of the influence the
indicated treatment can be comparable with the thermal softening technologies of metallic materials. **Originality.**
The observed structural changes of alloy and related to them microhardness change in the areas near the welding
seam after ET are conditioned by both the change of morphology of structural constituents and the redistribution of
chemical elements. In case of invariability of chemical elements correlation in the phase constituents of alloy the
reduction effect of gradient microhardness should be far less. **Practical value.** In practice, the negative effect of the
wares embrittlement made using the casting technologies, excluding the pressure casting and quite difficult selection
of chemical composition of alloy can be significantly reduced during the treatment of alloy with electric pulses.

Keywords: hardness; phase; chemical compound; silumin; welding seam

Introduction

The welded joints formation using the technology of melting is accompanied by significant changes in the metal internal structure of the edges, which are being joined. Proportional to the temperature of heating and depending on the cooling conditions the processes of structural transformations develop in the metal of pool and heat affected zone. These transformations have an unchanging influence on the property package of the welded joint. Moreover, the observed structural changes are in fact resulted from the simultaneous influence of several factors, notably the processes of diffusion mass transfer and redistribution of internal stresses of different origin [7]. The residual stress diagram after the welded joint forming might be of such form that the summing of one sign of residual stresses and the stresses from exploitation of constructions [11, 12]. In this case, the unavoidable exceed of computed values from actual stresses will lead to the breach of the guaranteed conditions of trouble-free service for the welded joint. On this basis, the development of measures to reduce the value and gradient of residual stresses in the welded joint is quite an urgent problem of modernity [3, 13].

Except the thermal and mechanical ways to decrease the residual stresses, such as a reversible deformation [1, 2], the use athermal technologies is of some interest too. The technologies based on the use of strong magnetic and electric fields should be included to these treatments [5].

Purpose

Work purpose is the explanation of redistribution effect of residual stresses after electric pulse treatment of the silumin arc welded seam.

Methodology

An alloy on the basis of aluminium of AK8M3 type served as the research material. 10 mm thick plates were obtained as a result of the ingot mechanical treatment after alloy crystallization. After the edge preparation the elements, which are being connected were butt welded using the technology of semiautomatic argon arc welding by the electrode with 3 mm diameter of AK-5 alloy. Metal structure of the welded joint was examined under the light microscope at a magnification of 200 and under the scanning electronic microscope

«JSM-6360 LA». [6]. The Rockwell hardness (HRF) was used as a strength characteristic of alloy. Indenter is a ball of 1.58 mm diameter with the loading of 60 kg (State Standard 9013). Hardness measuring of the phase constituents (microhardness) was carried out using the device PMT-3, with the indenter loadings 5 and 10 g. The crystalline structure parameters of alloy (dislocation density, disturbance of the crystalline lattice and the scale of coherent scattering regions) were determined using the methods of X-ray structural analysis [4]. The electric pulse treatment (ET) was carried out on the special equipment in conditions of the DS enterprise. The electric current density was 14 and $16 \frac{A}{mm^2}$, respectively modes A and B.

Findings

Taking into account the existence of qualitatively different structural condition of the metal after the arc welded joint formation the studies were carried out for two superheated areas (by two sides from the welding pool, marked I and III, respectively) and for the volume of the pool itself (II). After averaging of four - five values the alloy hardness after welding without ET was 62 and 61 for I and III regions respectively, when for the II region (weldin pool region) – 46.

The microstructural studies showed that the alloy represents a multiphase composition consisting of a matrix in the form of a solid solution, and the second-phase particles (Fig. 1). The metal of welded joint has a structure of as-cast condition, with almost the same dispersion (Fig. 2). As it is shown above the volumes of alloy have multiphase structure. Second-phase particles, which are similar in form to the plates, have an non regular distribution in the metal matrix.

Micro-hardness measurements of the alloy structural components showed quite significant difference in the absolute values. For the second phase particles, depending on the distance of tested alloy volume from the welding pool, the micro-hardness exceed as compared to the matrix has reached from ten to a few times.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

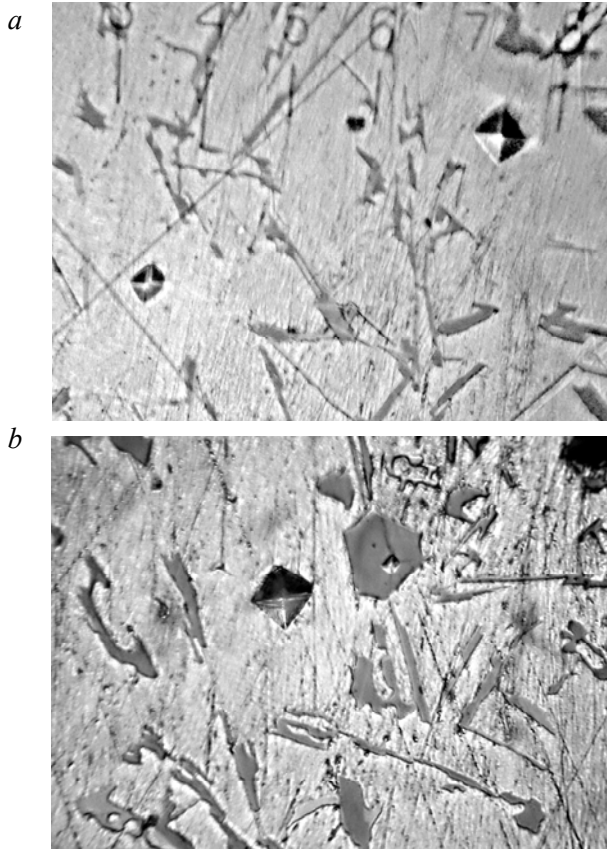


Fig. 1. Edge structure of the AK8M3 alloy after the welded joint formation at a distance 3 mm (a) and 6 mm (b) from the melting boundary. Magnification 200

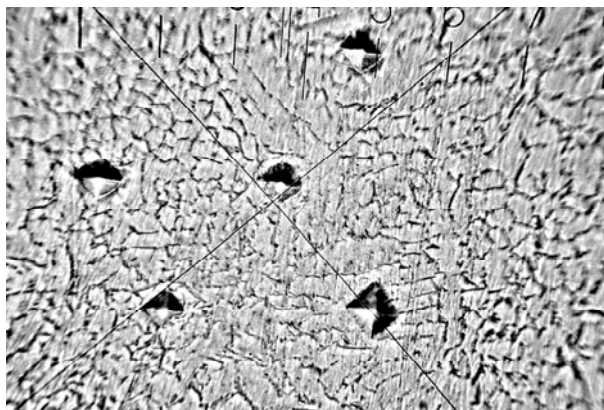


Fig. 2. The structure of the welding pool metal. Magnification 200

For the alloy without electrical pulse treatment, the parameters change of alloy crystalline structure showed qualitative correspondence with the nature of strength characteristics change, which is typical for the majority of metallic materials [1, 2]. Dislo-

cation density increase (ρ) and distortions of the second kind (μ) during the coherent scattering regions decrease (L) is accompanied by quite natural hardness increase about 25–27%.

After ET irrespective of its mode a progressive softening of alloy in the heat affected zone was observed.

The intensity increase of the electrical pulse treatment was accompanied by the decrease of hardness characteristics as compared to the original (without ET), for the regions I and III by 11% after the A mode and 15% decrease after the B mode. For metal volume of the welding pool the situation is somewhat different. Initially the hardness measurements showed increase in hardness from 46 (without ET) up to 56 for A mode and 48 for B mode. The observed effect of changing the hardness of the metal weld pool can be seen as evidence of structural changes in the electric pulse treatment in cast metal, and for heat-affected zone [3, 12]. Moreover, the welding pool metal having a different phase composition [9] with a simultaneous change of aggregative state (during the welding) as a whole leads to the qualitative change in the nature of hardness change. On the other hand, the metal of heat-affected zone having a multi phase structure may be subjected to the phase hardening to a greater extent as a result of the thermal stresses during the welding joint formation.

The experimental data analysis confirmed the existence of qualitatively different nature of relationship between the metal hardness, ρ and L for the alloy subjected to ET (Fig. 3). So, regardless of the research areas I, II or III, the hardness increase is accompanied by the decrease in defect number of crystal structure and coarsening of coherent scattering regions. In other words, for the vast majority of steels and alloys the nature of these relationships ($HRF \sim f(\rho, L)$) should correspond to the development of softening process, not strengthening. At the same time, it is unclear due to what effects the nature of $HRF \sim f(\mu)$ relation remained corresponding to the hardening.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

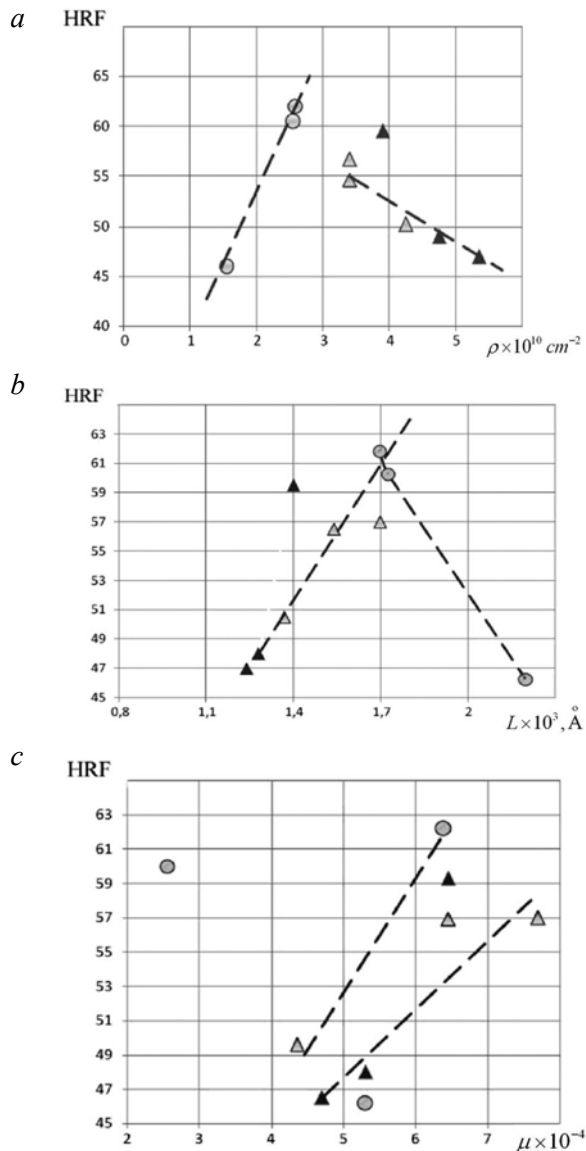


Fig. 3. Parameter influence of the crystalline structure of AK8M3 alloy on its hardness (dislocation density according to interference (111) – (a), the size of coherent scattering regions – (b) and the distortion of the second kind – (c). Sign: \odot – without ET, Δ – after ET, mode A, \blacktriangle – after ET mode B

On the basis of studies the previously obtained softening effect of aluminum alloy welding joint as a result of electrical pulse treatment was confirmed [5]. Explanation of the observed phenomena on the basis of study of the crystalline structure characteristics only did not uniquely determine the main influence factors. It is hoped that the use of scanning electron microscopy would give the opportunity to get more information on the observed softening effect. Moreover, the qualitative changes of

the relation nature between the hardness and the parameters of crystalline structure after the ET shown on the Fig. 3 may be associated with the changes of alloy phase composition. In case the observed relations of crystalline structure and hardness of alloy will be associated with the redistribution of chemical elements forming the phase components of the alloy, the processes of diffusion mass transfer should explain the effects nature in the ET.

The microhardness distribution in the aluminum matrix (H_μ) depending on the distance from the welding pool is shown on the Fig. 4. The extreme nature of dependency indicates a rather complex distribution of residual internal stresses.

Subjecting the heat-affected zone of alloy after the welding joint formation to the electric pulse treatment the nature change of microhardness distribution is detected.

The analysis of the dependencies indicates the existence of qualitative differences, especially for the superheated area of alloy. Moreover, based on the comparative analysis of absolute values of the alloy matrix hardness (α – solid solution Si in Al), as a result of ET a decrease in hardness difference (approximately 10% from the minimum to maximal values) is achieved. Something like that by the nature of its manifestation is noted for the areas of the second phases (Fig. 5).

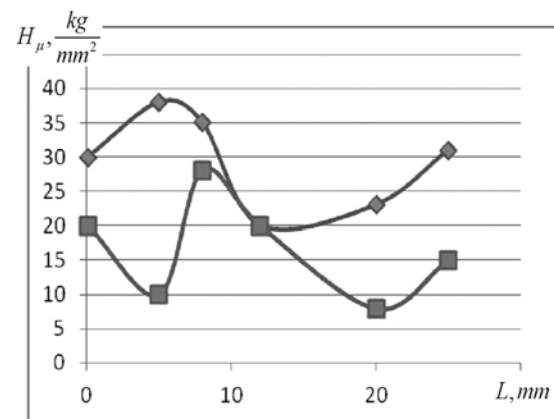


Fig. 4. The microhardness change of AK8M3 alloy matrix depending on the distance from the welding pool (\square – after the welding, \diamond – after the welding and electrical pulse treatment, mode B)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

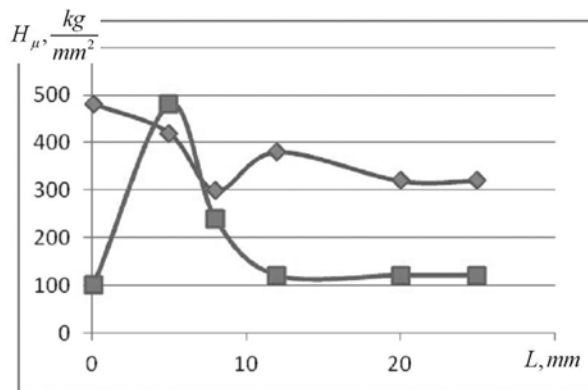


Fig. 5. The microhardness change of the sections of chemical compounds of AK8M3 alloy depending on the distance from the welding pool (the signs are the same as in Figure 4)

Comparative analysis of the absolute values of chemical compounds hardness shows that as a result of ET the reduction of hardness difference is also achieved. Although this reduction is more significant: before ET the hardness difference was 75%, and after that – approximately half as large (36%).

The experimental data analysis of microhardness distribution indicates that as a result of ET use of arc welding joint it is detected not only the gradient microhardness decrease, but the simultaneous reinforcing effect. Indeed, on the basis of the dependencies shown on Figures 4 and 5, for both the matrix and the chemical compounds for the full range of distances (from the welding pool) a quite unambiguous hardness increase is observed.

The results of studies of the alloy structure using the scanning electron microscopy are presented on Fig. 6 and 7. The structure of heat-affected zone section of the welded joint, which corresponds to the alloy superheated area, is shown on the Fig. 6.

As compared to the microstructure observed under a microscope PMT-3 (Fig. 1 and 2) when it can only be classified as a two-phase, the electron microscopy indicates the existence of at least more two chemical compounds and two solid solutions. The obtained results of the study are in good agreement with well known published data [9, 10, 12]. Despite this, the shown dependencies of change H_{μ} for the solid solution areas and sections of chemical compounds before and after ET (Fig. 4 and 5) still represent a particular scientific interest.

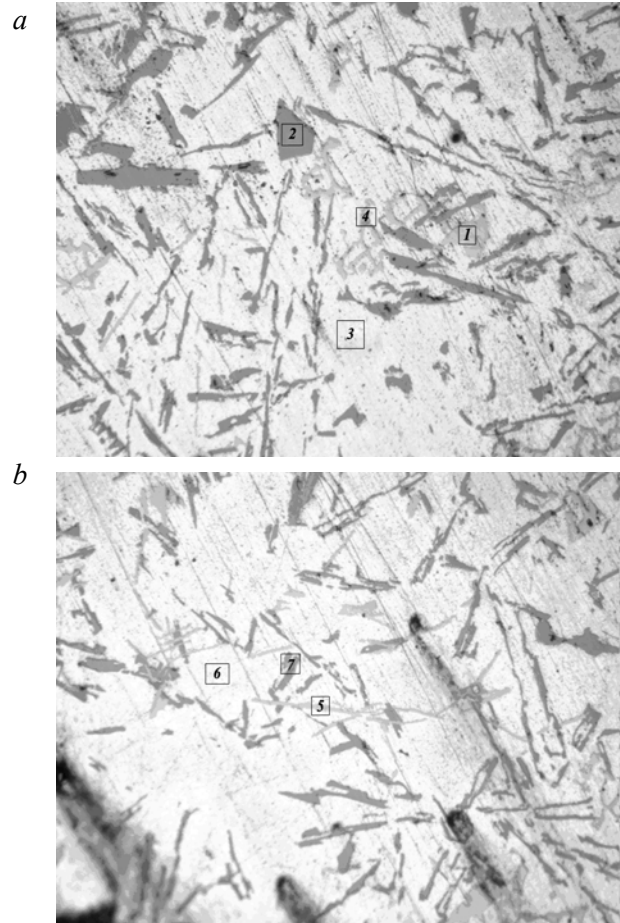


Fig. 6. Different phases (a) and (b) AK8M3 alloy microstructure after the welded joint formation. Numerals indicate the locations determining the alloy phase composition using the raster scanning electron microscope «JSM-6360 LA»

(1, 4 – particles of a chemical compound $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$; 5 – Al_5FeSi ; 2, 7 – solid solution; 3, 6 – solid solution Si in Al)

This is caused by the fact that actually the represented dependencies are the result of the hardness values averaging according to the two solid solutions and some (although they are different) chemical compounds.

The microstructure studies revealed that according to the characteristic features of the alloy structure before and after the welded joint formation are practically the same that corresponds to the metal condition after casting.

The observed minor differences have more to do with segregation phenomena of chemical elements during the alloy manufacturing and its crystallization.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

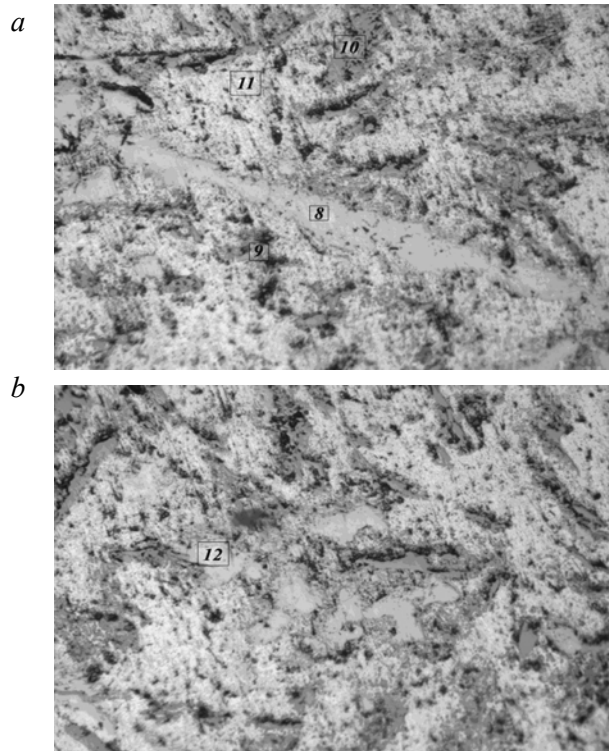


Fig. 7. Different phases (a) and (b) AK8M3 alloy microstructure after the welded joint formation and following ET. Numerals indicate the locations determining the alloy phase composition using the raster scanning electron microscope «JSM-6360 LA» (8 – Al_5FeSi ; 9 – Al_2Cu ; 10 – a solid solution Al in Si ; 11 – solid solution Si in Al ; 12 – particles of chemical compound $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$)

After ET of the alloy welded joint the developed processes of structural transformations have led not only to the changes of the structural component dispersion, but also to the changes of their distribution in the matrix (Fig. 7). Thus, the comparative analysis points to a qualitatively different structural condition of the alloy after ET. Indeed, in case the as-welded alloy has obvious signs of cast condition, then after ET these signs are almost absent. In the majority of cases the phase components are presented in the form of globular particles (mark 9) or areas with definite length, marks 8, 12, Fig. 7.

When studying the chemical composition of the phase components, it was found out that the observed structural changes of alloy as a result of ET first of all may be caused by the redistribution of chemical elements, which form the compounds themselves. Something similar was observed dur-

ing the variation of silumin chemical composition [3, 12], the use of special modifiers [9, 13] or by changing the crystallization conditions [1]. Indeed, studies have shown that the relation of chemical elements that are involved in the formation of certain compounds changes after ET. On this basis, these chemical compounds in most part should be referred to the compositions of «berthollides» type. Moreover, if the chemical compounds, which are being formed, were referred to the «daltonides», i.e. to the compounds with the fixed chemical composition, the effect of the microhardness gradient lowering should be less significant.

The microhardness nature of the phase components confirms the above mentioned. If we consider the microhardness change of the alloy matrix (Fig. 4), then it is safe to assume that as a result of ET the slight hardness increase as a whole should not be accompanied by changes of solid solutions concentration. The micro spectral analysis data of solid solutions of the alloy matrix confirmed their practical constancy. Indeed, α – a solid solution (Si in Al), which consisted of 96% Al , 1.5% Si and 2.5% Cu after ET remained almost the same: 96% Al , approximately 1% Si and 3.0% Cu . The same can be said of β in the solid solution (Al in Si). Before ET its composition was: 3.0% Al and 97% Si , elsewhere 10% Al and 90% Si , which indicates the substantial liquation of the chemical elements in solid solutions. After ET the following relation of chemical elements was found out: 6.0% Al and 94% Si . Concentration averaging of elements in the solid solutions alloy matrix shows almost unchanged relation before and after ET. Consequently, as a result of ET the relation of chemical elements in the alloy matrix (α – solid solution), and in the sections of β solution after termination of electrical pulses remains almost unchanged. In this case the observed changes during ET, should be more fully explained by structural changes, such as changes in grain size and shape, concentration and distribution of dislocations, coherent scattering regions that in fact is confirmed by the results of X-ray analysis. (Fig. 3). During the behavior analysis of the chemical compounds the nature of changes is much more difficult. The analysis of such chemical compound as Al_5FeSi has shown the constancy of elements relation, both before and after the ET with a sufficiently high

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

accuracy. Before treatment the compound included 60% *Al*, 16% *Si* and 24% *Fe*, and after treatment 60% *Al*, 17% *Si* and the same 23% of *Fe*.

Another chemical compound, such as $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ showed the relation change of the certain elements only. Indeed, if before ET the phase consisted of 52% *Al*, 12% *Si*, 18% *Fe* and 18% *Mn*, then after the electric pulse treatment, it was depleted by 6% *Al* and 1.5% *Si*. The concentrations of *Fe* and *Mn* remained unchanged (18%). Moreover, within the chemical compound $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ in addition about 7% *Cu* was found. Unexpected results should also include the appearance (after ET) of the new chemical compound Al_2Cu (50% *Al*, 2% *Si* and up to 48% *Cu*).

Taking into account the relatively high sensitivity of aluminum alloys to the presence of iron in their composition that reduces the plastic characteristics supply the reduction of the negative influence of *Fe* is an important technological problem. This effect is caused by the formation in the system *Al–Si–Fe* of brittle eutectic in the form of the plates (Al_3FeSi – mark 5, Fig. 7 *b*, or more complex compositions: $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ – marks 1, 4, Fig. 7 *a*). On these plates the crack is quite easy to develop. In practice, one reduces the embrittlement effect by the change of casting technology, using the injection casting and chill casting, or changing the chemical composition of the alloy [8]. Indeed, the harmful iron influence can be reduced by the manganese or chromium introduction [9, 10]. On the basis of data of the work [12], the complexity of these phases results in the change of their morphology: the form of plate is replaced by the skeletal form. In this case, the eutectic components location at the grain boundaries of the alloy matrix results in the deviation from the strict plate form. As a result, a decrease of the embrittlement effect is observed. And even higher level of plastic characteristics is observed for globular structures. In this case, the plasticity increase can reach the level of 3%.

The results indicate quite significant influence of electrical pulse treatment on both the morphology of alloy structural components and the relation of chemical elements involved in the formation of certain phases. Indeed, if after the welding (in the heat affected zone) the alloy had the majority of

the signs of the cast condition with characteristic plate forms of the eutectic components (Fig. 6), the use of ET has led to the quite significant qualitative changes in the internal structure. The globular structures formation (Fig. 7) indicates a high degree of ET influence on the development of structural change processes. In some cases the above mentioned treatment can even compete with the thermal technologies. On this basis, the effect of gradient microhardness reduction (gradient of internal stresses) in the heat-affected zone during the welded joint formation is actually quite clearly explained by structural changes.

Originality and Practical Value

The observed silumin structural changes and the microhardness change in the heat-affected zone of the welded joint after ET related to them are caused by not only the change of the structural components morphology, but also by the redistribution of chemical elements that form the compounds themselves. In case of stability of the chemical element relation in the alloy phase components, the effect of gradient microhardness lowering should be less significant.

In practice, the negative embrittlement effect of products made according to casting technologies except the injection casting and quite complex selection of the alloy chemical composition can be efficiently reduced during the electric pulse treatment of alloy.

Conclusions

1. After the electric pulse treatment of the welded joint, the silumin hardness increase is accompanied by the decrease in the number of crystal structure defects and coarsening of coherent scattering regions. The observed behavior of these relations corresponds to the development of softening processes in metallic materials.

2. As a result of silumin ET the change of phase composition, form and dispersion of the structural components was found out.

3. The development of the redistribution processes of chemical elements during the electric pulse treatment is accompanied by the morphology changes and the structural components distribution, the appearance of additional chemical compounds.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бабич, В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д. : Маковецкий, 2008. – 196 с.
3. Волчок, И. П. Применение вторичных алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении / И. П. Волчок, О. В. Лютова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 14. – С. 225–227.
4. Гинье, А. Рентгенография кристаллов / А. Гинье. – М. : ГИФМЛ, 1961. – 604 с.
5. Изменение механических свойств сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей под влиянием электромагнитных воздействий / А. К. Царюк, В. Ю. Скульский, С. И. Моравский, В. А. Сокирко // Автоматическая сварка. – 2008. – № 9. – С. 28–32.
6. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский, Ю. С. Скаков, А. Н. Иванов, Л. Н. Расторгуев. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.
7. Мондольфо, Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо. – М. : Металлургия, 1979. – 640 с.
8. Пат. 57584А Україна, МКВ C22C1/06. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Мітяєв О. А. (Україна); заявник і патентовласник Запорізький нац. техн. ун-т. – № 2002108343; заявл. 22.10.2002; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6. – 4 с.
9. Скуйбіда, О. Л. Підвищення механічних властивостей вторинного силуміну АК5М2 / О. Л. Скуйбіда, І. П. Волчок // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 215–218.
10. Скуйбіда, О. Л. Підвищення якості алюмінієвих сплавів за рахунок модифікування / О. Л. Скуйбіда, І. П. Волчок // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 235–237.
11. Lohwasser, D. Thin Section Airframe Alloy Welding within WAFS / D. Lohwasser // International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials «Materials Science Forum». – Madrid, 2003. – P. 2879–2884.
12. Lyutova, O. V. Increase of foundry properties of secondary silumins / O.V. Lyutova, I. P. Volchok // Archives of foundry engineering. – 2008. – Vol. 8. – P. 89–91.
13. Sato, Y. Distribution of Tensile Property and Microstructure in Friction Stir Weld of 6063 Aluminum / Y. Sato, H. Kokawa // Metallurgical Material Transaction. – 2001. – Vol. 32. – P. 3023–3031.

І. О. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. НАДЕЖДИН¹, В. А. СОКИРКО², І. П. ВОЛЧОК³,
О. А. МІТЯЄВ³

^{1*}Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnyzt_textmat@ukr.net

²ТОВ «DS», вул. Велика Морська, 63, 54001, Миколаїв, Україна, тел. +38 (0512) 41 52 07, ел. пошта ds@mksat.net

³Каф. «Технологія матеріалів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769 82 71, ел. пошта volchok@zntu.edu.ua

³Каф. «Технологія матеріалів», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769 82 71, ел. пошта mityaev@zntu.edu.ua

ЕЛЕКТРИЧНА ІМПУЛЬСНА ОБРОБКА ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Мета. Пояснення ефекту перерозподілу залишкових напружень після електричної імпульсної обробки електродугового зварного шва алюмінієвого сплаву. **Методика.** Матеріалом для дослідження був сплав на основі алюмінію типу АК8МЗ. Пластини товщиною 10 мм отримували в результаті механічної обробки злитків після кристалізації сплаву. Після підготовки кромки з'єднувані елементи були зварені в стик за технологією напівавтоматичного аргонно-дугового зварювання електродом діаметром 3 мм зі сплаву АК-5. Структуру металу зварного з'єднання досліджували під світловим мікроскопом при збільшенні 200 і за допомогою растрового скануючого електронного мікроскопа «JSM – 6360 LA». Як характеристика міцності сплаву була використана твердість за Роквеллом (HRF). Твердість фазових складових (мікротвердість) вимірювали, використовуючи прилад ПМТ-3, при навантаженнях на індентор 5 і 10 г. Параметри тонкої кристалічної будови сплаву (густина дислокацій, викривлення другого роду кристалічних ґрат і розмір областей когерентного розсіювання) визначали із застосуванням методик рентгеноструктурного аналізу. Елек-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

тричну імпульсну обробку (ЕО) здійснювали на спеціальному устаткуванні в умовах підприємства «DS», за двома режимами – А і В. **Результати.** На основі виконаних досліджень був підтверджений раніше отриманий ефект перерозподілу мікротвердості в області зварного з'єднання після ЕО. У результаті використання зазначеної обробки було визначено не тільки зменшення градієнта мікротвердості, а й одночасний зміцнювальний ефект у певних зонах термічного впливу поблизу шва. Під час досліджень хімічного складу фазових складових було визначено, що структурні зміни сплаву в результаті ЕО в першу чергу зумовлені перерозподілом хімічних елементів, що утворюють самі з'єднання. За характером впливу зазначену обробку можна порівняти з термічними технологіями пом'якшення металевих матеріалів. **Наукова новизна.** Структурні зміни силуміну, що спостерігаються, і пов'язана з ними зміна мікротвердості в області зварного з'єднання поблизу шва після ЕО зумовлені не тільки зміною морфології структурних складових, а й перерозподілом хімічних елементів. У разі незмінності співвідношення хімічних елементів у фазових складових сплаву ефект зниження градієнта мікротвердості повинен бути значно меншим. **Практична значимість.** На практиці негативний ефект окрихнення виробів, виготовлених за ливарними технологіями, окрім лиття під тиском і досить складного підбору хімічного складу сплаву, може бути ефективно зниженим під час обробки сплаву електричними імпульсами.

Ключові слова: твердість; фаза; хімічна сполука; силумін; зварний шов

И. А. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Ю. Л. НАДЕЖДИН¹, В. А. СОКИРКО², И. П. ВОЛЧОК³,
А. А. МИТЯЕВ³

^{1*}Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта dnyzt_textmat@ukr.net

²ООО «DS», ул. Большая Морская, 63, 54001, Николаев, Украина, тел. +38 (0512) 41 52 07, эл. почта ds@mkstat.net

³Каф. «Технология материалов», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769 82 71, эл. почта volchok@zntu.edu.ua

³Каф. «Технология материалов», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769 82 71, эл. почта mityaev@zntu.edu.ua

ЕЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА СВАРОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Цель. Объяснение эффекта перераспределения остаточных напряжений после электрической импульсной обработки электродугового сварочного шва алюминиевого сплава. **Методика.** Материалом для исследования служил сплав на основе алюминия типа АК8МЗ. Пластины толщиной 10 мм получали в результате механической обработки слитков после кристаллизации сплава. После подготовки кромок соединяемые элементы были сварены в стык по технологии полуавтоматической аргоно-дуговой сварки электродом диаметром 3 мм из сплава АК-5. Структуру металла сварочного соединения исследовали под световым микроскопом при увеличении 200 и при помощи растрового сканирующего электронного микроскопа «JSM-6360 LA». В качестве прочностной характеристики сплава использовалась твердость по Роквеллу (HRF). Измерения твердости фазовых составляющих (микротвердость) осуществляли с применением прибора ПМТ-3 при нагрузках на индентор 5 и 10 г. Параметры тонкокристаллического строения металла сплава (плотность дислокаций, искажения второго рода кристаллической решетки и размер областей когерентного рассеивания) определяли с использованием методик рентгеноструктурного анализа. Электрическую импульсную обработку (ЭО) осуществляли на специальном оборудовании в условиях предприятия «DS» по двум режимам – А и В. **Результаты.** На основании проведенных исследований был подтвержден ранее полученный эффект перераспределения микротвердости в области сварочного соединения после ЭО. В результате использования указанной обработки обнаруживается не только уменьшение градиента микротвердости, но и одновременный упрочняющий эффект в определенных околошовных зонах термического влияния. При изучении химического состава фазовых составляющих было обнаружено, что наблюдаемые структурные изменения сплава в результате ЭО в первую очередь обусловлены перераспределением химических элементов, образующих сами соединения. По характеру влияния указанная обработка может быть сравнима с термическими технологиями разупрочнения металлических материалов. **Научная новизна.** Наблюдаемые структурные изменения силумина и связанное с ними изменение микротвердости в околошовной области сварочного соединения после ЭО обусловлены не только сменой морфологии структурных составляющих, но и перераспределением химических элементов, образующих сами соединения. В случае неизменности соотношения химических элементов в фазовых составляющих

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

сплава эффект снижения градиента микротвердости должен быть менее значительным. **Практическая значимость.** На практике негативный эффект охрупчивания изделий, изготовленных по литейным технологиям, кроме литья под давлением и достаточно сложного подбора химического состава сплава, может быть эффективно снижен при обработке сплава электрическими импульсами.

Ключевые слова: твердость; фаза; химическое соединение; силумин; сварочный шов

REFERENCES

1. Babich V.K., Gul Yu.P., Dolzhenkov I.Ye. *Deformatsionnoye starenie stali* [Strain aging of the steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. – 320 p.
2. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [Structure morphology and strain hardening steel]. Dnepropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2008. 196 p.
3. Volchok I.P., Lyutova O.V. *Primeneniye vtorichnykh alyuminiyevykh splavov v transportnom mashinostroyenii* [Use of the secondary aluminum alloys in the transport machine building]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 14, pp. 225–227.
4. Ginye A. *Rentgenografiya kristallov* [X-ray imaging of crystals]. Moscow, GIFMA Publ., 1961. 604 p.
5. Tsaryuk A.K., Skulskiy V.Yu., Moravskiy S.I., Sokirko V.A. *Izmeneniye mekhanicheskikh svoystv svarnykh soyedineniy ugleistykh i nizkolegirovannykh staley pod vliyaniyem elektromagnitnykh vozdeystviy* [Weld joints property change of the carbon and low-alloyed steels under the influence of electromagnetic effect]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding*, 2008, no. 9, pp. 28–32.
6. Umanskiy Ya.S., Skakov Yu.S., Ivanov A.N., Rastorguyev L.N. *Kristallografiya, rentgenografiya i elektronaya mikroskopiya* [Crystallography, X-ray imaging and electronic microscopy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 632 p.
7. Mondolfo L.F. *Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov* [Structure and properties of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 640 p.
8. Volchok I.P., Mitiaev O.A. *Modyfikator dlia aliuminiyevykh splaviv* [Modifier for aluminum alloys]. Patent UA, no. 2002108343, 2002. 4 p.
9. Skuibida O.L., Volchok I.P. *Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei vtorynnoho syluminu AK5M2* [Mechanical properties improvement of the secondary silumin AK5M2]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 215–218.
10. Skuibida O.L., Volchok I.P. *Pidvyshchennia yakosti aliuminiyevykh splaviv za rakhunok modyfikuvannia* [Improving the quality of aluminum alloys by modifying]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 235–237.
11. Lohwasser D. Thin Section Airframe Alloy Welding within WAFS. International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials “Materials Science Forum”. Madrid, 2003, pp. 2879–2884.
12. Lyutova O.V., Volchok I.P. Increase of foundry properties of secondary silumins. *Archives of foundry engineering*, 2008, vol. 8, pp. 89–91.
13. Sato Y., Kokawa H. Distribution of Tensile Property and Microstructure in Friction Stir Weld of 6063 Aluminum. *Metallurgical Material Transaction*, 2001, vol. 32, pp. 3023–3031.

PhD (Techn. Sc.), Ass. Prof. S. V. Proydak (Ukraine); PhD (Techn. Sc.), Ass. Prof. O. A. Chaykovskiy (Ukraine) recommended this article to be published

Received May 21, 2013

Accepted Jul. 24, 2013

УДК 629.45|.46.02:539.3

А. Я. КУЛІЧЕНКО¹, М. О. КУЗІН^{1*}, Л. І. ВАКУЛЕНКО²¹Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, 79052, Львів, Україна, тел. +38 (093) 741 51 27, ел. пошта kulan47@mail.ru^{1*}Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, 79052, Львів, Україна, тел. +38 (050) 170 28 18, ел. пошта n_kuzin@mail.ru²ДП «Придніпровська залізниця», пр. Карла Маркса, 108, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (095) 795 81 24, ел. пошта vakulenko_leonid@mail.ruНАКОПИЧЕННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНІВ
ЗГІДНО З КРИТЕРІЄМ ПИТОМОЇ ЕНЕРГІЇ ПОВНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Мета. Сучасні уявлення про накопичення втомних пошкоджень у деталях рухомого складу залізничного транспорту ґрунтуються на моделях, які оцінюють довговічність металевих систем залежно від кількості циклів та розмаху деформацій або напружень. Ці моделі дозволяють з достатнім рівнем адекватності виконувати оцінку знеміцнення металевих систем в умовах багатоциклової втоми та за наявності тільки пружних деформацій у деталях рухомого складу. Водночас можливість появи пластичних деформацій при роботі залізничних транспортних конструкцій у них не враховується. Метою цієї роботи є побудова математичної моделі, яка дозволяє оцінювати довговічність металевих систем з урахуванням появи пластичної складової в процесі деформування деталей рухомого складу залізничного транспорту. **Методика.** З використанням сучасних підходів механіки деформованого твердого тіла було виконано аналіз впливу параметрів пластичних деформацій на довговічність високонавантажених елементів конструкцій. **Результати.** Вивчено вплив пружного та пластичного деформування на розсіяння енергії під час циклічного навантаження. **Наукова новизна.** Аналітично показано, що параметри знеміцнення металевих систем пов'язані з повною енергією деформації, яка характеризує особливості деградаційних процесів у металевих конструкціях під час зовнішніх навантажень. **Практична значимість.** Запропоновано співвідношення, які дозволяють оцінювати залишковий ресурс деталі в умовах заданого послідовного багаторівневого циклічного навантаження.

Ключові слова: цикл; деформація; пошкодження; втома; енергія

Вступ

У наукових працях низки дослідників [2, 5, 9] аналіз результатів експериментальних досліджень з питання вивчення втоми матеріалу в основному був спрямований на те, щоб встановити зв'язок між характеристиками довговічності (залежно від кількості циклів N_f) та амплітудою деформації або напруження. Отримані при цьому криві, які прийнято називати $S-N$ -кривими і які широко застосовуються в розрахунковій практиці, не відображають процесу накопичення пошкоджень матеріалу деталей і конструкцій, зокрема, у деталях рухомого складу залізничного транспорту, які здебільшого експлуатуються в доволі складних умовах. Тому як альтернативний підхід була запропонована ідея встановлення зв'язку між втомою і довговічністю та роботою пластичної деформації протягом одного циклу напруження [10].

Однак при зменшенні розмаху циклічної деформації $\Delta \epsilon$ її пластична складова $\Delta \epsilon^p$ прямує до нуля. Таким чином, для випадку багатоциклової втоми слід приймати інший критерій руйнування.

Мета

Метою статті є виклад результатів систематичного дослідження питомої енергії циклічної деформації, яка впливає в процесі активної експлуатації на хребтову балку залізничних цистерн, що виготовляється як складальна зварна конструкція, основним несучим елементом якої є швелер № 30 із матеріалу Сталь 30 (ГОСТ 1050-88).

Відомі дослідження [8, 9], спрямовані на встановлення втомної довговічності матеріалу із значними розмахами деформації або напруженнями. Математичний вираз результатів для

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

випадку малоциклової втоми при симетричному навантаженні з розгляду деформації можна записати таким чином:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon^e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon^p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} N_f^b + \varepsilon'_f N_f^c, \quad (1)$$

де $\Delta \varepsilon^e$ – пружна складова розмаху деформації; σ'_f – коефіцієнт міцності від утомленості; E – модуль Юнга; N_f^b , N_f^c – кількість циклів до руйнування, де показники b і c вказують відповідно на міцність від утомленості при пружному та пластичному деформуванні; ε'_f – коефіцієнт пластичності міцності від утомленості для одного циклу напруження.

Апроксимацію для неконтрольованого напруження можна записати в такому вигляді:

$$\frac{\Delta \sigma}{2} = E \frac{\Delta \varepsilon^e}{2} = \sigma'_f N_f^b. \quad (2)$$

У деяких зарубіжних наукових публікаціях [11, 12] наводиться зв'язок втомної довговічності з енергією пластичної деформації, яка поглинається протягом одного циклу. Для опису характеристик втоми матеріалу використано співвідношення вигляду

$$\Delta W^p = K' N_f^{\alpha'}, \quad (3)$$

де ΔW^p – пластична складова питомої енергії циклічної деформації; K' – енергетичний коефіцієнт.

Переважа енергії пластичної деформації ΔW^p , яка розсіюється за один цикл, полягає в тому, що вона залишається майже постійною протягом усього періоду навантаження на матеріал хребтової балки. Однак при зменшенні розмаху деформації $\Delta \varepsilon$ маємо $\Delta \varepsilon^p \rightarrow 0$, що відповідає енергії пластичної деформації $\Delta W^p \rightarrow 0$. Тому вважається, що пошкодження, викликані циклічним навантаженням, залежать від поглинання енергії пластичної деформації і в тій частині енергії пружної деформації, яка сприяє утворенню й росту тріщин. Таким чином, необхідно встановити як пружну, так і пластичну складові енергії деформацій, які припадають на один цикл деформування

$$\Delta W^t = \Delta W^p + \Delta W^e, \quad (4)$$

де ΔW^t – питома енергія повної деформації; ΔW^e – пружна складова питомої енергії деформації.

Величини енергії деформацій, які пов'язані із накопиченням пошкоджень і показані на рис. 1, мають розмах циклічного напруження $\Delta \sigma$, рівний $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$.

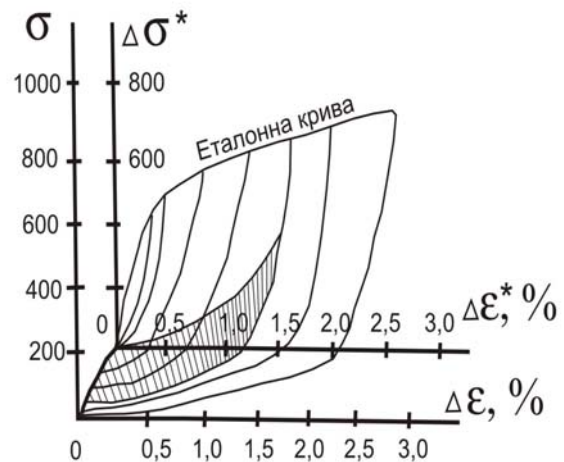


Рис. 1. Втомні петлі гістерезису після половини терміну втомної довговічності

Результати

Слід зауважити, що вирази для розрахунку питомої енергії пластичної циклічної деформації ΔW^p є прийнятними як для матеріалів, які задовольняють ідеалізовані моделі Мазінга (відомі одномірні моделі, що являють собою систему паралельних стержнів при рівномірному одномісному деформуванні, доповнені умовою руйнування стержнів, що дозволяє прогнозувати наявність спадної кривої на діаграмі деформування матеріалу [7]), так і для матеріалів, які не вписуються в цю модель. У загальному випадку будується еталонна крива, яка відрізняється від циклічної кривої. Її отримують шляхом з'єднання верхніх гілок петель гістерезису після зміщення кожної петлі вздовж її лінійної ділянки (рис. 1).

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

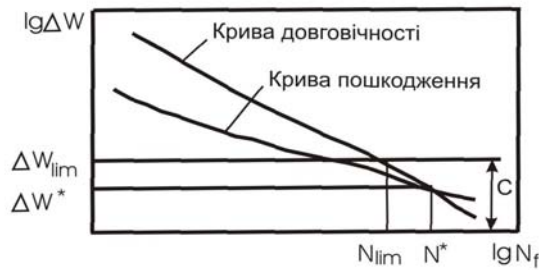


Рис. 2. Криві довговічності та критичної пошкодженості, які перетинаються в точці, що визначає «приведену» межу втоми

Вираз для еталонної кривої із початком координат у нижній точці найменшої пластичної петлі гістерезису 0^* матиме такий вигляд:

$$\Delta \varepsilon^* = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma^*}{2K^*} \right)^{1/n^*}, \quad (5)$$

де $\Delta \sigma^*$ – розмах циклічного напруження, який відраховується від точки 0^* (рис. 1); K^* – коефіцієнт міцності; n^* – показник циклічного деформаційного зміцнення для еталонної кривої.

Енергія циклічної пластичної деформації розраховується за формулою:

$$\Delta W^p = \frac{1-n^*}{1+n^*} (\Delta \sigma - \delta \sigma_0) \Delta \varepsilon^p + \delta \sigma_0 \Delta \varepsilon^p, \quad (6)$$

де

$$\sigma_0 = \Delta \sigma - \Delta \sigma^* = \Delta \sigma - 2K^* \left(\frac{\Delta \varepsilon^p}{2} \right)^{n^*} \quad (7)$$

є зростання напруження в межах пропорційності, зумовленої відхиленням поведінки матеріалу від моделі Мазінга (див. рис. 1). Слід зауважити, що для ідеального матеріалу Мазінга еталонна крива та циклічна крива збігаються, тобто $n^* = n'$ та $\delta \sigma_0 = 0$, а формула (6) набуває такого вигляду:

$$\Delta W^p = \frac{1-n'}{1+n'} \Delta \sigma \Delta \varepsilon^p. \quad (8)$$

Підставляючи вирази (1) і (2) у формулу (8), отримуємо:

$$\Delta W^p = 4\sigma_f' \varepsilon_f' \frac{c-b}{c+b} N_f^{b+c}, \quad (9)$$

де b і c – показники міцності від втоми при пружному та пластичному деформуванні відповідно.

Питома енергія повернутої пружної деформації розраховується згідно з формулою:

$$\Delta W^e = \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta \sigma}{2} + \sigma_m \right), \quad (10)$$

де σ_m – середнє напруження, $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$.

Таким чином, питома енергія повної деформації ΔW^t , яка призводить до накопичення пошкоджень, у розрахунку на одиницю об'єму матеріалу рівна:

$$\Delta W^t = \Delta W^p + \Delta W^e = \frac{1-n^*}{1+n^*} (\Delta \sigma - \delta \sigma_0). \quad (11)$$

Основна частина енергії ΔW^p , що поглинається, переходить у теплову, а решта механічної енергії викликає переміщення дислокацій та зміни об'єму. Ці регулярно повторені впливи на матеріал конструкції хребтової балки призводять до зародження тріщин з подальшим їх поширенням аж до руйнування. Отже, довговічність експлуатації матеріалу конструкції є функцією визначеного вище «повного» припливу енергії, тобто $\Delta W^t = g(N_f)$. Такі припущення підтверджуються математичними міркуваннями [6], що дозволяє припускати степеневе співвідношення вигляду

$$\Delta W^t = KN_f^0 + C. \quad (12)$$

Стала C в останній формулі відповідає тій частині пружної енергії розтягу, яка не приводить до значного пошкодження. Вона пов'язана із величиною питомої енергії деформації, яка відповідає межі втоми матеріалу, тобто

$$C \cong \Delta W_{\lim} \frac{1}{\delta} (\Delta \sigma \cdot \Delta \varepsilon^e)_{\lim}. \quad (13)$$

Наукова новизна та практична значимість

Універсальний характер критерію втомного руйнування (12) для випадків мало- і багатоциклової втоми стає очевидним. Питома енергія повної циклічної деформації ΔW^t , що визначається формулою (11), має фізичну інтерпрета-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

цію й узгоджується з уявленням про зародження й подальше поширення тріщин. Час роботи зразка до його руйнування за умов мало- і багатоциклової втоми поділяється на два етапи: зародження початкових тріщин та їх подальше поширення аж до руйнування. Відмінність етапів зародження та поширення тріщин можна зобразити кривою пошкодження. Припускаємо, що криву критичної пошкодженості, яка описана межею між зародженням і поширенням тріщин, можна пов'язати з кривою Френча [4], яка призначена для прогнозування багатоциклового втоми руйнування до моменту зародження мікротріщини (див. рис. 2). Вважається, що на етапі поширення тріщин матеріал має «приведену» межу втоми, яка визначається рівнем питомої енергії деформації ΔW^* та довговічності N^* . Як видно із рис. 2, $\Delta W^* < \Delta W_{\text{lim}}$, причому величина ΔW^* визначається точкою перетину кривої $\Delta W^t - N_f$ із кривою критичної пошкодженості.

Критерій втоми руйнування при багаторівневому навантаженні розроблений у роботі [1]. У загальному випадку для j етапів навантаження отримана така залежність:

$$\sum_{i=1}^j \left(\frac{n_i}{N_{fi}} \right)^{\frac{\lg(N_{fi}/N^*)}{\lg(N_{fi-1}/N^*)}} = 1. \quad (14)$$

Згідно з наведеним рівнянням (14) відбувається наближення до закону лінійного накопичення пошкоджень Пальмгрена – Майнера [13], тобто

$$\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_{fi}} = 1. \quad (15)$$

Зауважимо, що у випадках, коли нахил ліній пошкодження є сталим і рівний нахилу кривої довговічності, рівняння (14) також буде відповідати закону Пальмгрена – Майнера.

Рівняння (14) дозволяє розраховувати залишковий ресурс деталі, якщо задана послідовність багаторівневого циклічного навантаження. Параметр матеріалу, який для цього необхідно визначити, – це енергія ΔW^* , пов'язана з межею втоми матеріалу. Щоб встановити кількість циклів до руйнування для кожного за-

даного етапу навантаження, необхідно також знайти криву довговічності (12).

Висновки

Поведінку матеріалу при циклічному навантаженні як у малоцикловому, так і багатоцикловому режимі можна описати за допомогою критерію накопичення пошкоджень, що базується на питомій енергії циклічної деформації ΔW^t . Питома енергія циклічної деформації визначається як сума енергії пластичної деформації (рівної площі петлі гістерезису) та енергії пружної деформації розтягу. Отриманий аналітичний вираз (11) є прийнятним як для матеріалу Мазінга, так і для інших матеріалів.

Критерій руйнування пов'язує питому енергію повної прикладеної механічної деформації ΔW^t з кількістю циклів до руйнування N_f згідно з рівнянням (12). Показано, що цей критерій руйнування достатньо добре узгоджується з одержаними експериментальними даними для різних видів випробовувань.

Крива пошкодження, на якій виділені етапи зародження і поширення тріщин у процесі розвитку втоми матеріалу, також визначається через питому енергію повної деформації. Ця крива разом із критерієм руйнування повністю визначає нелінійний закон накопичення пошкоджень.

Докладні та систематичні дані про поведінку матеріалів у різних умовах навантаження, а також аналітичні вирази для величин накопичених пошкоджень і втомної довговічності принесуть значну користь спеціалістам, пов'язаним як з проектуванням, так і з експлуатацією засобів залізничного транспорту [3].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вакуленко, І. О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу / І. О. Вакуленко. – Д. : Маковецький, 2012. – 152 с.
2. Кузін, М. О. Математичне моделювання параметрів втоми міцності структурно-неоднорідних металічних систем / М. О. Кузін, Т. М. Мещерякова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 38. – С. 213–219.
3. Кузін, О. А. Роль структури в процесах зношування ферито-перлітних сталей / О. А. Кузін, Т. М. Мещерякова, М. О. Кузін // Вісник Дніп-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- ропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 224–229.
4. Манжула, К. П. Об использовании кривых Френча при прогнозировании циклической долговечности / К. П. Манжула // Проблемы прочности. – 2005. – № 1. – С. 88–95.
 5. Мруз, З. Упрочнение и накопление повреждений в металлах при монотонном и циклическом нагружении / З. Мруз // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1983. – № 2. – С. 44–50.
 6. Привалова, В. В. Некоторые закономерности изменения свойств материалов в ходе циклического растяжения / В. В. Привалова, В. В. Стружанов // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер. : Физ.-мат. науки. – Самара, 2012. – № 1 (26). – С. 110–115.
 7. Стружанов, В. В. Модификационная модель Мазинга / В. В. Стружанов, В. В. Башуров // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Сер. : Физ.-мат. науки. – Самара, 2007. – № 1 (14). – С. 29–39.
 8. Фелтнер, Э. Энергия гистерезиса микропластической деформации как критерий усталостного разрушения / Э. Фелтнер, А. Морроу // Техническая механика. – 1961. – № 1. – С. 20.
 9. Хлыбов, А. А. Моделирование накопления усталостных повреждений и создание системы диагностирования тонкостенных конструкций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01. 02. 06 / Хлыбов Александр Анатольевич ; НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2002. – 15 с.
 10. Эльин, Ф. Влияние растягивающей средней деформации на энергию пластической деформации и циклические свойства / Ф. Эльин // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1985. – № 2. – С. 25.
 11. Helforl, G. R. The Energy Required for Fatigue / G. R. Helforl // Journal of Materials. – 1966. – Vol. 1, № 1. – P. 3–18.
 12. Lefebvre, D. Cyclic Response and Inelastic Strain Energy in Low Cyclic Fatigue / D. Lefebvre, F. Ellyin // International Journal of Fatigue. – 1984. – Vol. 6, № 1. – P. 9–15.
 13. Miner, M. A. Cumulative Damage in Fatigue / M. A. Miner // ASME Journal of Applied Mechanics. – 1955. – Vol. 12. – P. A159 – A164.

А. Я. КУЛИЧЕНКО¹, Н. О. КУЗИН^{1*}, Л. И. ВАКУЛЕНКО²

¹Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, 79052, Львов, Украина, тел. +38 (093) 741 51 27, эл. почта kulan47@mail.ru

^{1*}Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, 79052, Львов, Украина, тел. +38 (050) 170 28 18, эл. почта n_kuzin@mail.ru

²ГП «Приднепровская железная дорога», пр. Карла Маркса, 108, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (095) 795 81 24, эл. почта vakulenko_leonid@mail.ru

НАКОПЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНОВ ПО КРИТЕРИЮ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ПОЛНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Цель. Современные представления о накоплении усталостных повреждений в деталях подвижного состава железнодорожного транспорта основываются на моделях, которые оценивают долговечность металлических систем в зависимости от числа циклов и размаха деформаций или напряжений. Данные модели позволяют с достаточной степенью адекватности проводить оценку разупрочнения металлических систем в условиях многоциклической усталости и при наличии только упругих деформаций в деталях подвижного состава. Вместе с тем возможность появления пластических деформаций при работе железнодорожно-транспортных конструкций они не учитывают. Целью данной работы является построение математической модели, которая позволяет оценивать долговечность металлических систем с учетом появления пластической составляющей в процессе деформирования деталей подвижного состава железнодорожного транспорта. **Методика.** С использованием современных подходов механики деформируемого твердого тела проведен анализ влияния параметров пластических деформаций на долговечность высоконагруженных элементов конструкций. **Результаты.** Изучено влияние упругого и пластического деформирования на рассеяние энергии при циклической нагрузке. **Научная новизна.** Аналитически показано, что параметры разупрочнения металлических систем связаны с полной энергией деформации, которая характеризует особенности деградационных процессов в металлических конструкциях при внешних нагрузках. **Практическая значимость.**

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Предложены соотношения, которые позволяют оценивать остаточный ресурс детали в условиях заданной последовательной многоуровневой циклической нагрузки.

Ключевые слова: цикл; деформация; повреждение; усталость; энергия

A. YA. KULICHENKO¹, N. O. KUZIN^{1*}, L. I. VAKULENKO²

¹Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv branch office of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych Str., 12a, 79052, Lviv, Ukraine, tel. +38 (093) 741 51 27, e-mail kulan47@mail.ru

^{1*}Dep. «Rolling Stock and Track», Lviv branch office of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych Str., 12a, 79052, Lviv, Ukraine, tel. +38 (050) 170 28 18, e-mail n_kuzin@mail.ru

²Prydneprovskaya Railway, Karl Marx Av., 108, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (095) 795 81 24, e-mail vakulenko_leonid@mail.ru

FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION OF DETAILS IN CARS ACCORDING TO CRITERION OF SPECIFIC ENERGY OF TOTAL STRAIN

Purpose. Modern ideas about the accumulation of fatigue damages in the details of railway vehicles are based on models that estimate the durability of metal systems and depend on the number of cycles and the magnitude of deformations or stresses. These models allow one to assess with a sufficient degree of adequacy the weakening of metal systems in polycyclic fatigue and at the presence of the elastic strain only in the details of rolling stock. However, the possibility of plastic deformation appearing during operation of rail transport structures is not taken into account. The aim of this work is a construction of a mathematical model that allows estimating the durability of metal systems with regard to the appearing of the plastic component in the process of deformation of parts of railway vehicles. **Methodology.** With the use of modern methods of solid mechanics the influence of the parameters of plastic deformation on the durability of highly loaded structural elements was analyzed. **Findings.** The effect of elastic and plastic deformation on the energy dissipation under cyclic loading was studied. **Originality.** It was shown analytically that the softening parameters of metal systems are related to the total energy of deformation, which characterizes features of the degradation processes in the metal structures under external loads. **Practical value.** Ratios were proposed, they allow estimating residual life of details in a sequential multilevel cyclic loading.

Keywords: cycle; deformation; damage; fatigue; energy

REFERENCES

1. 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.
2. Kuzin M.O. Matematychnye modeliuvannya parametriv vtomnoi mitsnosti strukturno-neodnorodnykh metalichnykh system [Mathematical simulation of fatigue strength parameters in structural non-uniform metallic systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 213-219.
3. Kuzin O.A. Rol struktury v protsesakh znoshuvannya feryto-perlitnykh stalei [The role of structure in the ferrite-pearlitic steel wear processes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 224-229.
4. Manzhula K.P. Ob ispolzovanii krivyykh Frencha pri prognozirovanii tsiklicheskoy dolgovechnosti [On the use of French curves in predicting the cyclic life]. *Problemy prochnosti – Strength of Materials*, 2005, no. 1, pp. 88-95.
5. Mruz Z. Uprochneniye i nakopleniye povrezhdeniy v metallakh pri monotonnom i tsiklicheskom nagruzhenii [Hardening and accumulation damages in metals under monotonic and cyclic loading]. *Teoreticheskiye osnovy inzhenernykh raschetov – Theoretical foundations of engineering calculations*, 1983, no. 2, pp. 44-50.
6. Privalova V.V., Struzhanov V.V. Nekotoryye zakonomernosti izmeneniya svoystv materialov v khode tsiklicheskogo rastyazheniya [Some patterns of change in the material properties in the course of cyclic tension]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskoye*

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Science], 2012, no. 1 (26), pp. 110-115.
7. Struzhanov V.V., Bashurov V.V. Modifikatsionnaya model Mazinga [Masing modification model]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskiye nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Science], no. 1 (14), 2007, pp. 29-39.
 8. Feltner E., Morrou A. Energiya gisterezisa mikroplasticheskoy deformatsii kak kriteriy ustalostnogo razrusheniya [The hysteresis energy of microplastic deformation as a criterion for fatigue failure]. *Tekhnicheskaya mekhanika – Technical Mechanics*, 1961, no. 1, pp. 20.
 9. Hlybov A.A. *Modelirovaniye nakopleniya ustalostnykh povrezhdeniy i sozdaniye sistemy diagnostirovaniya tonkostennykh konstruksiy*. Avtoreferat Dis. [Simulation of fatigue damage accumulation and the creation a system of thin-walled structures diagnosis. Author's abstract]. Novgorod, 2002. 15 p.
 10. Elin F. Vliyaniye rastyagivayushchey sredney deformatsii na energiyu plasticheskoy deformatsii i tsiklicheskiye svoystva [Effect of mean tensile strain on the energy of plastic deformation and the cyclic properties]. *Teoreticheskiye osnovy inzhenernykh raschetov – Theoretical foundations of engineering calculations*, 1985, no. 2, 25 p.
 11. Helforl G.R. The Energy Required for Fatigue. *Journal of Materials*, 1966, vol. 1, no. 1, pp. 3-18.
 12. Lefebvre D., Ellyin F. Cyclic Response and Inelastic Strain Energy in Low Cyclic Farigue. *International Journal of Fatigue*, 1984, vol. 6, no. 1, 1984, pp. 9-15.
 13. Miner M.A. Cumulative Damage in Fatigue. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1955, vol. 12, pp. A159 – A164.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. А. І. Кондирем (Україна); к.т.н., доц. С. В. Пройдаком (Україна)

Надійшла до редколегії 25.04.2013

Прийнята до друку 26.07.2013

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

УДК 656.212.5-047.58

В. М. ПАХОМОВА^{1*}, Л. В. СТИБУЛЕВИЧ¹

^{1*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта viknik.p1988@mail.ru

МОДИФІКОВАНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАРКЕРНОГО МЕТОДУ ДОСТУПУ ДО ШИНИ

Мета. Для дослідження характеристик локальної мережі з використанням маркерного методу доступу до шини розробити її модифіковану імітаційну модель. **Методика.** Характеристики мережі визначаються на розробленій імітаційній моделі, в основу якої покладено діаграми станів каналного рівня станції мережі з механізмом обробки пріоритетів як у стійкому стані, так і під час виконання процедур керування: ініціації логічного кільця, входу та виходу станції мережі з логічного кільця. **Результати.** Розроблено імітаційну модель, використовуючи яку можна отримати залежності максимального часу очікування заявки в черзі для різних класів доступу, часу реакції та корисної пропускної спроможності мережі від швидкості передачі даних, кількості станцій мережі, інтенсивності генерації заявок, кількості кадрів, що передаються за час утримання маркера, довжини кадру. **Наукова новизна.** Запропоновано методику імітаційного моделювання локальної мережі, яка відображає її роботу як у стійкому стані, так і з використанням процедур керування, механізму призначення й обробки пріоритетів. **Практична значимість.** Визначення характеристик мережі в системах реального часу на залізничному транспорті на основі розробленої імітаційної моделі.

Ключові слова: маркерний метод доступу до шини; призначення пріоритетів; класи доступу; процедури керування

Вступ

У системах реального часу на сортувальних станціях доцільне використання локальних мереж, які відповідають вимогам обробки сигналів реального часу з наземного обладнання (на нижньому рівні) [10, 14]. Таку можливість надають локальні мережі з використанням маркерного методу доступу до шини [4]. Цій проблемі присвячена низка наукових праць [1–3, 5–8, 13, 15–16]. Раніше була розроблена відповідна імітаційна модель, яка відображає роботу мережі в стійкому стані (без використання процедур керування, механізму призна-

чення й обробки пріоритетів) [9]. На даному етапі виконано удосконалення первинної імітаційної моделі локальної мережі.

Мета

Для дослідження характеристик локальної мережі з використанням маркерного методу доступу до шини в системах реального часу на залізничному транспорті розробити модифіковану імітаційну модель «Token Bus» з механізмом призначення пріоритетів, що відображає роботу мережі як у стійкому стані, так і з застосуванням основних процедур керування: ініціа-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ції логічного кільця, входу та виходу станції мережі з логічного кільця.

Методика

Характеристики локальної мережі в системах реального часу на залізничному транспорті визначаються на розробленій імітаційній моделі мережі, в основу якої покладена не тільки діаграма станів каналного рівня маркерного методу доступу до шини (стійкий стан) [9], а й запропоновані в [11] діаграми станів каналного рівня станції локальної мережі з використанням механізму призначення та обробки даних за класами доступу й основних процедур керування: ініціації логічного кільця, входу та виходу робочої станції мережі з логічного маркерного кільця.

Результати

В основу первинної імітаційної моделі покладена діаграма каналного рівня станції локальної мережі з використанням маркерного методу доступу до шини в стійкому стані (без використання процедур керування та без призначення й обробки пріоритетів) [9]. Основою модифікованої імітаційної моделі «Token Bus» є діаграми станів каналного рівня станції локальної мережі з використанням маркерного методу доступу до шини з механізмом призначення й обробки пріоритетів та застосуванням основних процедур керування: ініціації логічного кільця, входу та виходу станції мережі з логічного кільця, тобто в ній більш ефективно реалізовано імітаційне моделювання. Особливістю та складністю маркерного методу доступу є наявність процедур керування. Детальні діаграми станів з їх використанням, що були задіяні в модифікованій імітаційній моделі, розроблені та описані в [11].

Так, у модифікованій імітаційній моделі, як і в [9], демонструється модель процесів передачі/прийому маркера та даних, але метод маркерного доступу до шини забезпечує механізм призначення пріоритетів, який призначає кадрам даних, що чекають передачі, різні «класи обслуговування», які класифікуються за бажаною пріоритетністю передачі [4]. Класи обслуговування 0 і 1 відповідають класу досту-

пу 0, класи обслуговування 2 і 3 – класу доступу 2, класи обслуговування 4 і 5 – класу доступу 4 і класи обслуговування 6 і 7 – класу доступу 6. На рис. 1 наведена діаграма станів каналного рівня з використанням маркерного методу доступу до шини з класами доступу обслуговування кадрів.

Для кожного класу доступу є черга кадрів, що підлягають передачі. Коли станція приймає маркер, вона спочатку обслуговує чергу найвищого класу доступу. Для шостого класу доступу призначається час утримання маркера (Token Holding Time, THT), для класів доступу 4, 2 та 0 – бажаний час обертів маркера (Token Rotation Time, TRT^n , де $n = 4, 2$ або 0). Тому кожна станція мережі повинна мати таймер утримання маркера та три таймери обертів маркера для трьох нижчих класів доступу. Для кожного класу доступу станція вимірює час, який витрачає її маркер на циркуляцію по логічному кільцю $TRT_{\text{факт}}^n$. На відміну від [9] у модифікованій імітаційній моделі додаються відповідні стани «Аналіз класу доступу» та «Аналіз $TRT_{\text{факт}}^n$ ». Якщо маркер повертається на станцію за менший час, ніж бажаний час обертів маркера $TRT_{\text{факт}}^n < TRT^n$ (див. рис. 1), то станція може передавати кадри цього класу доступу доти, поки не вичерпається цей час. Якщо ж маркер повертається після бажаного часу його повернення $TRT_{\text{факт}}^n \geq TRT^n$ (див. рис. 1) – станція не може передавати кадри цього пріоритету за такого часу передачі маркера. Тільки після передачі всіх кадрів вищого пріоритету станція приступає до обслуговування таймерів обертів маркера й черг, переходячи від вищих до нижчих класів доступу.

Під час імітаційного моделювання локальної мережі використана схема з фіксованим кроком зсуву системного часу; програмна реалізація імітаційної моделі виконана за допомогою мови об'єктно-орієнтованого програмування Delphi. Структура відповідної програмної імітаційної моделі локальної мережі зображена на рис. 2.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

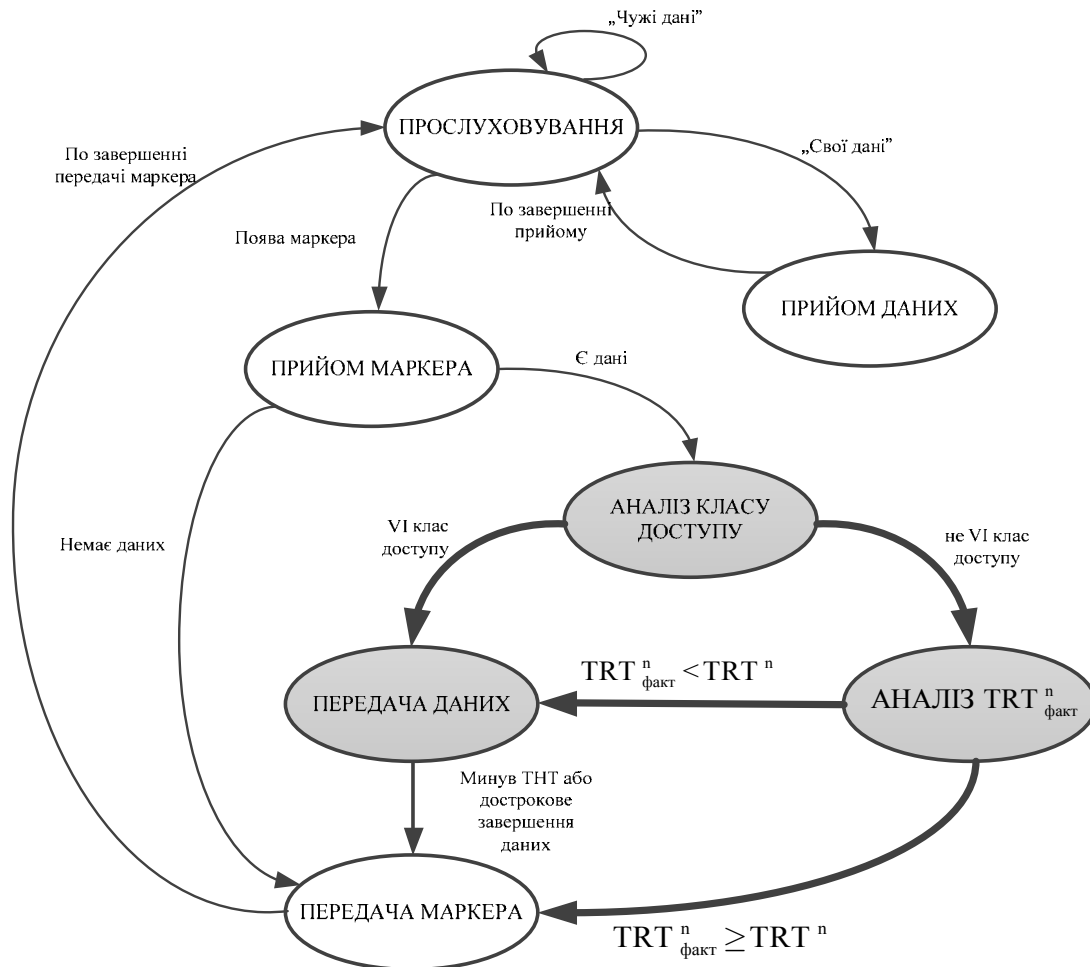


Рис. 1. Діаграма станів каналного рівня станції мережі з механізмом обробки пріоритетів

Форма «Діалог» призначена для задання характеристик мережі для моделювання. Є можливість запускати модель зі значеннями за промовчанням або зі значеннями, які перебувають у допустимому діапазоні, що вводять користувач, після чого виконується автоматичний розрахунок необхідних констант. Функція «Ініціалізація початкових значень» виконує скидання змінних та встановлення за промовчанням характеристик мережі. Функція «Введення даних користувача» надає користувачу можливість зміни будь-яких із запропонованих характеристик мережі. За допомогою функції «Підтвердження введених даних» здійснюється запис у зміні даних, які розташовані в полях введення. Функція «Розрахунок та виведення констант» на основі введених даних виконує розрахунок констант для роботи мережі та їх виведення. Функція «Перехід до моделювання» закриває діалогове вікно та запускає вікно моделювання.

Форма «Моделювання» призначена для відображення процесу моделювання мережі із заданими характеристиками. Надає користувачу можливість зміни деяких характеристик мережі та відображає стан основних параметрів мережі в процесі моделювання. Функція «Ініціалізація початкових умов» на основі введених користувачем даних встановлює лічильники та параметри мережі в первинний стан. Функція «Генерація заявок» забезпечує генерацію заявок на основі введених користувачем даних. Функція «Передача даних» здійснює передачу даних та маркера на основі розрахованих констант. Функція «Оцінка стану моделі, створення відгуків» розраховує відгуки на даний момент часу та перевіряє внесені користувачем налаштування на формі моделювання. Функція «Відображення стану моделі» організовує виведення характеристик мережі та її елементів.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

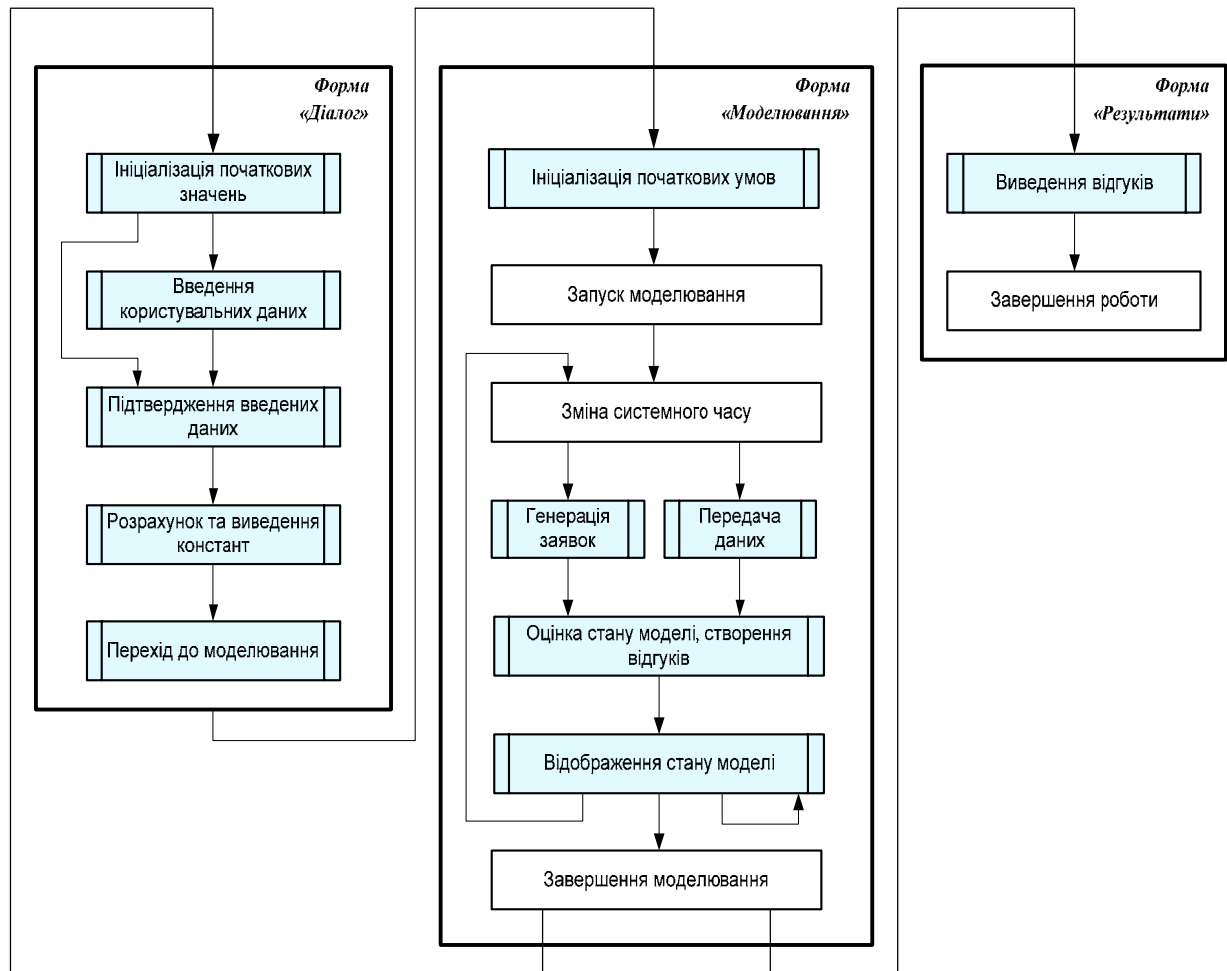


Рис. 2. Структура програмної моделі імітаційної моделі «Token Bus»

Форма «Результати» призначена для виведення вихідних характеристик мережі. Функція «Виведення відгуків» відображає відгуки, що розраховані на момент завершення моделювання. Під час запуску імітаційної моделі «Token Bus» з'являється форма «Діалог». Вона призначена для введення параметрів користувачем для подальшого моделювання роботи мережі. Є можливість ввести такі параметри: швидкість передачі даних (2, 10, 15 або 20 Мбіт/с), кількість робочих станцій мережі (3..20), інтенсивність генерації заявок (50..500 заявок/с), кількість кадрів, які передає станція за час утримання маркера, довжина полів «Адреса отримувача» (АО) та «Адреса відправника» (АВ) (2 або 6 октет), довжина кадру даних (2 676...8 195 октет). Після визначення з конфігурацією мережі користувач підтверджує введення та переходить до наступних даних: вхід-

ний потік, процент появи заявки кожного класу доступу та тип моделі (стійкий стан мережі або з підключенням процедур керування: «Ініціалізація логічного кільця», «Вхід станції в логічне кільце» та «Вихід станції з логічного кільця»). У полі «Константи» значення розраховуються автоматично за формулами

$$THT = \frac{ml}{V}, \quad (1)$$

$$TRT^4 = N \cdot THT + THT, \quad (2)$$

$$TRT^2 = N \cdot THT + 2 \cdot THT, \quad (3)$$

$$TRT^0 = N \cdot THT + 3 \cdot THT, \quad (4)$$

де THT – час утримання маркера станцією мережі для шостого класу доступу; m – кількість кадрів; l – довжина кадру; V – швидкість пере-

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

дачі даних; N – кількість станцій мережі; TRT^4 – час оборту маркера 4-го класу доступу; TRT^2 – час оборту маркера 2-го класу доступу; TRT^0 – час оборту маркера 0-го класу доступу.

Користувач переходить до моделювання. На рис. 3 наведено форму «Діалог» імітаційної моделі «Token Bus» з визначеними параметрами.

Рис. 3. Вхідна форма «Діалог» імітаційної моделі «Token Bus»

Результуючі характеристики: максимальний час очікування заявки в черзі для всіх класів доступу; час реакції та корисна пропускна спроможність мережі (швидкість передачі корисної інформації)

$$C^k = \frac{l^{bd} k}{t_{mod}}, \quad (5)$$

де C^k – корисна пропускна спроможність мережі; l^{bd} – розмір блоку даних; k – кількість переданих кадрів; t_{mod} – час моделювання.

Після натиснення кнопки «Моделювання» з'являється однойменна форма, де на графіку можна спостерігати генерацію заявок кожного класу доступу на кожній станції мережі. Нижче

у вікні відображаються події в певні моменти часу. За бажанням користувач може зупинити процес моделювання у вказаній точці: після передачі кадру, після кола (маркер повернувся на станцію), після генерації заявок та у вказаній точці (вказується час). Під час роботи моделі є можливість змінювати інтенсивність генерації заявок окремо на кожній станції мережі.

У лівому нижньому куті вікна користувач може спостерігати рух маркера від станції до станції мережі; час передачі кадрів даних станцією, яка володіє маркером; фактичний час оборту маркера (час оборту маркера, який знімається з таймера на попередньому колі; час завершення попереднього кола та час початку поточного кола). Якщо користувач помилився або хоче змінити початкові параметри, то за допомогою кнопки RESET можна повернутися на форму «Діалог».

Якщо на формі «Діалог» обрати тип моделювання з процедурами керування, то форма «Моделювання» змінить свій вигляд: на ній з'являться три додаткових віконця: «Ініціалізація логічного кільця», «Вхід станції до логічного кільця» та «Вихід станції з логічного кільця». На рис. 4 наведена форма «Моделювання» імітаційної моделі «Token Bus» з використанням процедур керування.

Натиснувши кнопку «Результати» з'являється відповідна форма, яка відображає такі характеристики мережі: максимальний час очікування заявки в черзі для кожного класу доступу, час реакції та корисну пропускну спроможність мережі.

Виходячи з результатів моделювання, можна отримати залежності максимального часу очікування заявки в черзі для різних класів доступу (6, 4, 2 і 0), часу реакції та корисної пропускної спроможності мережі від швидкості передачі даних, кількості станцій мережі, інтенсивності генерації заявок, кількості кадрів, що передаються за час утримання маркера, довжини кадру.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

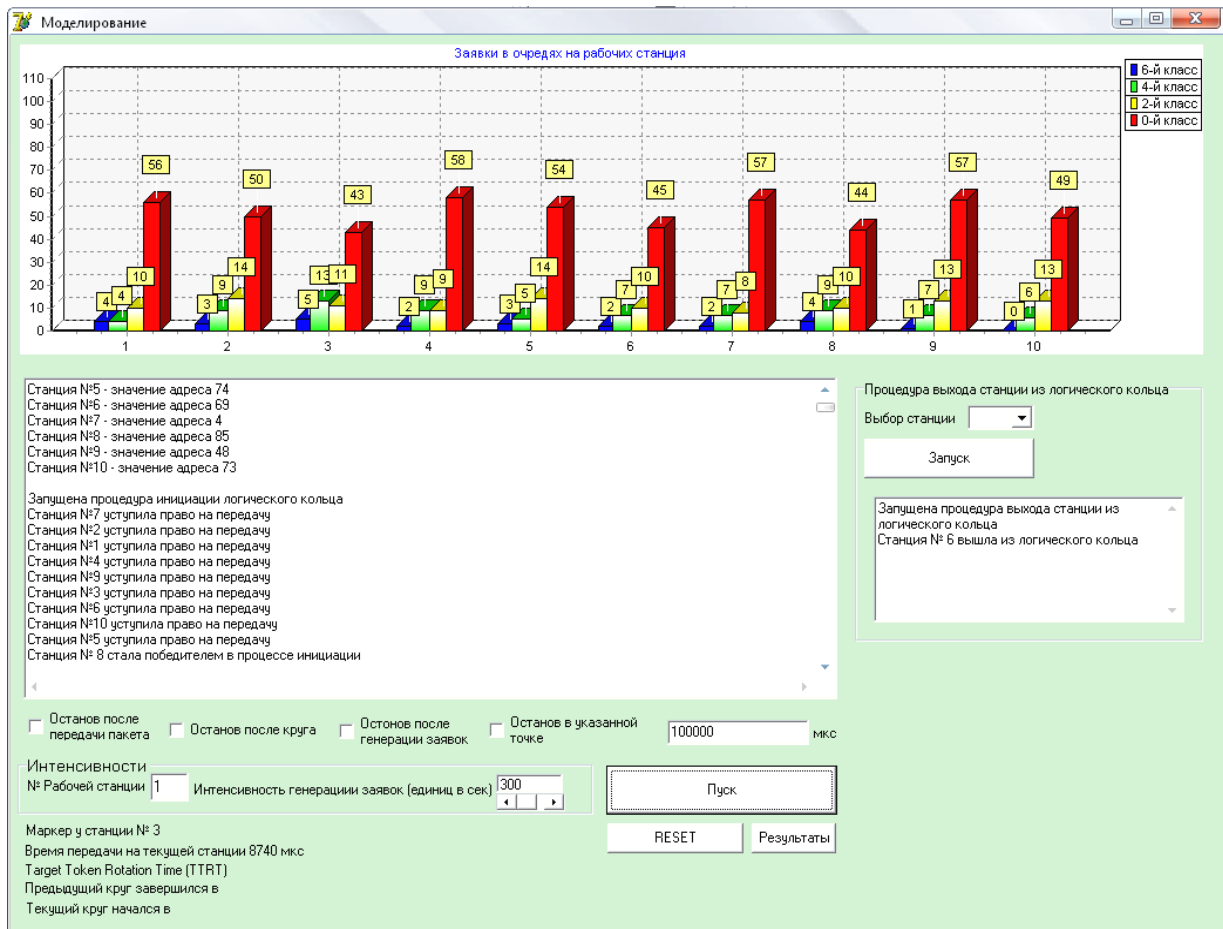


Рис. 4. Форма «Моделирования» імітаційної моделі «Token Bus» з використанням процедур керування

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано методику імітаційного моделювання локальної мережі, яка відображає її роботу як у стійкому стані, так і з використанням процедур керування та механізму призначення й обробки пріоритетів, для визначення відповідних характеристик мережі в системах реального часу на залізничному транспорті.

Висновки

1. Для дослідження характеристик локальної мережі з використанням маркерного методу доступу запропоновано методику імітаційного моделювання мережі, що відображає її роботу як у стійкому стані, так і із застосуванням механізму призначення й обробки пріоритетів, а також процедур керування: ініціалізації логічного кільця, входу та виходу станції мережі з логічного кільця.

2. Розроблено в Delphi модифіковану імітаційну модель локальної мережі «Token Bus», вхідні параметри якої: швидкість передачі даних, кількість робочих станцій локальної мережі, інтенсивність генерації заявок, кількість кадрів, що передаються за час утримання маркера, довжина кадру даних; результуючі характеристики: максимальний час очікування заявки в черзі для класів доступу 6, 4, 2 та 0, час реакції та корисна пропускна спроможність мережі. На основі даних імітаційного моделювання можна одержати відповідні залежності.

3. На підставі результатів імітаційного моделювання можливо надати відповідні рекомендації щодо модернізації існуючих та впровадження нових комп'ютерних мереж у системах реального часу на залізничному транспорті.

4. Розроблена модифікована імітаційна модель локальної мережі може бути використана як демонстраційна в навчальному процесі з дисципліни «Комп'ютерні мережі».

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андерсон, К. Локальные сети. Полное руководство / К. Андерсон, М. Минаси. – СПб. : КОРОНА принт, 1999. – 626 с.
2. Берри, Н. Компьютерные сети / Н. Берри. – М. : БИНОМ, 1996. – 400 с.
3. Бутаев, М. М. Моделирование сетей ЭВМ / М. М. Бутаев, Н. Н. Коннов. – Пенза : Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2007. – 56 с.
4. ГОСТ 34.913.4-91. Информационная технология. Локальные вычислительные сети. Метод маркерного доступа к шине и спецификация физического уровня. – Введ. 1992-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1992. – 303 с.
5. Кулаков, Ю. А. Компьютерные сети / Ю. А. Кулаков, С. В. Омелянский. – К. : Юниор, 1999. – 544 с.
6. Марк, А. Высокопроизводительные сети. Энциклопедия пользователя / А. Марк. – К. : ДиаСофт, 1998. – 432 с.
7. Новиков, Ю. В. Локальные сети: архитектура, алгоритмы, проектирование / Ю. В. Новиков, С. В. Кондратенко. – М. : ЭКОМ, 2000. – 312 с.
8. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : Питер, 2001. – 672 с.
9. Пахомова, В. М. Удосконалення технології роботи систем управління сортувальним процесом на основі раціональної організації інформаційних потоків на станціях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / Пахомова Вікторія Миколаївна ; Дніпропетр. держ. техн. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2000. – 20 с.
10. Пахомова, В. Н. Анализ локальных вычислительных сетей сортировочных станций на основе имитационной модели TOKEN RING / В. Н. Пахомова, А. А. Прудко // Транспорт : сб. наук. пр. – Д., 2002. – Вип. 12. – С. 131–136.
11. Пахомова, В. М. Обробка класів доступу за маркерним методом доступу до шини в мережах систем реального часу на сортувальних станціях / Інформ.-керуючі системи на залізн. транспорті. – 2013. – № 3. – С. 65–70.
12. Пахомова, В. М. Методика побудови раціональної структури мережі підприємства за допомогою імітаційних моделей / В. М. Пахомова // Наука та прогрес трансп. Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2013. – Вип. 3 (45). – С. 94–102.
13. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум. – СПб. : Питер, 2007. – 992 с.
14. Техническое задание на автоматизированную систему управления расформированием составов на сортировочной станции : научн.-техн. отчет 99.01. / рук. Е. М. Шафит. – Д., 2000. – 179 с.
15. Saltzer, J. H. A star-shaped ring with high maintainability / J. H. Saltzer, K. T. Pogran. – Proc. of the Local Area Communications Network Symposium. – Boston, 1979. – P. 179–189.
16. Thurber, K. J. The many faces of local networking / K. J. Thurber, H. A. Freeman // Data Communications. – 1981. – P. 62–70.

В. Н. ПАХОМОВА^{1*}, Л. В. СТРИБУЛЕВИЧ^{1*}

^{1*}Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта viknik.p1988@mail.ru

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ ПРИ МАРКЕРНОМ МЕТОДЕ ДОСТУПА К ШИНЕ

Цель. Для исследования характеристик локальной сети при маркерном методе доступа к шине разработана ее модифицированная имитационная модель. **Методика.** Определение характеристик сети осуществляется на разработанной имитационной модели, в основу которой положены диаграммы состояний канального уровня станции сети с механизмом обработки приоритетов как в устойчивом состоянии, так и при выполнении управляющих процедур: инициации логического кольца, входе и выходе станции сети с логического кольца. **Результаты.** Разработана имитационная модель, на основе которой можно получить зависимости максимального времени ожидания заявки в очереди для разных классов доступа, времени реакции и полезной пропускной способности сети от скорости передачи данных, числа станций сети, интенсивности генерации заявок, количества кадров, передаваемых за время удержания маркера, длины кадра. **Научная новизна.** Предложена методика имитационного моделирования локальной сети, отражающая ее работу как в устойчивом состоянии, так и при выполнении управляющих процедур, механизма назначения и

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

обработки приоритетов. **Практическая значимость.** Определение характеристик сети в системах реального времени на железнодорожном транспорте на основе разработанной имитационной модели.

Ключевые слова: маркерный метод доступа к шине; назначение приоритетов; классы доступа; управляющие процедуры

V. N. PAKHOMOVA^{1*}, L.V. STRIBULEVICH^{1*}

^{1*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail viknik.p1988@mail.ru

MODIFIED NETWORK SIMULATION MODEL WITH TOKEN METHOD OF BUS ACCESS

Purpose. To study the characteristics of the local network with the marker method of access to the bus its modified simulation model was developed. **Methodology.** Defining characteristics of the network is carried out on the developed simulation model, which is based on the state diagram-layer network station with the mechanism of processing priorities, both in steady state and in the performance of control procedures: the initiation of a logical ring, the entrance and exit of the station network with a logical ring. **Findings.** A simulation model, on the basis of which can be obtained the dependencies of the application the maximum waiting time in the queue for different classes of access, and the reaction time usable bandwidth on the data rate, the number of network stations, the generation rate applications, the number of frames transmitted per token holding time, frame length was developed. **Originality.** The technique of network simulation reflecting its work in the steady condition and during the control procedures, the mechanism of priority ranking and handling was proposed. **Practical value.** Defining network characteristics in the real-time systems on railway transport based on the developed simulation model.

Keywords: marker bus access method; priority ranking; access classes; control procedures

REFERENCES

1. Anderson K., Minasi M. *Lokalnyye seti. Polnoye rukovodstvo* [Local networks. Complete guide]. Saint Petersburg, KORONA print Publ., 1999. 626 p.
2. Berri N. *Kompyuternyye seti* [Computer networks]. Moscow, BINOM Publ., 1996. 400 p.
3. Butayev M.M., Konnov N.N. *Modelirovaniye setey EVM* [Electronic computer network modeling]. Penza, Izd-vo Penzenskogo gos. un-ta Publ., 2007. 56 p.
4. GOST 34.913.4-91. *Lokalnyye vychislitelnyye seti. Metod markernogo dostupa k shine i spetsifikatsiya fizicheskogo urovnya* [State Standard 34.913.4-91. Local area networks. Token method of bus access and the physical level specification]. Moscow, Standartinform Publ., 1992. 303 p.
5. Kulakov Yu.A., Omelyanskiy S.V. *Kompyuternyye seti* [Computer networks]. Kyiv, Yuniur Publ., 1999. 544 p.
6. Mark A. *Vysokoproizvoditelnyye seti. Entsiklopediya polzovatelya* [High performance networks. User encyclopedia]. Kyiv, DiaSoft Publ., 1998. 432 p.
7. Novikov Yu.V., Kondratenko S.V. *Lokalnyye seti: arkhitektura, algoritmy, proyektirovaniye* [Local networks. Architecture, algorithm, designing]. Moscow, EKOM Publ., 2000. 312 p.
8. Olifer V.G., Olifer N.A. *Kompyuternyye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2001. 672 p.
9. Pakhomova V.M. *Udoskonalennia tekhnolohii roboty system upravlinnia sortuvalnym protsesom na osnovi ratsionalnoi orhanizatsii informatsiinykh potokiv na stantsiiakh*. Avtoreferat. Diss. [Technology improvement of the control system operation of sorting process based on the rational organization of data flows at stations. Author's abstract.]. Dnipropetrovsk, 2000. 20 p.
10. Pakhomova V.N., Prudko A.A. Analiz lokalnykh vychislitelnykh setey sortirovochnykh stantsiy na osnove imitatsionnoy modeli TOKEN RING [Local area network analysis of sorting stations on the basis of simulation model TOKEN RING]. *Transport* [Transport], 2002, issue 12, pp. 131-136.
11. Pakhomova V.M. Obrobka klasiv dostupu za markernym metodom dostupu do shyny v merezhakh system realnoho chasu na sortuvalnykh stantsiiakh [Handling of access classes according to marker method of access to the bus in the real-time networks on the sorting stations]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na*

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

- zaliznychnychnomu transporti – Information and control systems on the railway transport*, 2013, no. 3, pp. 65-70.
12. Pakhomova V.M. Metodyka pobudovy ratsionalnoi struktury merezhi pidpriemstva za dopomohoiu imitatsiinykh modelei [Methodology of constructing of the enterprise network rational structure using the simulation model]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2013, no. 3 (45), pp. 94-102.
 13. Tanenbaum E. *Kompyuternyye seti* [Computer networks]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2007. 992 p.
 14. Shafit Ye.M. *Tekhnicheskoye zadaniye na avtomatizirovannuyu sistemu upravleniya rasformirovaniyem sostavov na sortirovochnoy stantsii* [Technical specifications for the automated control system of train splitting on the sorting stations]. Dnipropetrovsk, 2000. 179 p.
 15. Saltzer J.H., Pogram K.T. A star-shaped ring with high maintainability. Proc. of the Local Area Communications Network Symposium. Boston, 1979, pp. 179-189.
 16. Thurber K.J., Freeman H.A. The many faces of local networking. *Data Communications*, 1981, pp. 62-70.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. В. Гнатушенком (Україна); д.т.н., проф. І. В. Жуковицьким (Україна)

Надійшла до редколегії 04.06.2013.

Прийнята до друку 08.08.2013.

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.423.2:621.31

О. М. БОНДАРЄВ^{1*}, Д. О. ЯГОДА¹, О. О. БОНДАРЄВ², В. М. СКОБЛЕНКО²

^{1*}Каф. «Будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел./факс +38 (056) 793 19 08,
ел. пошта onildpps@gmail.com

²Державна адміністрація залізничного транспорту України, вул. Тверська, 5, 49150, Київ, Україна

ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ МІЦНОСТІ КОРПУСІВ ТЯГОВИХ РЕДУКТОРІВ ЗВАРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ КЕВРЗ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ СЕРІЙ ЕР2, ЕР9

Мета. Перевірка відповідності вимогам Норм [10] експериментальних зразків тягових редукторів для електропоїздів серій ЕР2, ЕР9 з корпусами зварної конструкції виробництва Київського електровагоноремонтного заводу (КЕВРЗ). **Методика.** Для досягнення поставленої мети було розроблено розрахункові моделі для теоретичного визначення рівнів напружень у корпусі тягового редуктора зварної конструкції шляхом моделювання навантаженості, що може створюватися в умовах експлуатації, та експериментально оцінено напруження в різних точках корпусу тягового редуктора, а також рівні вертикальних прискорень корпусу тягового редуктора та навантаженості вузла прикріплення корпусу до рами візка. **Результати.** На підставі аналізу отриманих результатів розрахунків було встановлено, що тягові редуктори з корпусами зварної конструкції КЕВРЗ відповідають вимогам Норм [10]. **Наукова новизна.** На підставі експериментальних та теоретичних досліджень виконано науковий супровід робіт з розробки та введення в експлуатацію оновлених тягових редукторів для електропоїздів серій ЕР2, ЕР9. **Практична значимість.** Розроблено та передано спеціалістам Укрзалізниці для впровадження технічне рішення із заходами, які мають виконуватися під час експлуатації та ремонтів електропоїздів вказаних серій з корпусами тягових редукторів зварної конструкції виробництва КЕВРЗ.

Ключові слова: розрахункові моделі; теоретичні розрахунки; електропоїзди серій ЕР2, ЕР9; моторний візок; тяговий редуктор; показники міцності

Вступ

Досвід експлуатації моторвагонними депо України електропоїздів серій ЕР2, ЕР9 з корпусами тягових редукторів литої конструкції показав, що їх певна кількість була зруйнована (рис. 1). У більшості випадків причиною руйнувань є накопичення пошкоджень від втоми як через неякісне виготовлення литих конструкцій, так і наявність отворів для з'єднання половин корпусу. Такі випадки спостерігалися в електропоїздах подібних серій, які експлуатуються і на залізницях Росії. Враховуючи те, що поїзди вказаних серій зараз є досить поширеними на

залізницях України, спеціалістам КЕВРЗ та науковцям університету було доручено впровадити заходи з виготовлення корпусів тягових редукторів зварної конструкції [9, 12]. При цьому виробничу діяльність мав здійснювати КЕВРЗ, а університет – науковий супровід вказаних робіт.

Мета

Метою дослідження є науковий супровід робіт із розробки і виготовлення корпусів тягових редукторів зварної конструкції та впровадження їх в експлуатацію на електропоїздах серій ЕР2, ЕР9.

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

Методика

Для реалізації зазначеної мети було необхідно: провести теоретичні дослідження напружено-деформованого стану корпусу тягового редуктора шляхом моделювання найбільш гострих, з точки зору навантаженості, ситуацій; виконати експериментальну оцінку рівнів напружень та встановити відповідність показників міцності вимогам Норм [10].

Питанням дослідження навантаженості елементів тягових передач тягового та моторвагонного рухомого складу, у тому числі й тягових редукторів, присвячено багато наукових публікацій. Зокрема, слід відмітити праці вчених, надруковані в Росії [1, 2, 3, 4], Україні [5–7], а також інших державах [13–14].

Результати

Згідно з вимогами чинної нормативної документації [10] корпус тягового редуктора повинен проектуватися з урахуванням впливу на нього таких видів навантаження:

- навантаження від перекосу підвіски редуктора при зміщенні колісної пари під дією вагона та балки центрального підвішування;
- навантаження від передачі тягового (гальмового) моменту та низькочастотних крутильних коливань;
- навантаження від фрикційних автоколивань при буксуванні;
- динаміки необресорених мас;
- динаміки зубчатого зачеплення.



Рис. 1. Загальний вигляд зруйнованих литих корпусів тягових редукторів

Для зниження впливу на корпус та інші деталі редуктора динаміки необресорених мас та динаміки зубчатого зачеплення необхідно забезпечити виконання таких вимог:

- корпус редуктора не повинен мати локальних зон, частота вільних коливань яких дорівнює частоті пересполучення або подвійній

частоті пересполучення при швидкостях руху від 40 км/год до конструктивної швидкості;

- корпуси рекомендується виконувати моноблочними. У тягових редукторах рекомендується застосування косозубої (з кутом нахилу зубів $4^\circ \dots 7^\circ$) або шевронної зубчастої передачі. В обґрунтованих випадках можливе використання прямозубої передачі.

Навантаженість елементів тягового привода визначається:

- спільною дією крутного моменту, що передається, у годинному режимі або в режимі реостатного (рекуперативного) гальмування, динамічного крутного моменту та сил, що виникають при радіальному розцентруванні та осьовому переміщенні валів;

- навантаженням від фрикційних автоколивань при буксуванні.

На рис. 2 зображено розроблену модель корпусу редуктора [11, 12], а на рис. 3 – його скінченно-елементні розрахункові схеми [8, 11].



Рис. 2. Модель корпусу тягового редуктора

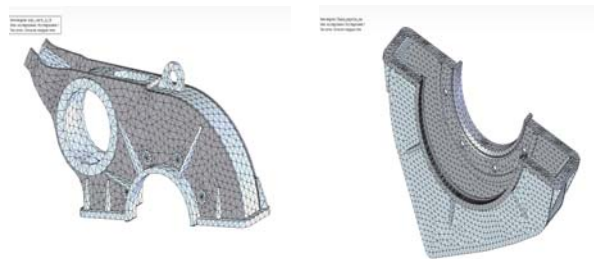


Рис. 3. Розрахункові скінченно-елементні схеми корпусу редуктора

Ця схема містить 90 000 скінченних елементів, 168 013 вузлів з'єднання цих елементів та 502 605 степенів вільності.

На рис. 4–5 наведено розташування місць закріплень та прикладання навантажень.

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

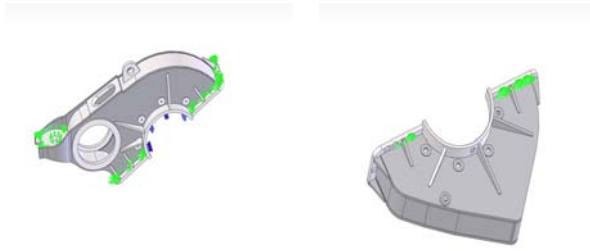


Рис. 4. Місця закріплення корпусу редуктора

Найбільші рівні напружень визначалися шляхом моделювання експлуатаційних ситуацій, які призводять до створення найбільших рівнів навантажень. Було розглянуто: режим зрушення електропоїзда з місця; режим зрушення та створення при цьому кругового вогню в колекторно-щітковому блоці, при якому виникають динамічні ударні навантаження тягового моменту; рух у режимі тяги на швидкості 100 км/год та створення горизонтальних поперечних сил на рівні граничних за Нормами [10] значень.

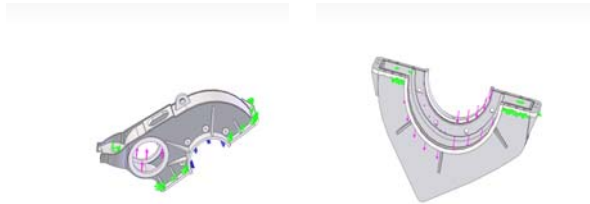


Рис. 5. Місця прикладання навантаження

Під час виконання розрахунків приймалися такі значення навантажень. При моделюванні зрушення електропоїзда з місця величина зусилля, яке передається на підшипникові вузли верхньої та нижньої частин корпусу тягового редуктора від взаємодії зубчатої передачі, дорівнює 50 кН. У випадку появи кругового вогню в колекторно-щітковому блоці створюються динамічні навантаження, які перевищують статичні та квазістатичні величини в декілька разів. Тому при визначенні показників міцності для цього випадку приймалося, що коефіцієнт динаміки $K_d = 6$, і, таким чином, зусилля взаємодії в зубчатій передачі будуть дорівнювати 300 кН.

Горизонтальна поперечна рамна сила, відповідно до граничного за Нормами [10] значення, становить $H_{\max} = 0,4P_{\text{СТ}}$. Під час визначен-

ня H_{\max} приймалося, що вага порожнього моторного вагона складає 592 кН, до цього додамо вагу від пасажирів у розмірі 80 кН, і таким чином отримаємо, що на вісь колісної пари припадає 168 кН. У такому разі $H_{\max} = 67,2$ кН. Зусилля в зубчатій передачі при швидкості руху 100 км/год дорівнює 28,8 кН.

Нижче на рис. 6–8 наведено поля розподілу напружень у корпусі тягового редуктора при моделюванні вищезазначених ситуацій.

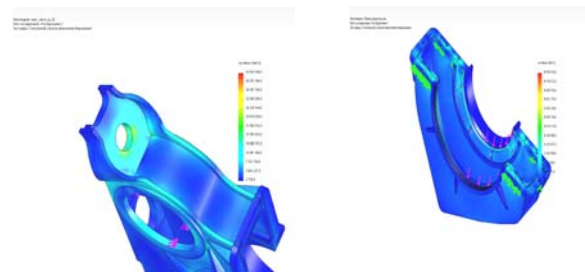


Рис. 6. Поля розподілу напружень при зрушенні електропоїзда з місця

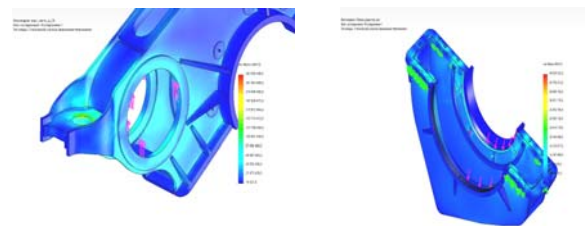
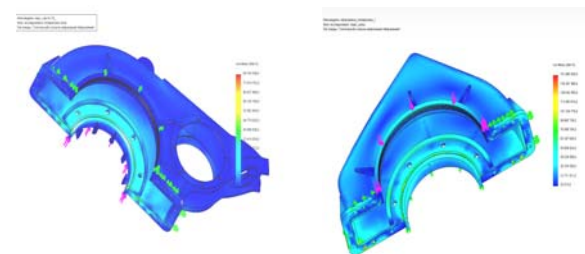


Рис. 7. Поля розподілу напружень при зрушенні електропоїзда з місця та створенні кругового вогню у колекторно-щітковому блоці

Рис. 8. Поля розподілу напружень від дії горизонтальної поперечної сили $H_{\max} = 0,4P_{\text{СТ}}$

Під час аналізу отриманих результатів розрахунків з визначення найбільших рівнів напружень, які створюються в елементах корпусу тягового редуктора, було виявлено:

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

1. У випадку звичайних експлуатаційних режимів руху – зрушення електропоїзда з місця, рух у режимі тяги зі швидкостями до 100 км/год в прямих, рух у режимі тяги зі швидкостями до 100 км/год в кривих (при дії граничної за нормами горизонтальної поперечної сили) – напруження змінюються в межах від 30 до 100 МПа.

2. При моделюванні виникнення кругового вогню в колекторно-щітковому блоці та значенні коефіцієнта динамічності $K_d = 6$ найбільші значення напружень з короткочасною дією (десяти частки секунди) у місці розташування одного з отворів болтового з'єднання половин корпусів редуктора досягли 210 МПа.

У звичайних умовах експлуатації електропоїздів з корпусами редукторів зварної конструкції КЕВРЗ найбільші рівні напружень в елементах їх корпусів не перевищують 100 МПа, що значно менше границі текучості для сталі марки 09Г2 – 295 МПа. При цьому величина коефіцієнта запасу міцності відносно границі текучості дорівнює $n_T = 2,95$ при допустимому значенні $[n] = 2$.

Щоб зробити остаточні висновки про можливість введення в експлуатацію корпусів тягових редукторів зварної конструкції, було проведено ще й міцнісні ходові випробування з метою визначення: навантажень у вузлі кріплення корпусу до рами візка; напруженого стану корпусу тягового редуктора та його вертикальних прискорень.

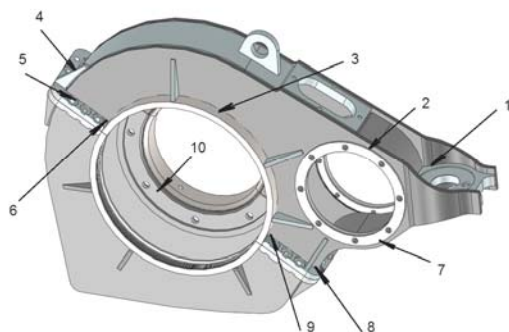


Рис. 9. Місця встановлення вимірювальних пристроїв

На рис. 9–12 зображено вимірювальні пристрої, місця їх встановлення та реєструвальну й оброблювальну апаратуру.

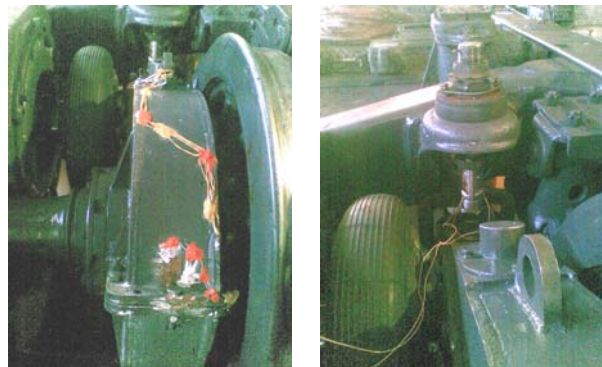


Рис. 10. Тяговий редуктор з вимірювальними пристроями



Рис. 11. Реєструвальна та оброблювальна апаратура

У табл. 1 наведено позначення вимірювальних пристроїв (Т – тензорезистори для вимірювання напружень, ТР1, ТР2 – тензорезистори для вимірювання зусиль у болті кріплення корпусу тягового редуктора до рами візка, a_z – датчик вимірювання прискорень) та величини напружень у відповідних точках, які було отримано в розрахунках за МСКЕ.

За наведеними прикладами осцилограм зміни зареєстрованих під час дослідної поїздки процесів (рис. 12–14) можна зробити такі висновки. Під час проїзду стрілочного перевалу в режимі вибігу (див. рис. 12) на збурювальній дії його нерівностей відреагували всі датчики. Але суттєвого зростання зусиль та напружень не відбулося. При цьому під час реалізації процесів зміни напружень у точках Т61Х, Т61Z спостерігаються високочастотні вібрації.

Таблиця 1

Позначення вимірювальних пристроїв та найбільші значення напружень

| № точок контролю | Величини головних напружень σ_{\max} , МПа | Місця встановлення датчика прискорень, а також тензорезисторів та їх позначення | | | | |
|------------------|---|---|------|------|-----------------------------|--------------|
| | | Корпус тягового редуктора | | | Болт підвішування редуктора | Бічна стінка |
| 2 | 81 | T41Z | T41Y | — | — | — |
| 5 | 123 | — | T42Y | — | — | — |
| | | T51Z | — | T51X | — | — |
| 6 | 93 | — | — | T52X | — | — |
| | | T61Z | — | T61X | — | — |
| 9 | 66 | — | — | T92X | — | — |
| 11 | — | — | — | — | TP1 | — |
| 12 | — | — | — | — | TP2 | — |
| 13 | — | — | — | — | — | a_z |

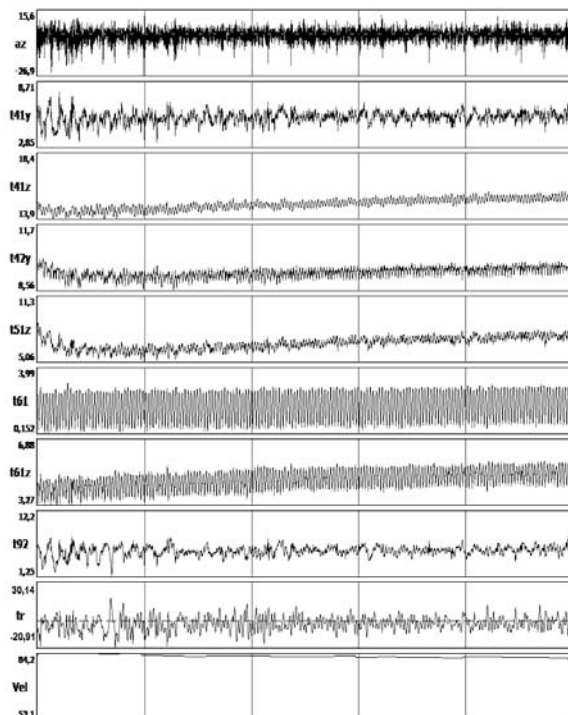


Рис. 12. Рух на вибігу по стрілочному переводу, швидкість 80 км/год

У режимі тяги на корпус передається височастотна вібрація (див. рис. 13), до якої найбільш чутливими є датчики T41Y, T41Z, T51.

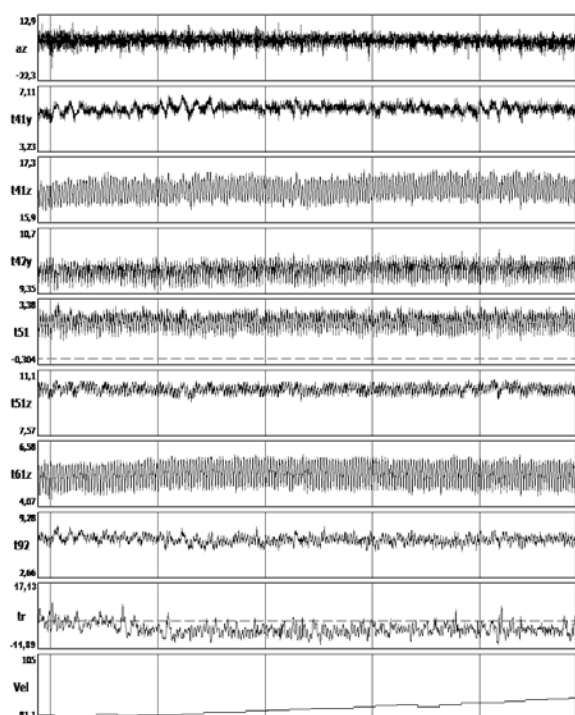


Рис. 13. Набір тяги в кривій радіуса 925 м, швидкість 85 км/год

На гальмування реагують практично всі тензорезистори, які призначені для визначення напружень, а також зусиль у болті приєднання корпусу редуктора до рами візка (див. рис. 14).

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

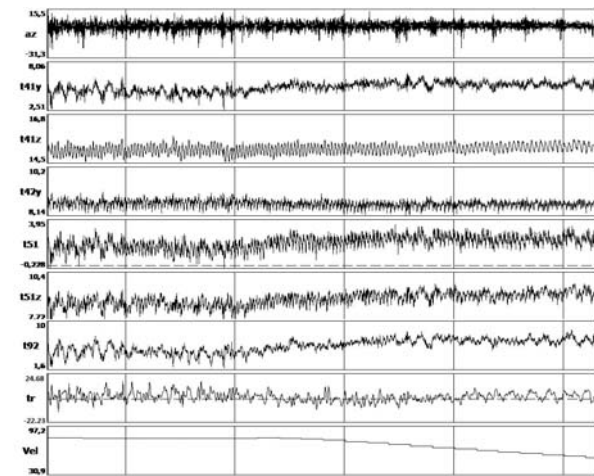


Рис. 14. Гальмування, вхід у криву радіуса 1 600 м, швидкість 90 км/год

На рис. 15–21 наведено приклади амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) зареєстрованих процесів під час руху на вибігу та в режимі набору тяги.

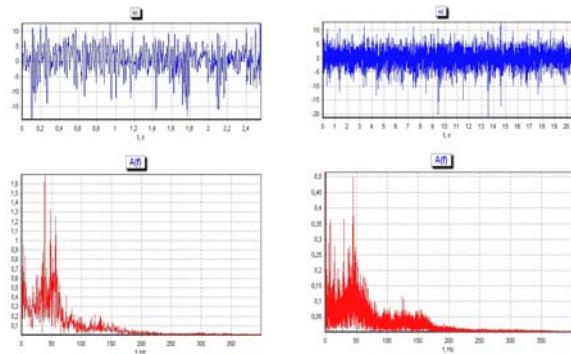


Рис. 15. АЧХ вертикальних прискорень під час руху на вибігу та в режимі набору тяги

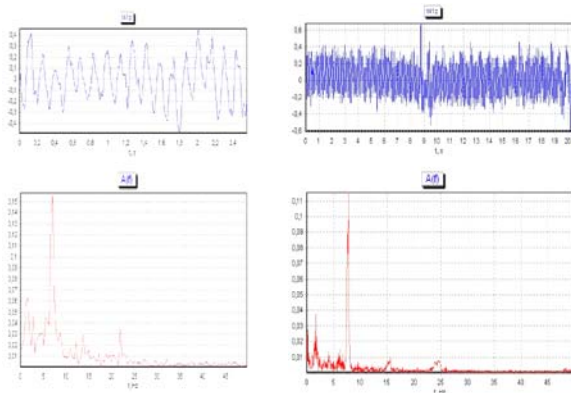


Рис. 16. АЧХ процесу зміни напружень по тензорезистору Т41З під час руху на вибігу та в режимі тяги

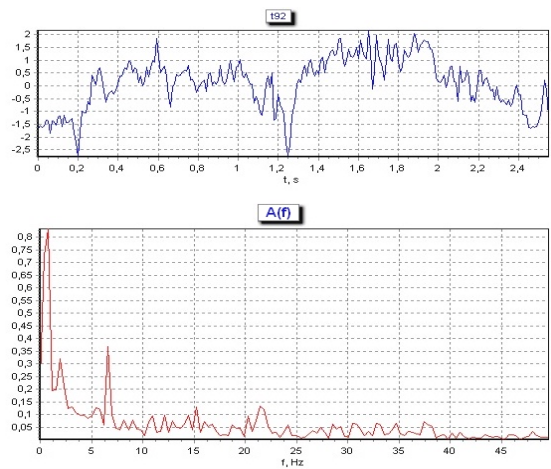


Рис. 17. АЧХ процесу зміни напружень по тензорезистору Т92З під час руху на вибігу

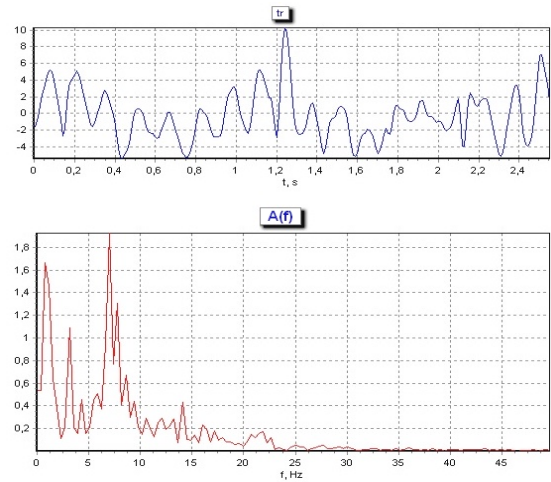


Рис. 18. АЧХ процесу зміни зусиль у болти закріплення тягового редуктора до рами візка ТР під час руху на вибігу

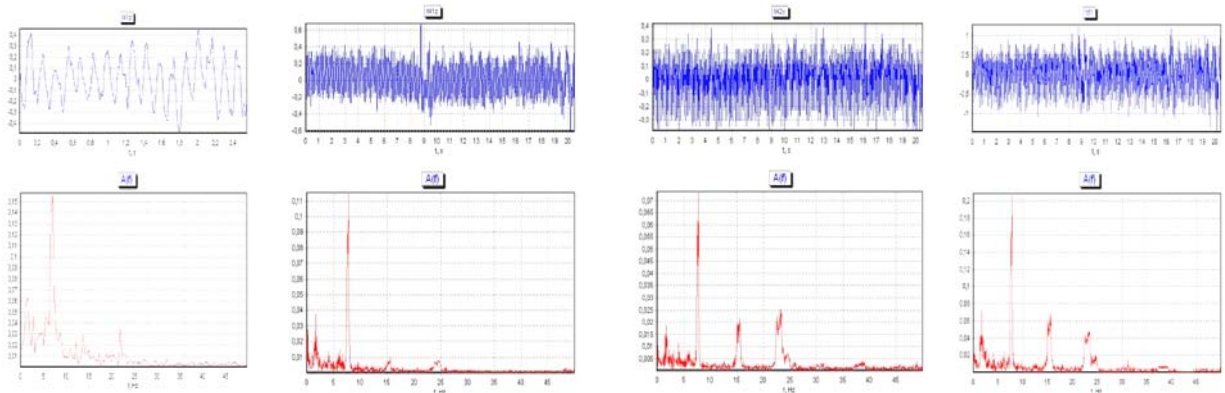


Рис. 19. АЧХ процесу зміни напружень по тензорезисторах Т42У, Т51 під час руху в режимі набору тяги

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

Проаналізувавши наведені рисунки (див. рис. 15–19) для АЧХ, можемо зробити такі висновки. У спектрі частот вертикальних прискорень корпусу тягового редуктора (рис. 15) при переході в режим тяги додаються високочастотні складові, які є результатом взаємодії зубів зубчастої передачі. Основні несучі частоти вертикальних прискорень змінюються в діапазоні 37...60 Гц.

Подібне спостерігається і за тензорезистором Т41Z (рис. 16). Основні частоти процесу за цим датчиком змінюються в діапазоні 6,25...7,5 Гц.

У точці Т92Z (рис. 18) під час руху на вибігу резонансною є частота 1,1 Гц.

У болті кріплення корпусу тягового редуктора до рами візка під час руху на вибігу (рис. 18) резонансні частоти становлять 1,25 та 7,5 Гц.

У точках Т42У та Т51 під час руху в режимі набору тяги (рис. 19) спостерігаються три резонансні частоти 7,5, 15,5 та 23,3 Гц.

Нижче в табл. 2–6 наведено результати статистичної обробки вимірних значень вищевказаних величин, а саме: найбільші значення; середні значення та середньоквадратичні відхилення (s). У наведених таблицях верхнє значення відповідає рухові у прямих, а нижнє – у кривих.

Таблиця 2

Значення прискорень, м/с^2 , корпусу редуктора на прямих/кривих ділянках

| V , км/год | Тяга | | | Вибіг | | | Гальмування | | |
|-----------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------------|---------------------|---------------|-----------------------|---------------------|--------------|
| | Найбільші значення | Середні значення | s | Найбільші значення | Середні значення | s | Найбільші значення | Середні значення | s |
| 20 | 31,95 – | 20,20 – | 5,90 – | 30,80 23,11 | 21,30 23,11 | 4,80 3,740 | – – | – – | – – |
| 40 | 28,16 33,75 | 18,60 20,60 | 4,80 6,50 | 29,31 29,94 | 24,10 22,47 | 2,60 3,74 | 25,67 24,23 | 20,90 24,23 | 2,40 0,00 |
| 60 | 28,93 26,62 | 20,0 22,79 | 4,50 1,91 | 27,23 28,45 | 19,60 24,02 | 3,80 2,22 | 22,50 23,29 | 18,20 23,29 | 2,10 0,00 |
| 80 | 23,80 17,82 | 16,30 17,53 | 3,70 0,15 | 28,20 13,73 | 18,70 13,73 | 4,70 0,00 | – – | – – | – – |
| 100 | 21,49 – | 16,50 – | 2,00 – | 23,40 21,58 | 15,20 21,58 | 4,10 0,00 | – – | – – | – – |

Таблиця 3

Значення напружень, МПа, за датчиком Т51 на прямих/кривих ділянках

| V , км/год | Тяга | | | Вибіг | | | Гальмування | | |
|-----------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------------|---------------------|--------------|
| | Найбільші значення | Середні значення | s | Найбільші значення | Середні значення | s | Найбільші значення | Середні значення | s |
| 20 | 3,28 – | 2,30 – | 0,50 – | 2,71 1,86 | 1,70 1,86 | 0,47 0,00 | – – | – – | – – |
| 40 | 1,60 1,78 | 1,03 1,41 | 0,32 0,36 | 2,13 2,85 | 1,34 2,32 | 0,39 0,27 | 1,21 2,47 | 1,17 2,47 | 0,02 0,00 |
| 60 | 1,77 2,52 | 1,28 1,80 | 0,24 0,36 | 1,61 4,07 | 1,27 2,07 | 0,17 1,00 | 3,50 2,28 | 1,94 2,28 | 0,78 0,00 |

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

Закінчення табл. 3

| V , км/год | Тяга | | | Вибіг | | | Гальмування | | |
|-----------------|----------------------------|---------------------|------|----------------------------|---------------------|------|----------------------------|---------------------|-----|
| | Найбі- льші значення | Середні значення | s | Найбі- льші значення | Середні значення | s | Найбі- льші значення | Середні значення | s |
| 80 | 2,24 | 1,35 | 0,44 | 2,12 | 1,47 | 0,32 | — | — | — |
| | 1,71 | 1,56 | 0,08 | 1,33 | 1,33 | 0,00 | — | — | — |
| 100 | 1,94 | 1,47 | 0,23 | 1,52 | 1,29 | 0,11 | — | — | — |
| | — | — | — | 1,71 | 1,71 | 0,00 | — | — | — |

Таблиця 4

Значення напружень, МПа, за датчиком Т61 на прямих/кривих ділянках

| V , км/год | Тяга | | | Вибіг | | | Гальмування | | |
|-----------------|------------------------------|---------------------|------|----------------------------|---------------------|------|----------------------------|---------------------|------|
| | Найбіль- ші зна- чення | Середні значення | s | Найбі- льші значення | Середні значення | s | Найбі- льші значення | Середні значення | s |
| 20 | 0,93 | 0,55 | 0,19 | 0,60 | 0,40 | 0,00 | — | — | — |
| | — | — | — | 0,68 | 0,68 | 0,00 | — | — | — |
| 40 | 1,34 | 1,10 | 0,10 | 1,51 | 1,10 | 0,16 | 1,36 | 1,20 | 0,00 |
| | 1,18 | 1,18 | 0,00 | 1,35 | 1,31 | 0,02 | 1,48 | 1,48 | 0,00 |
| 60 | 1,49 | 1,29 | 0,10 | 1,44 | 1,30 | 0,07 | 1,50 | 1,44 | 0,00 |
| | 1,69 | 1,41 | 0,14 | 1,51 | 1,39 | 0,06 | 2,05 | 2,05 | 0,00 |
| 80 | 1,60 | 1,44 | 0,00 | 2,20 | 1,59 | 0,31 | — | — | — |
| | 1,58 | 1,58 | 0,06 | 1,41 | 1,41 | 0,00 | — | — | — |
| 100 | 1,71 | 1,52 | 0,09 | 1,69 | 1,52 | 0,00 | — | — | — |
| | — | — | — | 1,49 | 1,49 | 0,80 | — | — | — |

Таблиця 5

Значення напружень, МПа, за датчиком Т92 на прямих/кривих ділянках

| V , км/год | Тяга | | | Вибіг | | | Гальмування | | |
|-----------------|------------------------------|---------------------|------|------------------------------|---------------------|------|------------------------------|---------------------|------|
| | Найбіль- ші зна- чення | Середні значення | s | Найбіль- ші зна- чення | Середні значення | s | Найбіль- ші зна- чення | Середні значення | s |
| 20 | 4,94 | 3,50 | 0,54 | 5,46 | 3,59 | 0,94 | — | — | — |
| | — | 5,00 | — | 4,64 | 4,64 | 0,00 | — | — | — |
| 40 | 3,20 | 1,86 | 0,67 | 3,56 | 2,26 | 0,65 | 2,31 | 1,86 | 0,22 |
| | 3,97 | 2,79 | 0,59 | 6,50 | 4,37 | 1,06 | 1,48 | 1,48 | — |
| 60 | 3,22 | 2,11 | 0,55 | 2,96 | 2,16 | 0,40 | 3,40 | 2,50 | 0,45 |
| | 4,50 | 3,20 | 0,65 | 4,14 | 3,07 | 0,54 | 2,05 | 2,05 | 0,00 |
| 80 | 3,48 | 2,08 | 0,70 | 3,71 | 2,42 | 0,64 | — | — | — |
| | 3,92 | 3,00 | 0,45 | 2,21 | 2,21 | 0,00 | — | — | — |
| 100 | 3,29 | 2,41 | 0,44 | 2,22 | 2,07 | 0,08 | — | — | — |
| | — | — | — | 3,23 | 3,23 | 0,00 | — | — | — |

Таблиця 6

Значення зусиль, кН, у болті кріплення корпусу тягового редуктора до рами візка за датчиками TP1, TP2 на прямих/кривих ділянках

| V , км/год | Тяга | | | Вибіг | | | Гальмування | | |
|-----------------|--------------------|------------------|------|--------------------|------------------|------|--------------------|------------------|------|
| | Найбільші значення | Середні значення | s | Найбільші значення | Середні значення | s | Найбільші значення | Середні значення | s |
| 20 | 25,84 | 17,98 | 3,93 | 23,27 | 16,53 | 3,37 | – | – | – |
| | – | – | – | 33,31 | 33,31 | 0,00 | – | – | – |
| 40 | 14,94 | 15,61 | 3,30 | 18,72 | 11,98 | 3,37 | 14,58 | 9,93 | 2,32 |
| | 19,96 | 16,84 | 1,56 | 25,61 | 24,97 | 0,32 | 17,98 | 17,98 | – |
| 60 | 17,76 | 10,11 | 3,83 | 11,84 | 9,15 | 1,35 | 19,13 | 12,04 | 3,55 |
| | 18,88 | 17,07 | 0,91 | 25,08 | 17,26 | 3,91 | 14,47 | 14,47 | 0,00 |
| 80 | 22,44 | 12,21 | 5,11 | 23,35 | 13,14 | 5,10 | – | – | – |
| | 15,94 | 11,96 | 0,39 | 9,60 | 9,60 | 0,00 | – | – | – |
| 100 | 15,76 | 12,10 | 1,80 | 14,57 | 11,60 | 1,48 | – | – | – |
| | – | – | 2,00 | 21,71 | 21,71 | 0,00 | – | – | – |

У результаті отримали такі найбільші значення напружень, МПа, для датчиків:

| | |
|--------------|-------|
| T51 | 4,07 |
| T61 | 2,05 |
| T92 | 6,50 |
| TP, кН | 33,31 |

Наукова новизна та практична значимість

На підставі експериментальних та теоретичних досліджень виконано науковий супровід робіт з розробки та введення в експлуатацію оновлених тягових редукторів для електропоїздів серій EP2, EP9.

Розроблено та передано спеціалістам Укрзалізниці для впровадження технічне рішення із заходами, які мають виконуватися під час експлуатації та ремонтів електропоїздів вказаних серій з корпусами тягових редукторів зварної конструкції КЕВРЗ.

Впровадження в експлуатацію корпусів тягових редукторів зварної конструкції буде сприяти покращенню показників міцності та стану безпеки руху електропоїздів вказаної серії.

Висновки

З аналізу експериментальних даних випливає, що найбільші значення напружень, отриманих під час проведення звичайної графікової поїздки

електропоїзда, виявилися невеликими та значно меншими аналітично визначених при моделюванні нештатних аварійних ситуацій. За визначеними величинами напружень, створюваних в корпусі зварної конструкції тягового редуктора, виготовленого та встановленого на моторному вагоні електропоїзда серії EP9П, впливає, що коефіцієнти запасу міцності в найбільш напружених точках не перевищують нормативних значень. Тому було запропоновано вважати за доцільне розглянути питання про впровадження в серійне виробництво вказаного корпусу тягового редуктора для використання в тягових редукторах електропоїздів серії EP2, EP9П, EP9М, EP9Е.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бирюков, И. В. Анализ износов зубчатых колес тяговой передачи электропоездов и их влияние на динамические нагрузки редукторного узла / И. В. Бирюков, С. Д. Крушев // Исслед. работы оборудования подвижного состава : межвуз. сб. / МИИТ. – М., 1978. – Вып. 605. – С. 69–75.
2. Бирюков, И. В. Динамические нагрузки тяговых приводов, вызванные пересопряжением зубьев тягового редуктора ЭПС / И. В. Бирюков, С. Д. Крушев // Вестн. машиностроения. – 1981. – № 2. – С. 43–44.
3. Бирюков, И. В. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак. – М. : Транспорт, 1992. – 440 с.

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

4. Бирюков, И. В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И. В. Бирюков, А. И. Беляев, Е. К. Рыбников. – М. : Транспорт, 1986. – 255 с.
5. Бондарев, О. М. Визначення умов розташування тягового редуктора, які забезпечують найменші рівні розцентрувань осей тягової передачі рухомого складу / О. М. Бондарев, А. І. Жулай, О. О. Бондарев // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27. – С. 7–9.
6. Бондарев, О. М. Експериментальне визначення динамічної навантаженості елементів тягового привода локомотива / О. М. Бондарев // Підйомно-трансп. техніка. – 2008. – № 1. – С. 32–40.
7. Бондарев, О. М. Оцінка впливу конструктивних особливостей тягового привода локомотива на напружений стан його елементів / О. М. Бондарев // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 29. – С. 11–26.
8. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 271 с.
9. Концепція Державної програми реформування заліз. трансп. від 27 грудня 2006 р. № 651-р [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://uz.gov.ua/press_center/latest_news/archive/main_news/221561/. – Назва з екрану.
10. Нормы расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств экипажной части моторвагонного подвижного состава железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – М. : ВНИИЖТ РФ, 1997. – 147 с.
11. Потемкин, А. Твердотельное моделирование в системе КОМПАС-3D. Серия «Мастер решений» / А. Потемкин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 512 с.
12. Руководство по устройству электропоездов серии ЕД9М, ЕД9Т, ЕР9П. – М. : Центр Коммерческих Разраб., 2005. – 128 с.
13. Madej, J. Mechanika napędu pojazdów szynowych z elektrycznymi silnikami trakcyjnymi / J. Madej. – Warszawa : Państwowe wydawnictwo naukowe, 1983. – 347 p.
14. Ohyano, Tadao. Some problems of the fundamental adhesion at higher speeds / Tadao Ohyano // Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute. – 1973. – № 3. – P. 181–187.
15. Osieski, J. Drgania skretne układów napędowych ze sprzęgłami kardana wtracinyńch pojazdach szynowych / J. Osieski // Archiwum Budowy Maszyn. – 1965. – 12 p.

А. М. БОНДАРЕВ^{1*}, Д. А. ЯГОДА¹, А. А. БОНДАРЕВ², В. М. СКОБЛЕНКО²

¹Каф. «Строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел./ факс +38 (056) 793 19 08, эл. почта onildpps@gmail.com

²Государственная администрация железнодорожного транспорта Украины, ул. Тверская, 5, 49150, Киев, Украина

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ КОРПУСОВ ТЯГОВЫХ РЕДУКТОРОВ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ КЭВРЗ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ СЕРИЙ ЭР2, ЭР9

Цель. Проверка соответствия требованиям Норм [10] экспериментальных образцов тяговых редукторов для электропоездов серий ЭР2, ЭР9 с корпусами сварной конструкции производства Киевского электровагоноремонтного завода (КЭВРЗ). **Методика.** Для достижения поставленной цели были разработаны расчетные модели для теоретического определения уровней напряжений в корпусе тягового редуктора сварной конструкции путем моделирования нагруженности, которая может создаваться в условиях эксплуатации, и экспериментально оценены напряжения в разных точках корпуса тягового редуктора, а также уровни вертикальных ускорений корпуса тягового редуктора и нагруженности узла прикрепления корпуса к раме тележки. **Результаты.** На основании анализа полученных результатов расчетов было установлено соответствие требованиям Норм тяговых редукторов с корпусами сварной конструкции КЭВРЗ. **Научная новизна.** На основании экспериментальных и теоретических исследований выполнено научное сопровождение работ по разработке и вводу в эксплуатацию обновленных тяговых редукторов для электропоездов серий ЭР2, ЭР9. **Практическая значимость.** Разработано и передано специалистам Укрзализныци техническое решение с мерами, которые должны выполняться при эксплуатации и ремонте электропоездов указанных серий с корпусами тяговых редукторов сварной конструкции КЭВРЗ.

Ключевые слова: расчетные модели; теоретические расчеты; электропоезда серий ЭР2, ЭР9; моторная тележка; тяговой редуктор; показатели прочности

O. M. BONDAREV^{1*}, D. O. YAGODA¹, O. O. BONDAREV², V. M. SKOBLLENKO²¹*Dep. «Structural Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel./fax +38 (056) 793 19 08, e-mail onildpps@gmail.com²The State Administration of Railway Transport in Ukraine, Tverska Str., 5, Kyiv, Ukraine

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF STRENGTH INDICES FOR TRACTION REDUCTION-GEAR HOUSINGS OF WELDED CONSTRUCTION KEVRZ FOR ELECTRIC TRAINS ER2, ER9

Purpose. To check meeting the requirements of Standards for experimental specimens of traction gear boxes for electric trains of series ER2, ER9 with housings of welded construction by Kiev Electric Wagon Repair Works (KEVRZ). **Methodology.** To reach the objective in hand, performing the work, some computational models for theoretical determination of the stress levels in the reduction-gear housing of welded construction by simulating the loading conditions that can take place during the operation have been developed and the stresses at different points of the reduction-gear housing as well as the levels of vertical accelerations of the reduction-gear housing and loading of the unit of connecting the housing to the bodies frame have been experimentally evaluated. **Findings.** On the basis of analysis of the calculation results obtained meeting the requirements of Standards for traction reduction gears with the housings of welded construction by KEVRZ has been found. **Originality.** Based on the experimental and theoretical investigations, the scientific support of works on developing and putting into operation the renovated traction reduction gears for electric trains of series ER2, ER9 has been completed. **Practical value.** A technical solution with the measures to be fulfilled in operation of electric trains of the mentioned series with traction reduction-gear housings of welded construction by KEVRZ has been developed and given to experts of Ukrzaliznytsia to introduce the proposed measures during repairs.

Keywords: computational models; theoretical calculations; electric trains of series ER2, ER9; motor bogie; traction reduction gear; strength indices

REFERENCES

1. Biryukov I.V., Krushev S.D. Analiz iznosov zubchatykh koles tyagovoy peredachi elektropoyezdov i ikh vliyaniye na dinamicheskiye nagruzki reduktornogo uzla [Analysis of wears of traction transmission gear wheels for electric trains and their effect on the dynamic loads of reduction assembly]. *Issledovaniye raboty oborudovaniya podvizhnogo sostava* [The study of the equipment of the rolling stock], 1978, issue 605, pp. 69-75.
2. Biryukov I.V., Krushev S.D. Dinamicheskiye nagruzki tyagovykh privodov, vyzvannyye peresopryazheniyem zubyev tyagovogo reduktora EPS [Dynamic loads of traction gears caused by excessive conjugation of the traction reduction gear teeth for electric rolling stock]. *Vestnik mashinostroyeniya – Bulletin of mechanical engineering*, 1981, no. 2, pp. 43-44.
3. Biryukov I.V., Savoskin A.N., Burchak G.P. *Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical part of traction rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1992. 440 p.
4. Biryukov I.V., Belyayev A.I., Rybnikov Ye.K. *Tyagovyye peredachi elektropodvizhnogo sostava zheleznikh dorog* [Traction drives of electric rolling stock of railways]. Moscow, Transport Publ., 1986. 255 p.
5. Bondarev O.M., Zhulay A.I., Bondarev O.O. Vyznachennia umov roztashuvannia tiahovoho reduktora, yaki zabezpechuiut naimenshi rivni roztcentruvan osei tiahovoi peredachi rukhomoho skladu. [Determination of conditions of traction reduction gear arrangement providing the lowest decentering levels of axles for rolling stock traction transmission]. *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 27, pp. 7-9.
6. Bondarev O.M. Eksperymentalne vyznachennia dynamichnoi navantazhenosti elementiv tiahovoho pryvoda lokomotyva [Experimental determination of dynamic loading of locomotive traction drive parts]. *Pidiomno-transportna tekhnika – Hoisting-and-conveying equipment*, 2008, no. 1, pp. 32-40.
7. Bondarev O.M. Otsinka vplyvu konstruktivnykh osoblyvostei tiahovoho pryvoda lokomotyva na napruzheniy stan yoho elementiv [Estimation of influence of design features of locomotive traction drive on the stress state of its parts]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika*

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

- V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 29, pp.11-26.
8. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite elements method in technology]. Moscow, Mir Publ., 1975. 271 p.
 9. *Kontsepsiia Derzhavnoi prohramy reformuvannia zaliznychnoho transportu* [Concept of the State Program of Reforming the Railway Transport]. Available at: http://uz.gov.ua/press_center/latest_news/archive/main_news/221561/ (Accessed 17 June 2013).
 10. *Normy rascheta i otsenki prochnosti nesushchikh elementov i dinamicheskikh kachestv ekipazhnoy chasti motorvagonnogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog MPS RF kolei 1520 mm* [Standards for calculating and assessing the strength of load-bearing members and riding qualities of the vehicle part of motor car rolling stock of railways of the Russian Federation Ministry of Railways of the track gauge 1520 mm]. Moscow, VNIIZhT RF Publ., 1997. 147 p.
 11. Potemkin A. *Tverdotelnoye modelirovaniye v sisteme KOMPAS-3D. Seriya "Master resheniy"* [Solid Modeling in KOMPAS-3D System. Series "Master of Solutions"]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2004. 512 p.
 12. *Rukovodstvo po ustroystvu elektropoyezdov serii YeD9M, YeD9T, YeR9P* [Manual on Electric Trains Designs of Series ED9M, ED9T, ER9P]. Moscow, Tsentr Kommercheskikh Razrabotok Publ., 2005. 128 p.
 13. Madej J. *Mechanika napedu pojazdow szynowych z elektrycznymi silnikami trakcyjnymi*. Warszawa, Panstwowe wydawnictwo naukowe Publ., 1983. 347 p.
 14. Ohyan Tadao. Some problems of the fundamental adhesion at higher speeds. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*, 1973, no. 3, pp. 181-187.
 15. Osieski J. *Drgania skretne ukladow napedowych ze sprzeqlami cardana wtracyinych pojazdach szynowych. Archiwum Budowy Maszyn*, 1965. 12 p.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. А. Л. Пуларією (Україна); к.т.н., доц. О. Д. Жаковським (Україна)

Надійшла до редколегії 07.05.2013

Прийнята до друку 30.07.2013

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 624.4.015:625.1.032.435

Н. В. БЕЗРУКАВЫЙ^{1*}

^{1*}Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства,
ул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 247 24 55, эл. почта b829@yandex.ua

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ВАГОНА ПРОТИВ СХОДА С РЕЛЬСОВ ПРИ ВПОЛЗАНИИ ГРЕБНЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС

Цель. Учитывая приоритетность безопасности движения на железнодорожном транспорте, поиск факторов, способствующих увеличению коэффициента запаса устойчивости против схода колес с рельсов, является актуальной задачей. Цель данной работы – исследование влияния высокочастотных вибраций на показатель безопасности движения поездов. При этом источником вибрации было колесо с особой формой диска, при которой его жесткость изменяется по гармоническому закону. **Методика.** Для анализа влияния вибрации на изменение значений коэффициента трения использовались методы так называемой вибрационной механики. В данной работе применялся также метод конечных элементов для определения амплитуд вибраций через перемещения точек гребня колеса при упругих деформациях. **Результаты.** Расчетами установлено, что коэффициент запаса устойчивости против схода колес с рельсов в значительной степени зависит от коэффициента трения между колесом и рельсом. В работе показано, что на коэффициент трения в свою очередь оказывают влияние высокочастотные вибрации. В качестве источника вибрации рассмотрено колесо с особой формой диска, рассчитаны параметры, характеризующие вибрацию. Дана количественная оценка изменению коэффициента трения под воздействием вибрации. Научно обосновано влияние высокочастотных вибраций на коэффициент запаса устойчивости против схода колес с рельсов. **Научная новизна.** В работе доказана возможность влияния на коэффициент запаса устойчивости воздействия высокочастотных вибраций. В исследованиях теоретически обосновано повышение безопасности движения поездов при наличии вибраций в зоне контакта гребня колеса с рельсом, вызванных колесом с особой формой диска. **Практическая значимость.** Показано, что применение волнообразной формы диска колеса не представляет угроз для безопасности движения, а наличие высокочастотной вибрации может снизить вероятность схода колеса с рельса.

Ключевые слова: коэффициент запаса устойчивости вагона; коэффициент трения; высокочастотные вибрации

Введение

Главным приоритетом железнодорожного транспорта является обеспечение безопасности при перевозке грузов и пассажиров. Однако, несмотря на все усилия, прилагаемые железными дорогами мира для повышения уровня безопасности движения, крушения поездов продолжают происходить. Основной причиной большинства крушений грузового подвижного

состава является сход колес с рельсов. Как правило, это приводит к значительному материальному ущербу [7] вследствие повреждения подвижного состава и элементов верхнего строения пути, а также порче перевозимых грузов, срыву графика движения поездов и т.д. Исходя из этого, изучение факторов, влияющих на безопасность движения вагона, является приоритетной задачей.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Цель

Цель данной работы – исследование возможности влияния высокочастотных вибраций на процесс схода колес с рельсов. В качестве источника вибрации рассматривается колесо с особой формой диска.

Методика

Одним из основных расчетных показателей безопасности подвижного состава является коэффициент запаса устойчивости вагона против схода с рельсов при вползании гребня колеса на рельс. Для его расчета чаще всего используется выражение, основанное на формуле Надаля [2, 4, 10, 13]:

$$K_{yc} = \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta} \frac{P_v}{P_6}, \quad (1)$$

где β – угол наклона образующей гребня колеса к горизонтальной оси; μ – коэффициент трения поверхности колес по рельсам; P_v – вертикальная динамическая сила, действующая от колеса на головку рельса; P_6 – поперечная боковая сила давления гребня колеса на головку рельса.

Расчетная схема сил, действующих при гребневом контакте колеса с рельсом, изображена на рис. 1.

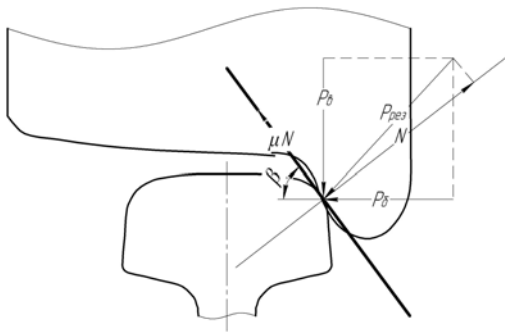


Рис. 1. Расчетная схема действия сил при вползании гребня колеса на рельс

Согласно существующей методике [4, 5], применяемой для определения величины данного показателя, основным фактором, влияющим на безопасность движения, является соотношение вертикальных и горизонтальных сил, действующих на колесную пару. При этом коэффициент трения колес по рельсам, который

также входит в расчетную формулу, принимается постоянным. Для оценки влияния коэффициента трения на коэффициент запаса устойчивости была построена зависимость $K_{yc} = f(\mu)$ (рис. 2), при этом силы, действующие на колесо, приняты постоянными, а их значения взяты по экспериментальным данным испытаний вагонов.

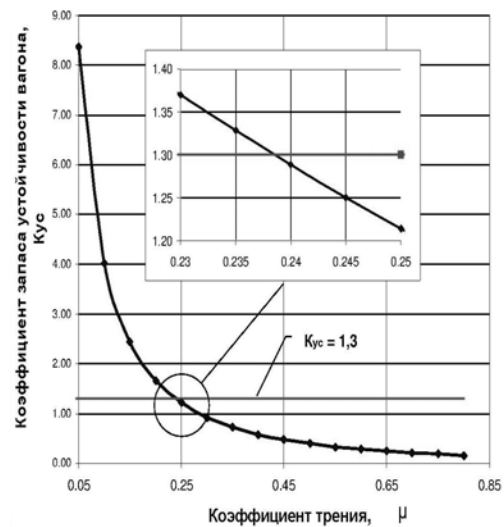


Рис. 2. Зависимость коэффициента запаса устойчивости против схода колес с рельсов от коэффициента трения

Параболический характер полученной кривой свидетельствует о том, что для обеспечения нормативного значения коэффициента запаса устойчивости против схода с рельсов коэффициент трения между гребнем колеса и рельсом должен быть минимальным.

В рассмотренном случае соотношение сил таково, что при коэффициенте трения $\mu = 0,25$ значение коэффициента запаса устойчивости ниже нормативного. Однако из рис. 2 видно, что при уменьшении коэффициента трения до $\mu = 0,235$ (всего на 6 %) условие устойчивости вагона против схода выполняется – $K_{yc} > 1,3$.

Таким образом, даже небольшое изменение коэффициента трения между гребнем колеса и рельсом способно оказать влияние на безопасность движения вагона по критерию схода колес с рельсов. В связи с этим актуальным остается изучение факторов, влияющих на коэффициент трения, а значит, и на безопасность движения поездов.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

На сьогоднішній день значительное число работ посвящено изучению изменения коэффициента трения вследствие применения лубрикации [9, 11, 12]. Однако мало исследовано влияние высокочастотных вибраций на фрикционное взаимодействие между колесом и рельсом, хотя экспериментально доказано и теоретически обосновано уменьшение силы сцепления вибрирующих тел.

Для ясности следует отметить, что в рамках теории вибрационных процессов и устройств как раздела прикладной теории колебаний уже давно занимаются исследованиями влияния вибрации на нелинейные механические системы. Как оказалось, действие вибрации на такие системы может приводить к неожиданным эффектам, которые успешно используются в целом ряде механизмов и машин (виброопоры, вибрационные грохоты и др.) [3]. Среди этих эффектов особый интерес для железнодорожного транспорта представляет уменьшение значения коэффициента трения при воздействии вибраций [6], что, как отмечалось выше, повлечет за собой увеличение коэффициента запаса устойчивости против схода колес с рельсов.

Изменение коэффициента трения при воздействии вибраций было исследовано в работах И. И. Блехмана и Г. Ю. Джанлидзе [1]. Авторами предложено применять в качестве метода решения задач механики, связанных с воздействием вибрации, метод прямого разделения движений.

Для описания изменения сил фрикционного взаимодействия используется понятие об эффективном коэффициенте трения, который определяется как отношение минимального амплитудного значения внешних сил, действующих на тело, к нормальной реакции вибрирующей плоскости.

Для количественной оценки эффективного коэффициента трения при действии вибрации в двух плоскостях (рис. 3) используется формула

$$\mu_{\text{эф}} = \mu_0 \left(1 - \frac{m\omega^2 A_z}{N} - \frac{m\omega^2 A_x}{f_0 N} \right), \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения покоя; m – масса; ω – частота вибрации; A – амплитуда вибрации; N – нормальная реакция опоры.

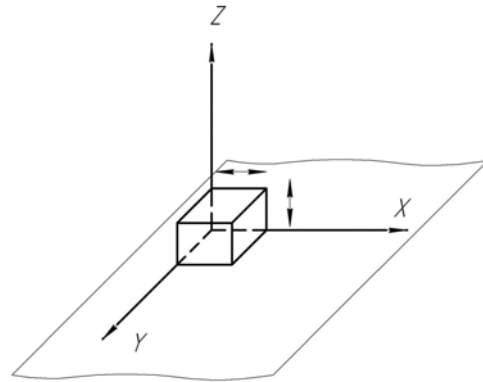


Рис. 3. Схема действия вибрации

В качестве источников вибраций на железнодорожном транспорте могут выступать различные факторы [8] (неровности пути, вращение неуравновешенных масс и пр.). В данных исследованиях была поставлена задача помимо изучения возможности влияния высокочастотных вибраций на коэффициент запаса устойчивости рассмотреть особенности железнодорожных колес с оригинальной формой диска, которые также могут служить источником вибраций. Один из вариантов такого колеса изображен на рис. 4. Рассмотрим более подробно особенности конструкции данных колес. Как известно, недостатком литых колес является их относительно большой вес, оказывающий негативное влияние на рельсовый путь. В целях устранения этого недостатка без потери прочностных качеств в рассматриваемых колесах сделан ряд выемок, обеспечивающих снижение массы колеса. Выемки сделаны таким образом, что толщина диска колеса в районе ступицы изменяется по гармоническому закону.

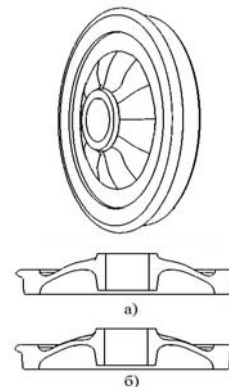


Рис. 4. Колесо с волнообразной формой диска:
а – сечение с максимальной толщиной диска;
б – сечение с минимальной толщиной диска

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

При этом образуется шесть ребер жесткости с максимальной и шесть выемок с минимальной толщиной диска. При качении такого колеса его жесткость в осевом и радиальном направлениях меняется за один оборот шесть раз. Если учесть, что в кривых участках пути, а в некоторых случаях и в прямых, на колесо действуют значительные боковые силы, то вследствие упругих деформаций диска будет происходить некоторое перемещение гребневой зоны, величина которого будет зависеть от толщины сечения диска. Учитывая это, оправданным будет предположение, что вследствие изменения жесткости диска при качении будет возникать вибрация, вызванная различиями перемещений гребневой зоны для сечений с максимальной и минимальной толщиной диска. Данная вибрация будет иметь гармонический характер, а ее частота прямо пропорциональна скорости движения и легко определяется по формуле:

$$\omega = \frac{2nV}{3,6D}, \quad (3)$$

где n – количество волн диска колеса; V – скорость движения, км/ч.

Другой важный параметр вибрации – амплитуду можно найти как половину разности упругих деформаций гребневой зоны для сечений с максимальной и минимальной толщиной диска.

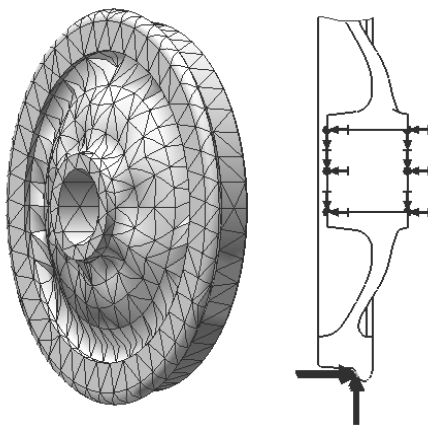


Рис. 5. Конечно-элементная модель и расчетная схема для определения жесткости колеса с волнообразной формой диска

Для расчета перемещений гребневой зоны использовался метод конечных элементов. Была построена конечно-элементная модель,

содержащая порядка 62 000 узлов и 39 000 конечных элементов (рис. 5). При расчетах задавались такие граничные условия:

- ступица колеса неподвижно зафиксирована, моделируя жесткую посадку на ось;
- к гребню приложены вертикальная и горизонтальная силы, моделирующие контакт с рельсом.

Результаты

Так как жесткость колеса, а следовательно, и перемещения изменяются в осевом и радиальном направлениях, то для расчета амплитуд вибраций были поочередно найдены перемещения точек гребня под действием вертикальной и горизонтальной сил для сечений с минимальной и максимальной толщиной диска колеса.

Рассчитанные эпюры перемещений для соответствующих сечений приведены на рис. 6 и рис. 7.

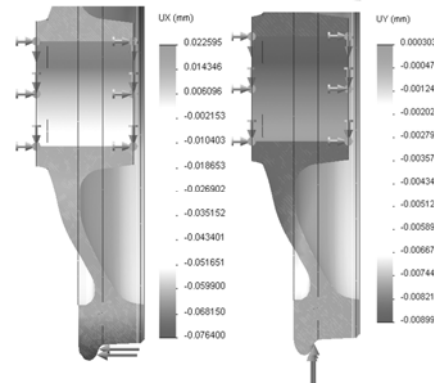


Рис. 6. Эпюры перемещений для сечения с максимальной толщиной диска колеса

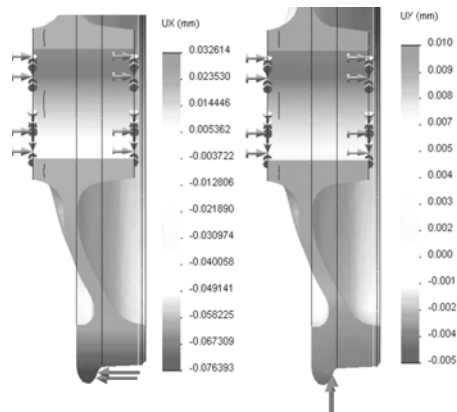


Рис. 7. Эпюры перемещений для сечения с минимальной толщиной диска колеса

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Зная перемещения точек гребня, была определена амплитуда вибраций в осевом и радиальном направлениях. Используя полученные параметры вибрации, в формуле (2) было рассчитано, что при скорости $V = 72$ км/ч вследствие воздействия вибраций коэффициент трения уменьшится на 2,5 %. Поэтому можно сделать вывод, что такая форма колеса не представляет угроз для безопасности движения и даже несколько способствует увеличению коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельсов.

Научная новизна и практическая значимость

В работе рассмотрена возможность влияния высокочастотных вибраций, возникающих в зоне контакта гребня колеса с рельсом, на коэффициент запаса устойчивости вагона против схода с рельсов. Доказано, что волнообразная форма диска колеса не представляет угроз для безопасности движения, а наличие высокочастотной вибрации в зоне контакта гребня колеса с рельсом положительно влияет на безопасность движения вагона.

Выводы

Таким образом, установлено, что при определенных условиях воздействие вибрации оказывает положительный эффект с точки зрения безопасности движения вагонов, а дальнейшее исследование изменения трибологических характеристик контактной пары колесо–рельс является перспективным, поскольку при повышении скоростей движения вибрационные эффекты будут в большей степени влиять на динамику подвижного состава.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Блехман, И. И. Вибрационная механика / И. И. Блехман. – М. : Физматлит, 1994. – 400 с.
- Блохин, Е. П. Графическое представление критерия Надаля / Е. П. Блохин, М. Л. Коротенко, И. В. Клименко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 35. – С. 7–9.
- Вибрации в технике. В 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / [ред. совет В. Н. Челомей]. – М. : Машиностроение, 1981. – 456 с.
- Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
- ОСТ 24.050.037-84. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИВ, 1984. – 51 с.
- Ушкалов, В. Ф. О работе фрикционных демпферов вагонов при наличии в возмущениях высокочастотных составляющих / В. Ф. Ушкалов, В. В. Кулябко // Механика наземного транспорта : тез. докл. Всесоюзного совещ. (Днепропетровск, 1977). – К., 1977. – С. 58–62.
- Шевченко, В. В. Оцінка економічної ефективності заходів з підвищення безпеки руху поїздів / В. В. Шевченко, О. М. Гненний // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 28. – С. 287–290.
- Cheli, F. On rail vehicle vibrations induced by track unevenness: Analysis of the excitation mechanism / F. Cheli, R. Corradi // Journal of Sound and Vibration. – 2011. – Vol. 330. – Issue 15. – P. 3744–3765.
- Experimental study on adhesion behavior of wheel rail under dry and water conditions / W. J. Wang, P. Shen, J. H. Song et al. // Wear. – 2011. – Vol. 9–10, № 271. – P. 2699–2705.
- Greif, R. Application of Nadal limit in the prediction of wheel climb derailment / R. Greif, B. Marquis // Proc. of the ASME/ASCE/IEEE 2011 Joint Rail Conf. (16.03-18.03.2011). – Pueblo : ASME. – Paper No. JRC2011-56064.
- Iwnicki, S. D. Handbook of Railway Vehicle Dynamics / S. D. Iwnicki. – London : CRC Press, 2006. – 527 p.
- Wheel flange/rail gauge corner contact lubrication: Tribological investigations / S. Descartes, A. Saulot, C. Godeau et al. // Wear. – 2011. – Vol. 1–2, № 271. – P. 54–61.
- Zeng, J. Study on the wheel/rail interaction and derailment safety / J. Zeng, P. Wu // Wear. – 2011. – Vol. 9–10, № 265. – P. 1452–1459.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Н. В. БЕЗРУКАВИЙ^{1*}^{1*} Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства,
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 247 24 55, ел. пошта b829@yandex.ua

ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ВІБРАЦІЙ НА КОЕФІЦІЄНТ ЗАПАСУ СТІЙКОСТІ ВАГОНІВ ПРОТИ СХОДУ З РЕЙОК ПРИ ВПОВЗАННІ ГРЕБЕНЯ КОЛЕСА НА РЕЙКУ

Мета. Враховуючи пріоритетність безпеки руху на залізничному транспорті, пошук факторів, що сприяють збільшенню коефіцієнта запасу стійкості проти сходу коліс з рейок, є актуальним завданням. Метою цієї роботи є дослідження впливу високочастотних вібрацій на показник безпеки руху поїздів. При цьому як джерело вібрацій розглядалося колесо з особливою формою диска, за якої його жорсткість змінюється за гармонійним законом. **Методика.** Для аналізу впливу вібрації на зміну значень коефіцієнта тертя використовувалися методи так званої вібраційної механіки. У цій роботі застосовувався також метод скінченних елементів для визначення амплітуд вібрацій через переміщення точок гребеня колеса при пружних деформаціях. **Результати.** Розрахунками встановлено, що коефіцієнт запасу стійкості проти сходу коліс з рейок значною мірою залежить від коефіцієнта тертя між колесом і рейкою. У роботі показано, що на коефіцієнт тертя у свою чергу впливають високочастотні вібрації. Як джерело вібрації розглянута форма диска колеса, розраховано параметри, що характеризують вібрацію. Надано кількісну оцінку зміни коефіцієнта тертя під впливом вібрації. Науково обґрунтовано вплив високочастотних вібрацій на коефіцієнт запасу стійкості проти сходу коліс з рейок. **Наукова новизна.** У роботі доведено можливість впливу на коефіцієнт запасу стійкості дії високочастотних вібрацій. У дослідженнях теоретично обґрунтовано підвищення безпеки руху поїздів за наявності вібрацій у зоні контакту гребеня колеса з рейкою, викликаних колесом з особливою формою диска. **Практична значимість.** Показано, що застосування хвилеподібної форми диска колеса в експлуатації не становить загрози для безпеки руху, а наявність високочастотної вібрації може знизити ймовірність сходження колеса з рейки.

Ключові слова: коефіцієнт запасу стійкості вагона; коефіцієнт тертя; високочастотні вібрації

N. BEZRUKAVYY^{1*}^{1*} Institute of Technical Mechanics under The National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine,
Liashko-Popel Str., 15, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 247 24 55, e-mail b829@yandex.ua

THE INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY VIBRATIONS ON DERAILMENT STABILITY COEFFICIENT OF CARS AT WHEEL FLANGE CLIMBING ON THE RAIL

Purpose. Taking into account the traffic safety priority on the railway transport the search of factors promoting increase of derailment stability coefficient is an actual task. Purpose of the paper is the influence researches of the high-frequency vibrations on the train traffic safety parameter. In this case the special form of the wheel rim, at which its rigidity changes according to the harmonious law, was considered as a source of vibrations. **Methodology.** For the analysis of the vibration influence on the change of friction coefficient values the methods of so called vibration mechanics were used. For determination of vibration amplitudes through moving the wheel flange points the finite-elements method was also used in the paper. **Findings.** During calculations it was established that the derailment stability coefficient to a great extent depends on the friction coefficient between wheel and rail. The paper shows that the friction coefficient in turn is influenced by the high-frequency vibrations. The form of the wheel rim was considered as a vibration source and the parameters characterizing vibration were calculated. It was given the quantitative estimation of the friction coefficient change under the vibration influence. It was also scientifically based the high-frequency vibration influence on the derailment stability coefficient. **Originality.** The paper proved the possibility of high-frequency vibration influence on the derailment stability coefficient. The studies theoretically substantiated the traffic safety increase in the presence of vibrations in the contact area of the wheel flange with the rail caused by special form of the wheel disc. **Practical value.** It is shown that the use of undulating wheel disc form

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

do not constitute a threat to the traffic safety, and the availability of high-frequency vibration can reduce the derailment probability.

Keywords: derailment stability coefficient of a car; friction coefficient; high-frequency vibrations

REFERENCES

1. Blekhman I.I. *Vibratsionnaya mehanika* [Vibrational Mechanics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1994. 400 p.
2. Blokhin Ye.P., Korotenko M.L., Klimenko I.V. Graficheskoye predstavleniye kriteriya Nadalya [A graphical representation of the Nadal's criterion]. *Visnyk Dnipropetrovskho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 35, pp. 7-9.
3. Chelomey V.N. *Vibratsii v tekhnike. Tom 6: Zashchita ot vibratsii i udarov* [Vibrations in technology, Vol. 6 Protection from vibrations and blows]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 456 p.
4. *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnykh)* [Norms for calculation and design of railway wagons of the Russian Federation Ministry of Railways of the track gauge 1520 mm (non self-propelled)]. Moscow, GosNIIV – VNIIZhT Publ., 1996. 319 p.
5. *Vagony gruzovyye i passazhirskyye. Metody ispytaniy na prochnost i khodovyye kachestva* [Freight and passenger cars. Methods of testing for strength and ride quality]. Moscow, GosNIIV Publ., 1984. 51 p.
6. Ushkalov V.F. O rabote friktsionnykh dempferov vagonov pri nalichii v vozmushcheniyakh vysokochastotnykh sostavlyayushchikh [About work of friction dampers of cars at presence of high frequency components in disturbances]. *Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya "Mekhanika nazemnogo transporta"* [Abstracts of the All-Union Conf. "Mechanics of surface transport"]. Kyiv, 1977. 144 p.
7. Shevchenko V.V., Hnennyi O.M. Otsinka ekonomichnoi efektyvnosti zakhodiv z pidvyshchennia bezpeky rukhu poizdiv [Assessment of economic efficiency of measures to improve traffic safety]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 28, pp. 287-290.
8. Cheli F., Corradi R. On rail vehicle vibrations induced by track unevenness: Analysis of the excitation mechanism. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, vol. 330, issue 15, pp. 3744-3765.
9. Wang W.J., Shen P., Song J.H., Guo J., Liu Q.Y., Jin X.S. Experimental study on adhesion behavior of wheel rail under dry and water conditions. *Wear*, 2011, no. 271, issues 9-10, pp. 2699-2705.
10. Greif R., Marquis B. Application of Nadal limit in the prediction of wheel climb derailment. ASME/ASCE/IEEE 2011 Joint Rail Conference. Pueblo, 2011. Paper No. JRC2011-56064.
11. Iwnicki S.D. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. London, CRC Press Publ., 2006. 527 p.
12. Descartes S., Saulot A., Godeau C., Bondeux S., Dayot C., Berthier Y. Wheel flange rail gauge corner contact lubrication: Tribological investigations. *Wear*, 2011, no. 271, vol. 1-2, pp. 54-61.
13. Zeng J., Wu P. Study on the wheel rail interaction and derailment safety. *Wear*, 2011, vol. 265, issues 9-10, pp. 1452-1459.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Ф. Ушкаловым (Украина); д.т.н., проф. В. В. Рыбкиным (Украина)

Поступила в редколлегию 15.05.2013

Принята к печати 27.07.2013

UDC 629.46.027.23.015

V. M. BUBNOV¹, S. V. MYAMLIN², N. B. MANKEVYCH^{1*}¹*LTD «Main Specialized Design Bureau of Car Building named after V. M. Bubnov (MSDBCB)», Mashinostroiteley Sq., 1, 87535, Mariupol, Ukraine, tel. +38 (0629) 51 86 43, e-mail n-mankevich@mail.ru²Dep. «Wagons and Wagon Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 776 84 98, e-mail sergeymyamin@gmail.com**DYNAMIC PERFORMANCE OF FREIGHT CARS ON BOGIES
MODEL 18-1711**

Purpose. To analyze the results of study of dynamic parameters of the tank-car model 15-1900 and gondola car model 12-1905, equipped with the bogies model 18-1711 with axle loading of 25 ton and unified according to major parts and joints with the cars of previous generation. According to results of the study to conclude about the possibility of using bogies model 18-1711 as the running parts of the freight rolling stock of the new generation of 1520 mm track with increased axle loading. **Methodology.** The dynamic performance of the rolling stock running parts directly affects the safety of railway traffic. Experimental studies of the car dynamic qualities are an important step in the modernization of existing bogie constructions and in the creation of the new ones. These tests allow one to confirm the results of theoretical studies and to check the correctness of the constructive solutions. **Findings.** Basic results of dynamic studies are presented as the graphs of dynamic performance dependencies on the motion speed of the experimental train. Results show that the freight cars on the bogies model 18-1711 have satisfactory dynamic properties meeting current regulatory requirements. **Originality.** The dynamic characteristics of freight cars on bogies model 18-1711, which give a complete view of the car loading allow us to estimate the dependency of the car dynamic performance on the bogie design parameters. **Practical value.** The bogie model 18-1711 with axle loading 25 ton can be used as a freight car undercarriages of the new generation of 1520 mm track.

Keywords: dynamics of the railcar; dynamic tests; axle loading; structure unification; cars of new generation

Introduction

Dynamic characteristics of the running parts of railway rolling stock directly affect the safe operation of trains in different modes of car loading and in the entire range of their motion speeds. That's why scientists and designers during improvement and construction of the new bogies of the rolling stock paid great attention to such junctions and elements the providing of necessary quality of the car course with the least resistance to its motion depends on [1, 4, 7, 9, 12].

Application of spring group in the construction of upgraded and new bogies with bilinear force characteristics and increased flexibility under the tare and gross rail load can improve the vertical dynamics parameters, promote traffic safety, as well as to provide the lesser sensitivity of the empty car dynamic parameters to the wedge wear.

In this case installation of the springs with increased altitude under the friction wedges allows one to create the necessary pressing force to provide both the better damping and increased resistance to the bogie side frames lozenging.

The use of non-metallic insertions between the friction wedges and bolster eliminates the «metal on metal» contact and stabilizes functioning of the shock absorbers [14]. Increase of the friction wedges width or their form changing from the flat to the spatial one increases the side frames cohesion with the bogie bolster. It reduces the degree of the side frames lozenging and thus promotes the motion stabilization. Installation of the double-row tapered bearings, which do not require maintenance and repair on the wheel sets increases the overhaul life of the cars. Installation of elastic wear-proof insertions between the bearing adapter and supporting surface of the side frame axle-box nozzle protects the supporting and thrust surfaces of adapter and the side frame from the wearing. Thus the system of bogie primary suspension is created. The elastic insertion of adapter dampers the high frequency vertical oscillations and brings the wheel set back to its original position after oblique setting during motion in the curved track sections. This has a positive effect on the side frame durability [13, 15].

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Installation of fixed contact bearings on the bolster provides an effective oscillation damping and reduces the wheel sets wearing. This significantly decreases the level of dynamic loading of the car center pivot and reduces the negative impact on the track [2, 3, 5, 6, 11, 16].

A number of these design solutions are implemented in the new generation of bogies with an axle loading of 25 tnf, including the models 18-1711 (Table 1).

car dynamic qualities are an important step in the modernization of existing bogie designs and in the construction of the new ones. Experimental data can confirm the results of theoretical studies and check the correctness of the design decisions. Therefore, the following algorithm can be determined as a research methodology: design engineering of the freight car bogie, theoretical research performing, experimental studies of freight car dynamic loading on the bogies of new construction in

Table 1

Technical features of bogies

| Name of design features | Bogie model (designer) | | | | |
|---|--|--|---|--|-----------------------------------|
| | 18-194-1 (UVZ) | Barber-S-2-R 18-9855 (NVTs «Cars») | Motion Control 18-9836 (Amsted Rail) | 18-9800 (VNIKTI) | 18-1711 PJSC «Azovmash» («GSKBV») |
| Spring suspension: – power characteristic – spring number of the spring set (including the double-row ones) – wedge form | Bilinear 7(7) Flat | Bilinear 9(9) Spatial, composite structure | Bilinear 9(4) Spatial with increased width of working areas | Bilinear 7(7) Flat c with increased width of working areas | Bilinear 7(7) Spatial |
| Type of the elastic fixed contact bearings | Elastic spring type, or the elastic roller one | Elastic spring type | Elastic spring type | Elastic elastomeric | Elastic spring type |
| Presence of elastic elements: – in the axle-box nozzle – on the wedges | Yes No | No No | Yes No | Yes Yes | No No |

Purpose

The purpose of the article is the study of car dynamic qualities. According to the study results the use possibility of bogie model 18-1711 as the freight car running gears was evaluated.

Methodology

Running gears dynamic parameters of the rolling stock directly affect the motion safety parameters of the freight cars on the basis of wheel and rail interaction conditions. Experimental studies of

comparison with the serial ones, results analysis, and decision preparation about the possibility of using the bogies with new designs.

Findings

This paper presents the dynamic running tests of the tank car model 15-1900 and the 12-1905 open car model equipped with bogies 18-1711, with an axle loading 25 tnf, which were carried out according to the papers [8, 10]. These types of cars are the most common types of the freight vehicle

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

on the track 1520 mm. The prototypes for these cars were respectively the tank car model 15-1547-03 and the 12-1704-04 open car model produced by PJSC «Azovobshchemash» for many years. Body researched cars also on most parts and components are unified with the previous generation cars. Bodies of the researched cars are also unified with the cars of previous generation according to the most parts and components.

During the tests the general working capacity of the vehicle in motion was examined. There were determined and evaluated the parameters of running characteristics of cars, which were equipped with bogie model 18-1711. The different motion speeds, including the speed exceeding the design speed by 10% and different loading modes for the specific track sections with the corresponding construction and the current technical conditions were taken into account as well.

The technical characteristics of the studied cars are presented in the Table 2.

Table 2

| Technical characteristics of the cars under tests | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
| Name of index (parameter, size) | Index value | |
| | Tank-car, model 15-1900 | Open car, model 12-1905 |
| Carrying capacity, tn, no more than | 73.5 | 75.5 |
| Tare weight, tn | 26.0 | 24±0.5 |
| Static design loading from the wheel set on the rails, kN (tnf) | 245.0 (25.0) | |

End the table 2

| Name of index (parameter, size) | Index value | |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| | Tank-car, model 15-1900 | Open car, model 12-1905 |
| Size according to the State Standard 9238-83 | 1-VM | |
| Tank volume (body), m ³ | 87±0,4 | 90±0,5 |
| Body width, mm | 3260 | 3204 |
| Body length (tank), mm | 11260 | 13130 |
| Distance between truck centres, mm | 7800 | 8650 |
| The car length of the coupler pulling face, mm | 12020 | 13920 |
| The height of the car gravity center from the rail top level, mm | | |
| – in the empty condition | 1.561 | 1.191 |
| – in the loaded condition | 2.499 | 2.221 |
| The minimum radius of curving, m: | | |
| 1) when moving in tractive connection | | |
| – connection section of the tangent and curve track section | | 80 |
| – S-shaped curve | | 120 |
| 2) during circular curving of the single tank | | 60 |

The test results of cars are presented as graphs of dependencies of the ride quality basic indices on the motion speed in Fig. 1-9.

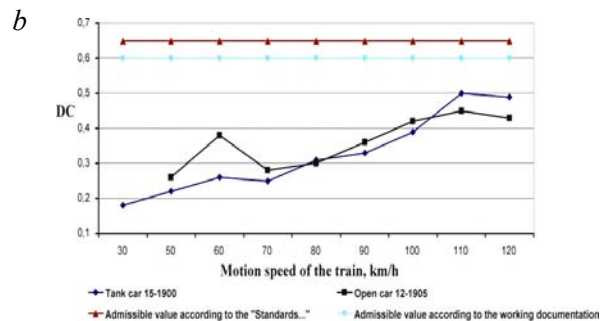
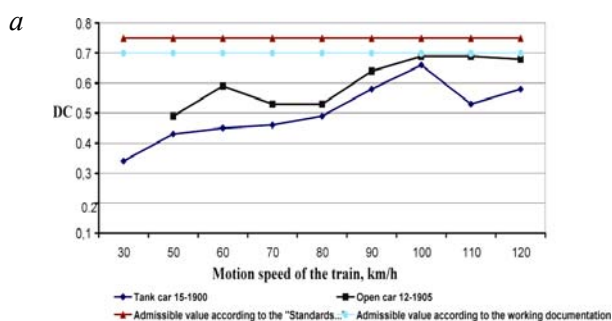


Fig. 1. Vertical dynamic coefficient DC of the tested car bodies:
a – empty car; b – loaded car

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

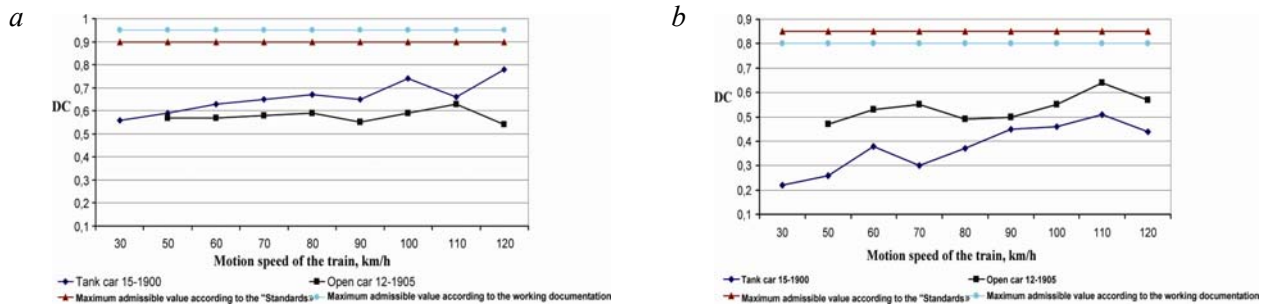


Fig. 2. Vertical dynamics coefficient DC of the non-spring elements of the car bogie frames under tests:
a – empty car; *b* – loaded car

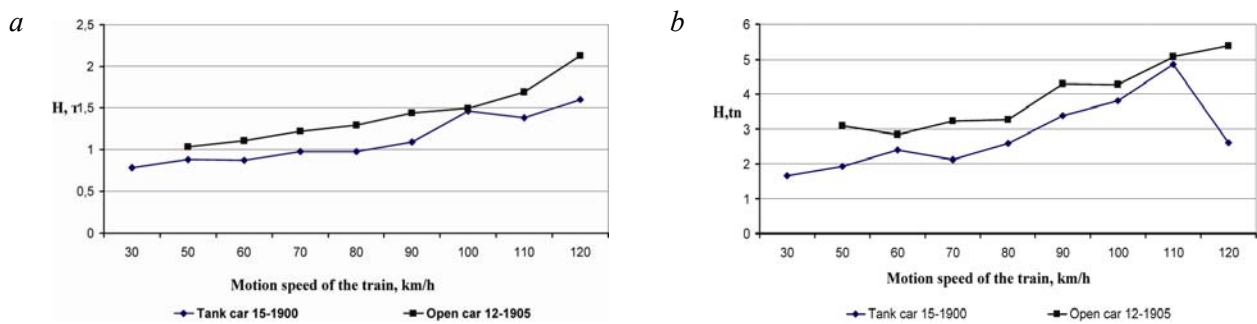


Fig. 3. Frame forces of the bogies H of cars under tests:
a – empty car; *b* – loaded car

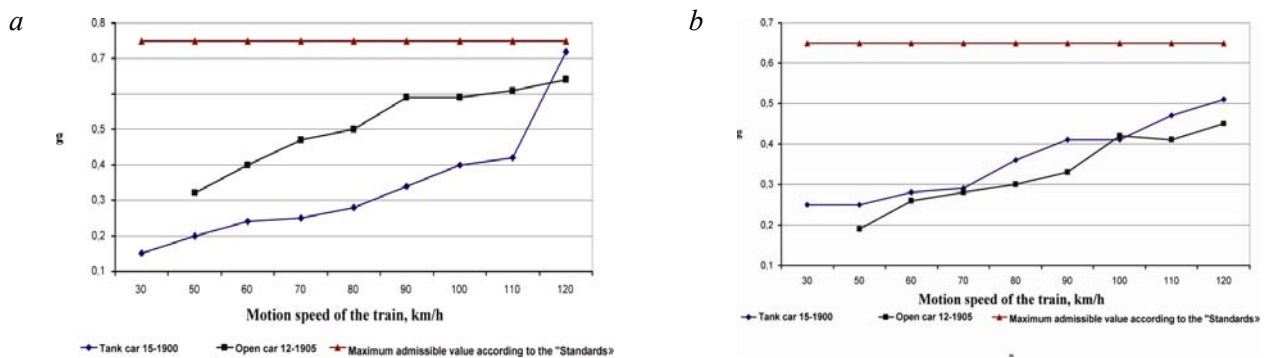


Fig. 4. Vertical acceleration of the bogies *g* of the cars under tests:
a – empty car; *b* – loaded car

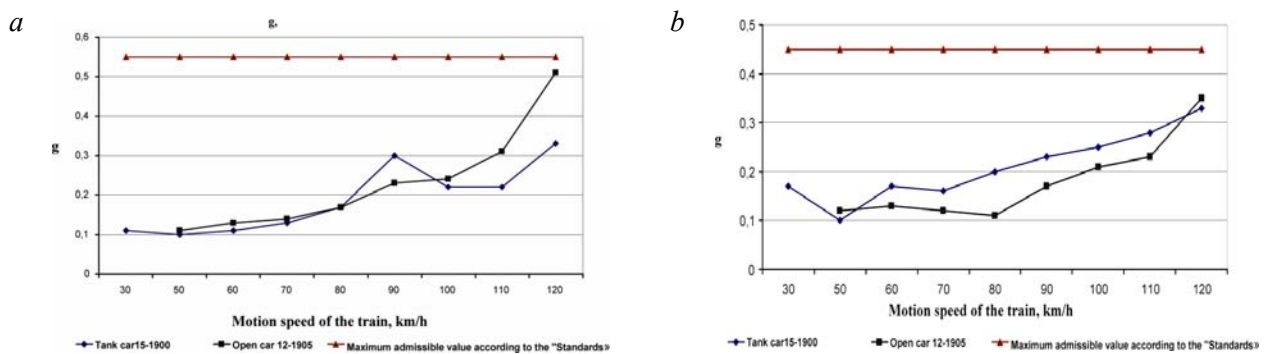


Fig. 5. Horizontal acceleration of the bogies *g* of the cars under tests:
a – empty car; *b* – loaded car

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

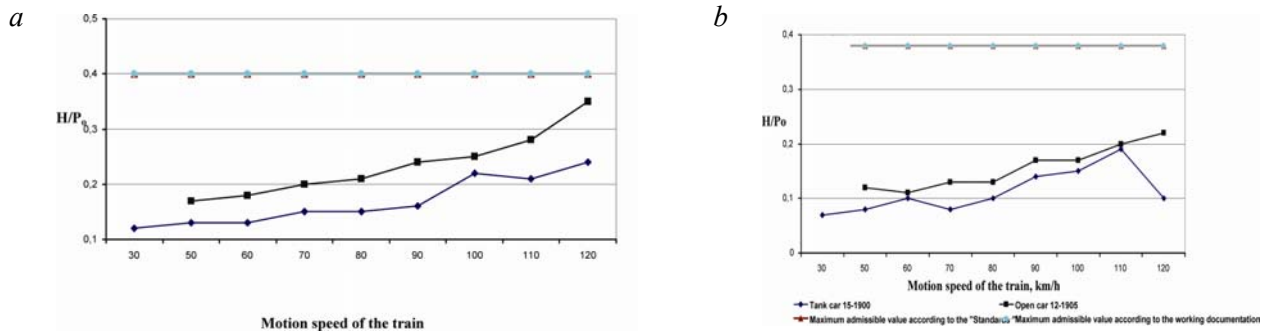
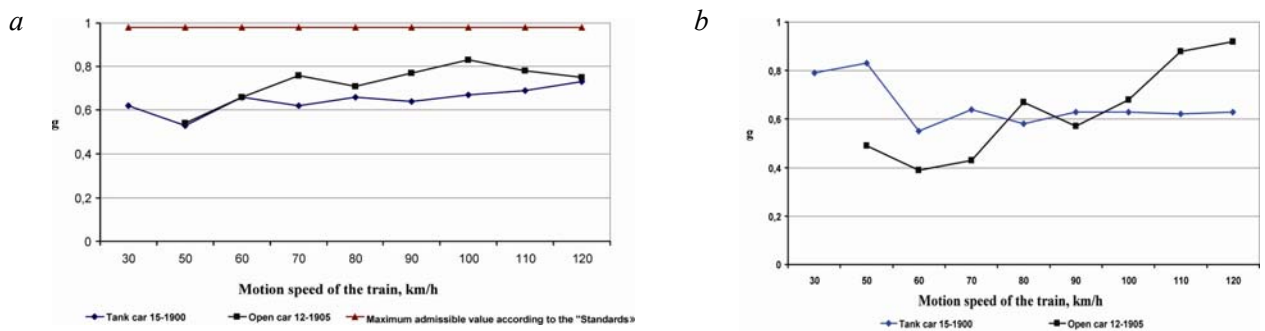
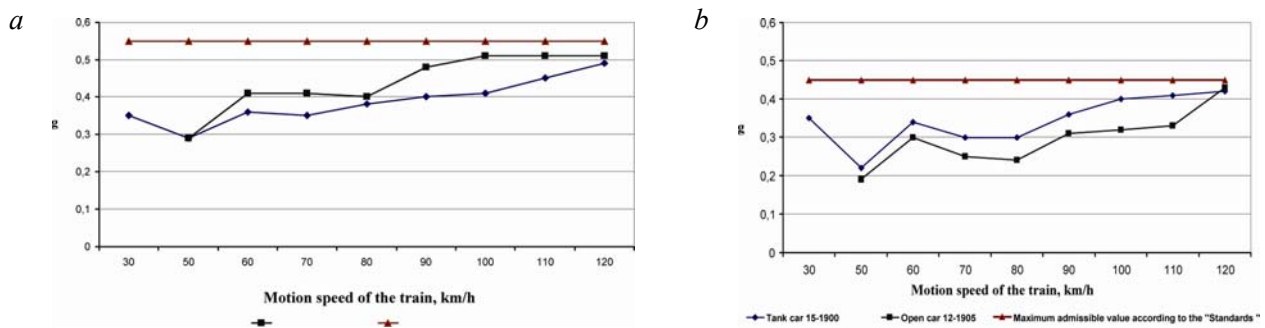
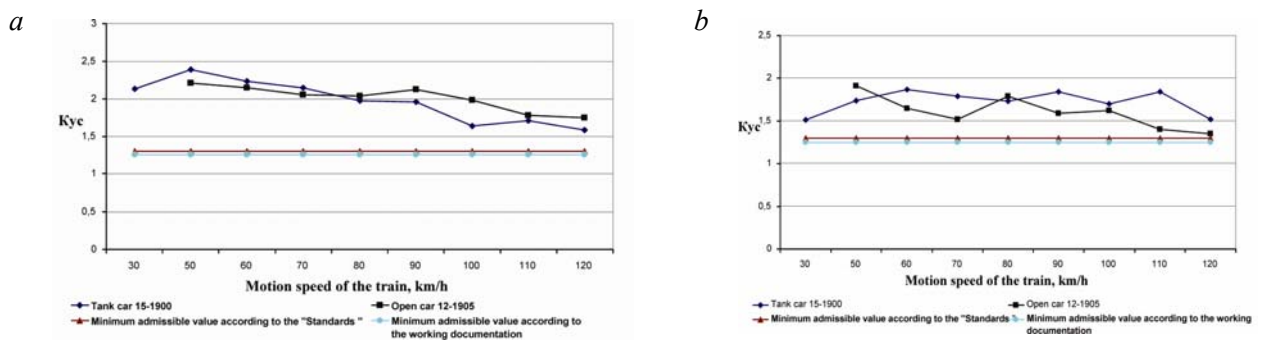
Fig. 6. Frame forces in fractions of the axial loading H/P_0 of cars under tests:*a* – empty car; *b* – loaded carFig. 7. Vertical accelerations of unsprung elements of the bogie frames g , of the tested cars:*a* – empty car; *b* – loaded carFig. 8. Horizontal accelerations of unsprung elements of the bogie frames g , of the tested cars:*a* – empty car; *b* – loaded car

Fig. 9. Derailment stability coefficient:

a – empty car; *b* – loaded car

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Originality and Practical Value

The dynamic characteristics of freight cars with the bogie models 18-1711 are obtained. These characteristics give a complete idea of the car loading and allow us to estimate the dependency of the car dynamic performance on the bogie design. Two-axial bogie model 18-1711 with axle loading 25 tnf can be used as the freight cars running gears of the new generation of 1520 mm track.

Conclusions

1. The test results show that the studied cars have satisfactory dynamic qualities.
2. Maximum commonality of parts and components of their running gears and bodies with the previous generation of cars ensures their maintainability on the existing infrastructure of railways of the 1520 mm track.
3. To ensure the traffic safety during manufacturing and repairing of new generation cars, components and details, of which are unified with the previous generation of cars, it is necessary to exclude the possibility of "reverse installation", i.e. the installation of the new generation car parts with obsolete design. For this purpose there are many methods of control, such as logic control through the information-analytical system of railway computer centers.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Аналіз поперечних коливань колеса відносно рейки з відеозаписів / В. О. Мельничук, О. М. Савчук, М. А. Грічаний, І. Ю. Хоменко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 32. – С. 143–146.
2. Бороненко, Ю. П. Каким быть тележкам для вагонов нового поколения / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова // Вагоны и вагонное хоз-во. – 2005. – № 1. – С. 40–41.
3. Бубнов, В. М. Основные тенденции совершенствования ходовых частей грузовых вагонов / В. М. Бубнов, С. В. Мямлин, Н. Б. Манкевич // Пробл. та перспективи розв. заліз. трансп. (19.04. – 20.04.2012) : тези доп. 72-ї Міжнар. науково-практ. конф. – Д. : ДНУЗТ, 2012. – С. 74–75.
4. Бубнов, В. М. Пути совершенствования прочностных характеристик ходовых частей грузовых вагонов / В. М. Бубнов, С. В. Мямлин, Н. Б. Манкевич // Вагонный парк. – 2012. – № 2. – С. 4–6.
5. Комплексная модернизация ходовых частей грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрый, И. Ю. Малышева и др. // Вагонный парк. – 2007. – № 2. – С. 18–22.
6. Модернизация ходовых частей грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Т. Ф. Мокрый, М. М. Жечев и др. // Заліз. трансп. України. – 2003. – № 5. – С. 33–36.
7. Мямлін, С. В. Прогнозування розвитку конструкції двовісного візка вантажного вагона / С. В. Мямлін, А. С. Мацюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 27. – 2009. – С. 24–29.
8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 352 с.
9. Пути совершенствования конструкции тележки грузового вагона / А. А. Босов, С. В. Мямлин, В. Я. Панасенко, И. В. Клименко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 27–32.
10. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
11. Тележка для грузовых вагонов нового поколения с повышенными осевыми нагрузками / В. П. Ефимов, А. А. Пранов, А. Н. Баранов, К. А. Белоусов // Ж.-д. трансп. – 2009. – № 9. – С. 58–61.
12. Boronenko, Yu. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities / Yu. Boronenko, A. Orlova, E. Rudakova // Vehicle System Dynamics. – 2006. – Vol. 44. – P. 402–414.
13. Patent 2005/0268813 A1, USA, Int. Cl. B61F5/26. Railway trucks pedestal bearing adapter / Charles L. Van Auken ; Amsted Industries Inc. – № 10/856,830 ; filed 01.01.04 ; publ. 30.12.04.
14. Patent 2007/0034108 A1, USA, Int. Cl. B61D1/00. Non-metallic insert for rail car bolster wedge / John W. Rudibaug, Charles L. Van Auken ; Amsted Industries Inc. – № 11/201,814 ; filed 12.08.05 ; publ. 15.02.07.
15. Patent 2010/0064930 A1, USA, Int. Cl. B61F5/32, B61F5/50, B61F5/00. Railway truck with bearing adapter / Ralph H. Schorr, Peter Klauser, Jay P. Monaco, Gnana Jeevan Robinson, Manuel Tavares ; Amsted Industries Inc. – № 12/283,688 ; filed 16.09.09 ; publ. 18.03.10.
16. Scholdan, D. RC25NT – new freight car bogie, self steering, three piece, friction damped / D. Scholdan, W. Kik // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты (6.07 – 10.07. 2011) : тезисы докл. VII Междунар. науч.-техн. конф. – СПб. : ПГУПС, 2011. – С. 19–21.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В. М. БУБНОВ¹, С. В. МЯМЛІН², М. Б. МАНКЕВИЧ^{1*}¹ТОВ «Головне спеціалізоване конструкторське бюро вагонобудування ім. В. М. Бубнова (ГСКБВ)»,
пл. Машинобудівників, 1, 87535, Маріуполь, Україна, тел. +38 (0629) 51 86 43, ел. пошта n-mankevich@mail.ru²Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 776 84 98, ел. пошта
sergeymyamin@gmail.com

ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НА ВІЗКАХ МОДЕЛІ 18-1711

Мета. Виконати аналіз результатів дослідження динамічних показників вагона-цистерни моделі 15-1900 та піввагона моделі 12-1905, обладнаних візками моделі 18-1711 з осьовим навантаженням 25 тс та уніфікованих за основними деталями й вузлами з вагонами попереднього покоління. За результатами досліджень зробити висновок про можливість використання візка моделі 18-1711 як ходових частин вантажного рухомого складу нового покоління колії 1 520 мм зі збільшеним осьовим навантаженням. **Методика.** На безпеку руху на залізницях безпосередньо впливають динамічні показники ходових частин рухомого складу. Експериментальні дослідження динамічних якостей вагонів є важливим етапом при модернізації існуючих і створенні нових конструкцій візків. Дані випробувань дозволяють підтвердити результати теоретичних досліджень і перевірити правильність прийнятих конструктивних рішень. **Результати.** Основні результати динамічних досліджень наведено у вигляді графіків залежності динамічних показників від швидкості руху експериментального поїзда, вони свідчать про те, що вантажні вагони на візках моделі 18-1711 мають задовільні динамічні якості, що відповідають сучасним нормативним вимогам. **Наукова новизна.** Отримано динамічні характеристики вантажних вагонів на візках моделі 18-1711, які дають повне уявлення про навантаженість вагона й дозволяють оцінити залежність динамічних показників вагона від параметрів конструкції візка. **Практична значимість.** Двовісний візок моделі 18-1711 з осьовим навантаженням 25 тс може бути використаний як ходові частини вантажних вагонів нового покоління колії 1 520 мм.

Ключові слова: динаміка вагона; динамічні випробування; осьове навантаження; уніфікація конструкцій; вагони нового покоління

В. М. БУБНОВ¹, С. В. МЯМЛІН², Н. Б. МАНКЕВИЧ^{1*}¹ООО «Главное специализированное конструкторское бюро вагоностроения им. В. М. Бубнова (ГСКБВ)»,
пл. Машиностроителей, 1, 87535, Мариуполь, Украина, тел. +38 (0629) 51 86 43, эл. почта n-mankevich@mail.ru²Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 776 84 98, эл. почта
sergeymyamin@gmail.com

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ТЕЛЕЖКАХ МОДЕЛИ 18-1711

Цель. Провести анализ результатов исследования динамических показателей вагона-цистерны модели 15-1900 и полувагона модели 12-1905, оборудованных тележками модели 18-1711 с осевой нагрузкой 25 тс и унифицированных по основным деталям и узлам с вагонами предыдущего поколения. По результатам исследования сделать заключение о возможности использования тележки модели 18-1711 в качестве ходовых частей грузового подвижного состава нового поколения колеи 1 520 мм с увеличенной осевой нагрузкой. **Методика.** На безопасность движения на железных дорогах напрямую влияют динамические показатели ходовых частей подвижного состава. Экспериментальные исследования динамических качеств вагонных тележек являются важным этапом при модернизации существующих и создании новых конструкций тележек. Данные испытаний позволяют подтвердить результаты теоретических исследований и проверить правильность принятых конструктивных решений. **Результаты.** Основные результаты динамических исследований представлены в виде графиков зависимости динамических показателей от скорости движения экспериментального поезда, они свидетельствуют о том, что грузовые вагоны на тележках модели 18-1711 обладают удовлетворительными динамическими качествами, отвечающими современным нормативным требованиям. **Научная**

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

новизна. Получены динамические характеристики грузовых вагонов на тележках модели 18-1711, которые дают полное представление о нагруженности вагона и позволяют оценить зависимость динамических показателей вагона от параметров конструкции тележки. **Практическая значимость.** Двухосная тележка модели 18-1711 с осевой нагрузкой 25 тс может быть использована в качестве ходовых частей грузовых вагонов нового поколения колеи 1 520 мм.

Ключевые слова: динамика вагона; динамические испытания; осевая нагрузка; унификация конструкций; вагоны нового поколения

REFERENCES

1. Melnychuk V.O., Savchuk O.M., Hrichanyi M.A., Khomenko I.Yu. Analiz poperechnykh kolyvan kolea vidnosno reiky z videozapysiv [Analysis of transverse oscillations of the wheel relative to the rails on the basis of videos]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 32, pp. 143-146.
2. Boronenko Yu.P., Orlova A.M. Kakim byt telyezhkam dlya vagonov novogo pokoleniya [What should be the bogies for a new generation of railcars]. *Vagony i vagonnoye hozyaystvo – Wagons and wagon facilities*, 2005, no. 1, pp. 40-41.
3. Bubnov V.M., Myamlin S.V., Mankevych N.B. Osnovnyye tendentsii sovershenstvovaniya khodovykh chastei gruzovykh vagonov [Major trends of improving of running parts of railcars]. *Tezy dopovidei 72 Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii "Problemy ta perspektivy rozvytku zaliznychnoho transportu"* [Abstracts of Papers of the 72 Scientific and Practical Conference "Problems and prospects of railway transport development"]. Dnipropetrovsk, 2012, pp. 74-75.
4. Bubnov V.M., Myamlin S.V., Mankevych N.B. Puti sovershenstvovaniya prochnostnykh kharakteristik khodovykh chastei gruzovykh vagonov [The ways to improve the strength characteristics of the running parts of freight cars]. *Vagonnyy park – Wagon fleet*, 2012, no. 2, pp. 4-6.
5. Ushkalov V.F., Mokriy T.F., Malysheva I.Yu. Mashchenko I.A., Pasichnik S.S. *Kompleksnaya modernizatsiya khodovykh chastei gruzovykh vagonov* [Complex modernization of running parts of freight cars]. *Vagonnyy park – Wagon fleet*, 2007, no. 2, pp. 18-22.
6. Ushkalov V.F., Mokriy T.F., Zhechev M.M., Serebryanyy I.A., Malysheva I.Yu. Modernizatsiya khodovykh chastei gruzovykh vagonov [Modernization of running parts of freight railcars]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2003, no. 5, pp. 33-36.
7. Myamlin S.V., Matsiuk A.S. Prohnozuvannia rozvytku konstrukttsii dvovisnogo vizka vantazhnogo vahona [Development forecasting of the freight car bogie design] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 24-29.
8. *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)*, [Standards for calculating and design of the railroad cars of the Ministry of Railways with the 1520 mm track (unpowered)]. Moscow, GosNIIV-VNIIZhT Publ., 1996. 352 p.
9. Bosov A.A., Myamlin S.V., Panasenkov V.Ya., Klimenko I.V. Puti sovershenstvovaniya konstrukttsii telezhki gruzovogo vagona [Ways of improvement of the bogie design of freight car]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 27-32.
10. RD 24.050.37-95 *Vagony gruzovyye i passazhirskiye. Metody ispytaniy na prochnost i khodovyye kachestva* [RD 24.050.37-95 Freight and passenger cars. Methods of durability and running qualities tests]. Moscow, GosNIIV Publ., 1995. 101 p.
11. Yefimov V.P., Pranov A.A., Baranov A.N., Belousov K.A. Telezhka dlya gruzovykh vagonov novogo pokoleniya s povyshennymi osevyimi nagruzkami [Bogie for freight railcars of new generation with elevated axial loadings]. *Zheleznodorozhnyi transport – Railway transport*, 2009, no. 9, pp. 58-61.
12. Boronenko Yu., Orlova A., Rudakova E. Influence of construction schemes and parameters of three-piece freight bogies on wagon stability, ride and curving qualities. *Vehicle System Dynamics*, 2006, vol. 44, pp. 402-414.
13. Charles L. Van Auker. Railway trucks pedestal bearing adapter. Patent USA no. 10/856,830, 2004.
14. John W. Rudabaugh, Charles L. Van Auker. Non-metallic insert for rail car bolster wedge. Patent USA, no. 11/201,814, 2005.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

15. Ralph H. Schorr, Peter Klauser, Jay P. Monaco, Gnana Jeevan Robinson, Manuel Tavares. Railway truck with bearing adapter. Patent USA, no. 12/283,688, 2009.
16. Scholdan D., Kik W. RC25NT – new freight car bogie, self steering, three piece, friction damped. *Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnivheskoy konferentsii “Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proekty”* [Abstracts of Papers of the VII Int. Sci. and Technical Conf. “Rolling Stock of the XXI century: ideas, requirements, projects]. Saint Petersburg, PGUPS Publ., 2011, pp. 19-21.

D. Sc. (Tech), Prof. O. M. Savchuk (Ukraine); D. Sc. (Tech), Prof. O. A. Beihul (Ukraine) recommended this article to be published

Received: May 21, 2013

Accepted: Jul. 30, 2013

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.4.024.1-185.4

Р. Ш. ИСАНОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Высшая математика», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, ул. Адылходжаева, 1, 100167, Ташкент, Узбекистан, тел. +99 (871) 299 03 26, эл. почта r.isanov@tashiit.uz

ДВУХСЛОЙНЫЙ ПОТОК ВОЗДУХА ПРИ ОБТЕКАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА

Цель. Исследование закономерностей струйных течений воздуха при обтекании высокоскоростного пассажирского поезда. На основе теоретических исследований определить: распределение поля скоростей потока воздуха; давление на верхнем слое двухслойного потока воздуха; давление на границе обоих слоев двухслойного потока воздуха. **Методика.** Для решения задачи на верхнем слое потока воздуха применены методы Жуковского и теории струй идеальной несжимаемой жидкости. Далее для решения уравнения пограничного слоя определено давление на границе обоих слоев, составлено уравнение Навье–Стокса, где учитывается влияние верхнего слоя на нижний. Течение воздуха в верхней области является потенциальным, стационарным, воздух в окрестности считается сжимаемым. **Результаты.** Получено распределение поля скоростей для обоих слоев потока воздуха. Определено давление на верхнем слое двухслойного потока воздуха. **Научная новизна.** Впервые рассмотрена задача о двухслойном потоке воздуха, образованном движением высокоскоростного поезда и состоящем из пограничного слоя над поверхностями вагонов и потока воздуха, где отсутствует свойство вязкости. **Практическая значимость.** Исследованная задача применяется для обеспечения безопасности движения высокоскоростного поезда.

Ключевые слова: комплексный потенциал; метод теории струй; пограничный слой; струйное течение воздуха; безопасность движения

Введение

При движении высокоскоростного поезда образуется поток воздуха. При этом над поверхностью подвижного состава вблизи поезда проявляется свойство вязкости (т.е. трения) воздуха, а с удалением от поверхности вагонов (стенок) свойство вязкости по толщине уменьшается до нуля. Поэтому практически существует двухслойное движение воздуха над поверхностью подвижного состава: нижний слой (пограничный слой) – область G_{II} с толщиной δ_{II} , определяемая в процессе решения с учетом влияния области G_Z на пограничный слой G_{II} , и верхний слой (поток идеальной жидкости) – область G_Z (рис. 1). В этой области G_Z наряду с твердыми плоскими границами существует свободная поверхность DE , форма которой неизвестна (определяется в процессе решения). В связи с этим введем каноническую область G_0 (рис. 2). Действительная ось области G_0 ($\eta = 0$) соответствует области течения G_Z .

В области G_{II} , которая в основном бывает тонкой, проявляются свойства вязкости воздуха. Это область движения частиц воздуха, где имеет

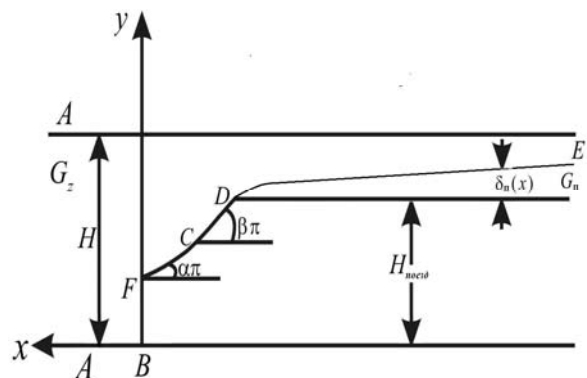


Рис. 1

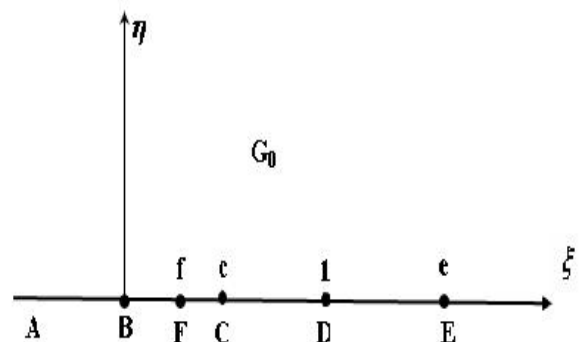


Рис. 2

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

место трение в потоке воздуха с толщиной δ_{II} , которая меньше, чем толщина потока воздуха области G_Z . В области G_Z трение практически отсутствует, поэтому ее можно описать при помощи уравнения Эйлера. Также при отсутствии кавитации в данной области течение воздуха считаем безвихревым движением частиц воздуха; отсутствует срыв потока воздуха с поверхностей твердых границ вагонов поезда (при постоянстве скорости поезда в области G_Z движение будет стационарным).

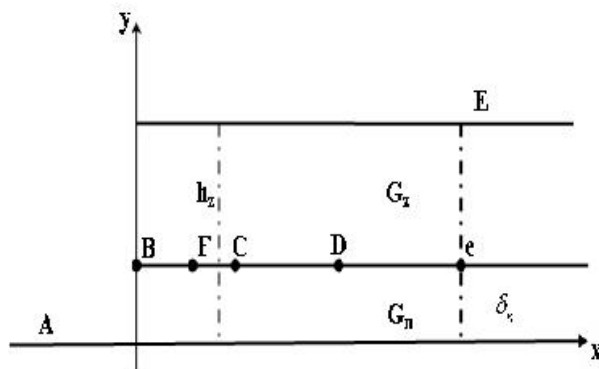


Рис. 3

В работах [8, 16] были рассмотрены задачи обтекания высокоскоростного поезда с заданной конфигурацией. Предположено, что движение частиц воздуха в области G_Z ограничено твердыми полигональными поверхностями, которые имеют соответствующие углы наклона к горизонтальной поверхности.

Течение плоское (x, y) , потенциальное, движение стационарное. Эта задача решается при условиях, когда скорость поезда не больше 250 км/ч (жидкость (воздух) несжимаемая); при движении воздуха число Маха составляет $M < 0,4$; плотность частиц воздуха постоянна. Задача решается методами теории струй идеальной несжимаемой жидкости (воздуха) [12], путем введения потенциала скорости $\phi(x, y)$

$$\vec{V} = \text{grad}\phi(x, y) \quad (1)$$

и функции тока $\psi(x, y)$, которая удовлетворяет уравнению неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

в виде

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (3)$$

Цель

Исследование закономерностей струйных течений воздуха при обтекании высокоскоростного пассажирского поезда. На основе теоретических исследований определить:

- распределение поля скоростей потока воздуха;
- давление на границе обоих слоев двухслойного потока воздуха.

Методика

Для решения задачи на верхнем слое потока воздуха применен метод Жуковского [13]: вводится функция Жуковского и комплексный потенциал

$$W(x) = \phi(x, y) + i\psi(x, y), \quad (4)$$

который является аналитической функцией в области течения G_Z . Часть области движения идеального воздуха ограничена свободной поверхностью, вдоль которой давление постоянно. Форма свободной поверхности неизвестна, ее определяем в процессе решения равенства $\psi(x, y) = q$, где q – расход потока воздуха области течения G_Z .

Поскольку углы наклона твердых границ области течения к горизонтальной поверхности заданы, то функцию Жуковского

$$\omega(z) = \ln \frac{V_0}{\bar{V}} \quad (5)$$

преобразуем в равенство

$$\omega(z) = \ln \frac{V_0}{\bar{V}} + i\theta. \quad (5^*)$$

В равенстве (5*) $\bar{V} = u - iv$, здесь u, v – компоненты вектора скорости частиц воздуха к горизонту (u – по плоскости движения поезда, v – ортогонально к горизонтальной поверхности). Так как $u = V \cos \theta$, $v = V \sin \theta$; $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ – модуль скорости, θ – угол наклона вектора скорости.

Задача сводится к установлению закона движения в области G_Z , $z = x + iy$.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

В работе [1] приведены граничные условия для функций (5) по заданным значениям угла наклона вектора скорости в области G_Z . Пользуясь интегральной формулой Кристоффеля–Шварца для аналитических функций, получена следующая интегральная формула:

$$\omega_1(\zeta) = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^N \int_{\alpha_k}^{\beta_k} \frac{\theta_k d\gamma}{\sqrt{\gamma - a_k} (\gamma - \zeta)}, \quad (6)$$

где N – число твердых границ. Значения α_k, β_k подставляются для каждой границы в соответствии с рис. 1, 2.

$$\omega_1(\zeta) = \frac{\omega(\zeta)}{\sqrt{\zeta - 1} \sqrt{\zeta - e}}. \quad (7)$$

Интегрируя (6) по γ в установленных границах и учитывая, что функция $\omega_1(\zeta)$ аналитическая в области G_0 , получим выражения для компонентов потенциала функции Жуковского как в работе [16]:

$$\omega(\zeta) = \sqrt{\zeta - 1} \sqrt{\zeta - e} \omega_1(\zeta). \quad (8)$$

Следовательно, $\ln \frac{V_0}{\bar{V}} = \ln F(\zeta)$, где $\bar{V} = \frac{V_0}{F(\zeta)}$ – сопряженная комплексная скорость частиц воздуха в плоскости G_0 . Так как скорость на свободной поверхности $V_0 = |F(e, 0)|$, то получим:

$$\bar{V} = \frac{|F(e, 0)|}{F(\zeta)}. \quad (9)$$

Для получения поля скоростей в области G_Z составим уравнения распределения скорости. Учитывая равенство (4), получим:

$$\frac{dw(z)}{dz} = \bar{V}, \quad (10)$$

$$\frac{dw(\zeta)}{d\zeta} = \frac{q}{\pi(e - \zeta)}, \quad (11)$$

где \bar{V} – сопряженная комплексная скорость ($\bar{V} = u - iv$); q – расход потока воздуха в об-

ласти течения G_Z (в точке A источник, в точке E – сток расходом q); G_0 – область течения G_Z (источником с расходом q ($q = V_n H$) является точка $A(x \rightarrow \infty)$, стоком – точка E с тем же расходом q). Действительная ось ADE соответствует области течения G_Z . Скорость на свободной поверхности $V_0 = |F(e, 0)|$.

Для установления закона изменения скорости воспользуемся равенством

$$dz = \frac{dz}{dw} \frac{dw}{d\zeta} d\zeta = \int \frac{d\zeta}{(e - \zeta) F(\zeta)} \quad (12)$$

и получим:

$$z(\zeta) = \frac{H}{\pi} \int_0^{\zeta} \frac{d\gamma}{(e - \gamma) F(\gamma)}. \quad (13)$$

Равенства (9)–(11) и (13) дают распределения скоростей в области движения G_Z в каноническом виде

$$\bar{V}(z) = \{z(\zeta), F(\zeta) V_0\}.$$

При обтекании высокоскоростного поезда образуется течение воздуха в окрестности вагона. Воздух имеет коэффициент кинематической вязкости

$$|\nu(x, y)| \ll 1 (0,104 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}).$$

В связи с этим на поверхности поезда (в зависимости от его конфигурации) наблюдается двухслойное движение воздуха (рис. 4). Над поверхностью вагонов будет пограничный слой G_{II} , где воздух имеет свойство трения. А над поверхностью пограничного слоя G_{II} течет поток воздуха, в котором отсутствует трение и свойство вязкости (считается идеальной жидкостью), который обозначим G_Z . Течение воздуха в области G_Z является потенциальным, стационарным; воздух в окрестности считается сжимаемой жидкостью. В области G_{II} воздух имеет свойство вязкости. Толщина пограничного слоя $\delta_{II} = 5,83 \sqrt{\frac{\nu L}{V_{\text{поезд}}}}$,

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

где L – длина поезда, $V_{\text{поезд}}$ – скорость поезда. При образовании пограничного слоя, для которого имеем уравнение Навье–Стокса, толщина которого δ_{Π} меньше, чем толщина области G_Z :

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (14)$$

где μ, ν – коэффициенты динамической и кинематической вязкости воздуха.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

с учетом уравнения (14) запишется в виде

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (16)$$

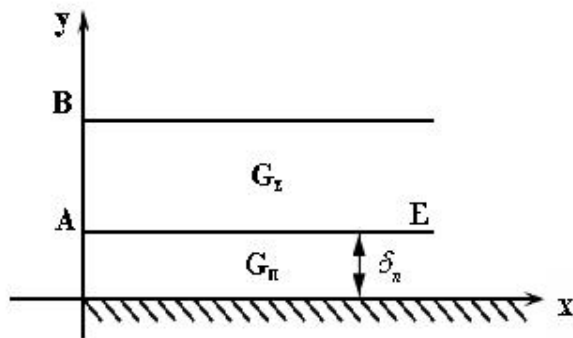


Рис. 4

На рис. 4 AE является границей раздела областей G_Z и G_{Π} потока воздуха; движение частиц воздуха является стационарным, поскольку поезд движется с постоянной скоростью.

Результаты

Уравнение неразрывности (15) показывает, что в области пограничного слоя G_{Π} скорость частиц воздуха будет меньше (за счет трения $\frac{1}{\sqrt{Re}}$), чем скорость в области G_Z , следовательно, в этой области число Маха $M \ll 1$.

Последнее слагаемое в уравнении (16) можно записать в виде: $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \mu = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)$, где

$\mu \frac{\partial u}{\partial y} = \tau_{xy}$ – касательное напряжение в области G_{Π} , где $\rho = \text{const}$. Поскольку толщина пограничного слоя мала, то касательное напряжение постоянно по толщине пограничного слоя ($\tau_{xy} = \text{const}$). Поэтому производная от касательного напряжения равна нулю $\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \right)$.

Так как в области G_{Π} поперечная скорость v намного меньше по сравнению с продольной скоростью u , предполагаем $v = 0$. Тогда слагаемое $\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}$ уравнения (16) равно нулю. Частицы воздуха становятся малыми, поэтому давление по G_{Π} постоянно.

Уравнение Навье–Стокса (14) при вышеизложенных предположениях имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

С учетом результатов, полученных в работах [7, 15], имеем:

$$p = \text{const} \Rightarrow \frac{n-1}{n} V^2 = \text{const}.$$

Течение воздуха плоское потенциальное, стационарное (когда скорость поезда $V_{\Pi} = \text{const}$).

В области G_Z воздух сжимаем, поэтому плотность и давление переменны. Процесс является политропическим $p = p_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n$. Учитывая интеграл Бернулли, функция давления имеет вид

$$\Omega(x, y) = \int \frac{dp}{\rho} = \frac{n}{n-1} \frac{p}{\rho} + \text{const}.$$

Отсюда получим:

$$p = c \rho \frac{n-1}{n} - \frac{V^2(x, y)}{2} \frac{n-1}{n}. \quad (17)$$

Введем безразмерные переменные $u = V^0 \hat{u}$,

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$x = L\hat{x}$, зададим скорость $u^* = u(0)$, $\lambda^* = \frac{v}{V^0 L}$.

При условии, что $0 \leq y \leq \delta_{II}$ на границе раздела областей G_Z и G_{II} (рис. 5), давление $\frac{\partial p}{\partial x}$ (учитывая интеграл Бернулли) в области G_Z определяется равенством:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2(\hat{x}, \delta_{II})}{2} \right), \quad (18)$$

$$p_0 = \rho V_0^2(\hat{x}_0, \delta_{II}) = \text{const}.$$

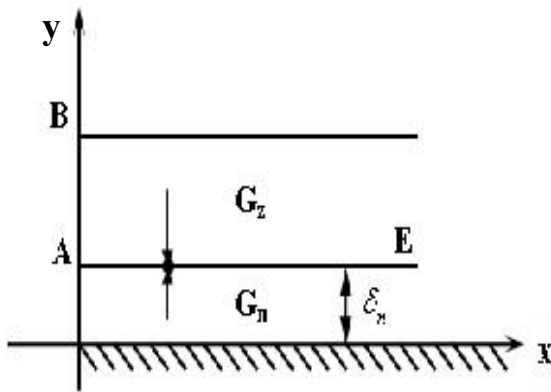


Рис. 5

Учитывая вышеизложенное, уравнение (16) примет вид:

$$\frac{\partial \hat{u}^2}{\partial \hat{x}} = -\frac{n-1}{n} \frac{d}{d\hat{x}} \left(\frac{V^2(\hat{x}, \delta_{II})}{2} \right) + \mu \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{2} \rho \frac{\partial \hat{u}^2}{\partial \hat{x}} + \frac{n-1}{n} \rho \frac{\partial}{\partial \hat{x}} V^2(\hat{x}, \delta_{II}) = \mu \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2}, \quad (20)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \hat{u}^2}{\partial \hat{x}} + \frac{n-1}{n} \frac{\partial}{\partial \hat{x}} V^2(\hat{x}, \delta_{II}) = \lambda^* \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2}, \quad (21)$$

где $\lambda^* = \frac{v}{\hat{u}_0 L}$.

Уравнение (21) после интегрирования примет вид

$$\hat{u}^2(\hat{x}) - \hat{V}_0^2(\hat{x}, \delta_{II}) = \lambda^* \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}}, \quad (22)$$

где $\hat{V}_0^2 = u^2(\hat{x}_0, \delta_{II})$,

$$\frac{1}{\lambda^*} \int \frac{d\hat{u}}{\hat{u}^2(\hat{x}) - \hat{V}_0^2(\hat{x}, \delta_{II})} = \int d\hat{x}, \quad (23)$$

$$\hat{x} = \frac{1}{2\lambda^* V_0} \ln \left| \frac{\hat{u} - V_0}{\hat{u} + V_0} \right|, \quad (24)$$

откуда находим:

$$\hat{u} = \frac{2V_0}{1 - e^{\lambda^* 2V_0 \hat{x}}} - V_0. \quad (25)$$

Точка $\hat{x} = x_0 = 0$ является точкой отрыва пограничного слоя.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые рассмотрена задача о двухслойном потоке воздуха, образованном движением высокоскоростного поезда и состоящем из пограничного слоя над поверхностями вагонов и потока воздуха, где отсутствует свойство вязкости. Применяется для обеспечения безопасности движения высокоскоростного поезда.

Выводы

Полученные результаты дают возможность определить распределение поля скоростей потока воздуха в обоих слоях двухслойного потока воздуха.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бютнер, Э. Н. Динамика приповерхностного слоя воздуха / Э. Н. Бютнер. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 157 с.
2. Задача об уносе твердых частиц с земной поверхности образованной движением высокоскоростного поезда / Ш. С. Файзыбаев, А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов, Б. Б. Егамбердиев // Безопасность движения поездов : тр. конф. – М. : МИИТ, 2012. – 44 с.
3. Исанов, Р. Ш. Задача об уносе твердых частиц с земной поверхности потоком воздуха при движении высокоскоростного поезда / Р. Ш. Исанов // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : междунар. конф. – Омск : ОМГУПС, 2012. – С. 270–274.
4. Кравец, В. В. Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец //

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2005. – Вип. 8. – С. 61–69.
5. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Физматгиз: Наука, 1973. – 804 с.
 6. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. В 2 т. Т. 1 / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – 464 с.
 7. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. В 2 т. Т. 2 / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – 360 с.
 8. Плоские задачи о струйном обтекании высокоскоростного поезда / А. А. Хамидов, В. Н. Балабин, Р. Ш. Исанов, Н. В. Яронова // Проблемы механики. – 2013. – № 1–2. – С. 11–15.
 9. Седов, Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1966. – 448 с.
 10. Файзыбаев, Ш. С. Исследования по разработке методов динамического расчета деталей машин при импульсном нагружении их поверхностных слоев / Ш. С. Файзыбаев, И. Ю. Соболева, З. Г. Мухамедова // Вестн. ТашИИТа. – 2008. – № 3. – С. 35–37.
 11. Файзыбаев, Ш. С. Обоснование методики экспериментальной оценки пластических деформаций на поверхности упрочняемого бандажа / Ш. С. Файзыбаев, И. Ю. Соболева, З. Г. Мухамедова // Проблемы механики. – 2011. – № 3–4. – С. 54–56.
 12. Файзыбаев, Ш. С. Моделирование нагружения поверхности контакта колеса и рельса / Ш. С. Файзыбаев // Вестн. ТашИИТа. – 2010. – № 1. – С. 32–35.
 13. Хамидов, А. А. Плоские и осесимметричные задачи о струйном течении идеальной сжимаемой жидкости / А. А. Хамидов. – Ташкент : Фан, 1978. – 137 с.
 14. Хамидов, А. А. Задача об обтекании вагона потоком идеальной сжимаемой жидкости / А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов, М. И. Рузматов // Проблемы наземных трансп. систем : материалы науч.-техн. конф. – Ташкент : ТашИИТ, 2008. – С. 211–213.
 15. Хамидов, А. А. Расчет задачи об уносе твердых частиц движением высокоскоростного поезда // А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов, Б. Б. Егамбердиев // Вестн. ТашИИТа. – 2012. – № 3. – С. 32–35.
 16. Хамидов, А. А. Задача о движении частиц воздуха в окрестности скоростного и высокоскоростного пассажирского поезда / А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов, Б. Б. Егамбердиев // Вестн. ТашИИТа. – 2011. – № 3. – С. 50–55.
 17. Хамидов, А. А. Задача об уносе твердых частиц потоком воздуха при движении высокоскоростного поезда и расчеты для разных форм частиц / А. А. Хамидов, Р. Ш. Исанов // Ресурсосберегающие технологии на ж.-д. трансп. : тр. конф. (05.12-06.12. 2012). – Ташкент : ТашИИТ, 2012. – С. 13–18.
 18. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1969. – 735 с.
 19. A full-scale experimental and modeling study of ballast flight under high-speed trains / D. Quinn, M. Hayward, C. J. Baker et al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transport. – 2010. – Vol. 224, № 2. – P. 61–74.
 20. Baker, C. The flow around high speed trains / C. Baker // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2010. – Vol. 98, № 6. – P. 277–298.
 21. Muld, T. W. Flow structures around a high-speed train extracted using Proper Orthogonal Decomposition and Dynamic Mode Decomposition / T. W. Muld, G. Efraimsson, D. S. Henningson // Computers & Fluids. – 2012. – № 57. – P. 87–97.
 22. Raghunathan, R. S., Aerodynamics of high-speed railway train / R. S. Raghunathan, H. D. Kim, T. Setoguchi // Progress in Aerospace sciences. – 2002. – Vol. 38, № 6. – P. 469–514.

Р. Ш. ИСАНОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Вища математика», Ташкентський інститут інженерів залізничного транспорту, вул. Адилходжаєва, 1, 100167, Ташкент, Узбекистан, тел. +99 (871) 299 03 26, ел. пошта r.isanov@tashiit.uz

ДВОШАРОВИЙ ПОТІК ПОВІТРЯ ПРИ ОБТІКАННІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОЇЗДА

Мета. Дослідження закономірностей струминних течій повітря при обтіканні високошвидкісного пасажирського поїзда. На основі теоретичних досліджень визначити: розподіл поля швидкостей потоку повітря; тиск на верхньому шарі двошарового потоку повітря; тиск на межі обох шарів двошарового потоку повітря. **Методика.** Для розв'язання задачі на верхньому шарі потоку повітря застосовано методи Жуковського й теорії струменів ідеальної нестисливої рідини. Далі для розв'язання рівняння приграничного шару визна-

© Р. Ш. Исанов, 2013

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

чено тиск на межі обох шарів, складено рівняння Нав'є–Стокса, де враховується вплив верхнього шару на нижній. Течія повітря у верхній області є потенціальною, стаціонарною, повітря в околі вважається стисливим. **Результати.** Отримано розподіл поля швидкостей для обох шарів потоку повітря. Визначено тиск на верхньому шарі двохшарового потоку повітря. **Наукова новизна.** Вперше розглянуто задачу про двохшаровий потік повітря, утвореного рухом високошвидкісного поїзда, що складається з приграничного шару над поверхнями вагонів і потоку повітря, де відсутня властивість в'язкості. **Практична значимість.** Досліджена задача застосовується для забезпечення безпеки руху високошвидкісного поїзда.

Ключові слова: комплексний потенціал; метод теорії струменів; приграничний шар; струминна течія повітря; безпека руху

R. SH. ISANOV^{1*}

^{1*}Dep. «Higher Mathematics», Tashkent Institute of Railway Transport Engineers, Adylkhodzhaev Str., 1, 100167, Tashkent, Uzbekistan, tel. +99 (871) 299 03 26, e-mail r.isanov@tashiit.uz

DOUBLE LAYER AIR CURRENT DURING THE HIGH SPEED TRAIN FLOW-AROUND

Purpose. Investigation of the jet stream mechanism during the high-speed passenger train flow around. On the basis of theoretical studies to determine the distribution of air flow velocity field, the pressure on the upper layer of the double layer air current, the pressure at the boundary of both layers of double-layer air current. **Methodology.** To solve the problem on the top layer of air current the Zhukovsky method and the method of theory of ideal incompressible fluid jets were applied. Then to solve the boundary layer equations the pressure at the boundary of both layers was determined, the Navier - Stokes equation, which takes into account the influence of the top layer on the bottom layer was set up. Airflow in the upper region is a potential, stationary; the air in the vicinity is considered as the compressible one. **Findings.** The distribution of the velocity field for both layers of air current was obtained. The pressure on the upper layer of the double layer air flow was defined. **Originality.** The problem of a double layer air current formed by the high-speed train movement consisting of the boundary layer above the car surfaces and the air current with no viscosity was studied for the first time. **Practical value.** The problem under study is used to provide the safety of high-speed train traffic.

Keywords: complex potential; the method of the jet theory; boundary layer; jet air current; traffic safety

REFERENCES

1. Byutner E.N. *Dinamika pripoverkhnostnogo sloya vozdukha* [Dynamics of near surface air layer]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 157 p.
2. Fayzybayev Sh.S., Khamidov A.A., Isanov R.Sh., Yegamberdiyev B.B. Zadacha ob unose tverdykh chastits s zemnoy poverkhnosti obrazovannoy dvizheniyem vysoko-skorostnogo poyezda [The problem of fly ash particulates entrainment from the earth surface formed by the movement of high-speed train]. *Trudy konferentsii "Bezopasnost dvizheniya poyezdov"* [Proc. of the Conf. "Train Traffic Safety"]. Moscow, 2012, pp. 44.
3. Isanov R.Sh. Zadacha ob unose tverdykh chastits s zemnoy poverkhnosti potokom vozdukha pri dvizhenii vysokoskorostnogo poyezda [The problem of fly ash particulates entrainment from the earth surface during the high-speed train movement]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Ekspluatatsionnaya nadezhnost lokomotivnogo parka i povysheniye effektivnosti tyagi poyezdov"* [Int. Conf. "The operational reliability of the locomotive fleet and improving the train traction"]. Omsk, 2012, pp. 270-274.
4. Kravets V.V., Kravets Ye.V. Aerodinamika chastichno perekrytogo mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poyezda [Aerodynamics of partially overlapped an inter-car space of the high-speed train]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2005, issue 8, pp. 61-69.
5. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow, Fizmatgiz, Nauka Publ., 1973. 804 p.
6. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Tom 1* [Multiphase medium dynamics. Vol. 1]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 464 p.
7. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred. Tom 2* [Multiphase medium dynamics. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 360 p.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Khamidov A.A., Balabin V.N., Isanov R.Sh., Yaronova N.V. Ploskiye zadachi o struynom obtekanii vysokoskorostnogo poyezda [Plane problems of jet flow around of the high-speed train]. *Problemy mekhaniki – Problems of Mechanics*, 2013, no. 1-2, pp. 11-15.
9. Sedov L.I. *Ploskiye zadachi gidrodinamiki i aerodinamiki* [Plain problems of the hydrodynamics and aerodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 448 p.
10. Fayzybayev Sh.S., Soboleva I.Yu., Mukhamedova Z.G. Issledovaniya po razrabotke metodov dinamicheskogo rascheta detaley mashin pri impulsnom nagruzhении ikh poverkhnostnykh sloev [Researches on the development of methods for the dynamic analysis of machine parts under impact loading of the surface layers]. *Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of Tashkent Institute of Railway Transport Engineers], 2008, no. 3, pp. 35-37.
11. Fayzybayev Sh.S., Soboleva I.Yu., Mukhamedova Z.G. Obosnovaniye metodiki eksperimentalnoy otsenki plasticheskikh deformatsiy na poverkhnosti uprochnyayemogo bandazha [Methodology justification of experimental evaluation of plastic deformations on the surface of the reinforcing band]. *Problemy mekhaniki – Problems of Mechanics*, 2011, no. 3-4, pp. 54-56.
12. Fayzybayev Sh.S. Modelirovaniye nagruzheniya poverkhnosti kontakta koleasa i relsa [Loading simulation of the wheel and rail contact surface]. *Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of Tashkent Institute of Railway Transport Engineers], 2010, no. 1, pp. 32-35.
13. Khamidov A.A. *Ploskiye i osesimmetrichnyye zadachi o struynom techenii idealnoy szhimayemoy zhidkosti* [Plane and axially symmetric problems of the jet stream of ideal compressible fluid]. Tashkent, Fan Publ., 1978. 137 p.
14. Khamidov A.A., Isanov R.Sh., Ruzmatov M.I. Zadacha ob obtekanii vagona potokom idealnoy szhimayemoy zhidkosti [The problem of the flow around the car by the ideal compressible fluid flow]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Problemy nazemnykh transportnykh sistem”* [Proc. of Sci. and Technical Conf. “Problems of ground transport systems”]. Tashkent, 2008, pp. 211-213.
15. Khamidov A.A., Isanov R.Sh., Yegamberdiyev B.B. Raschet zadachi ob unose tverdykh chastits dvizheniyem vysokoskorostnogo poyezda [Calculation of the problem of fly ash particles entrainment by movement of the high-speed train]. *Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of Tashkent Institute of Railway Transport Engineers], 2012, no 3. pp. 32-35.
16. Khamidov A.A., Isanov R.Sh., Yegamberdiyev B.B. Zadacha o dvizhenii chastits vozdukha v okrestnosti skorostnogo i vysokoskorostnogo passazhirskogo poyezda [The problem of motion of air particles in the vicinity of high-speed passenger train]. *Vestnik Tashkentskogo instituta inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta* [Bulletin of Tashkent Institute of Railway Transport Engineers], 2011, no. 3, pp. 50-55.
17. Khamidov A.A., Isanov R.Sh. Zadacha ob unose tverdykh chastits potokom vozdukha pri dvizhenii vysokoskorostnogo poyezda i raschety dlya raznykh form [The problem of fly ash particles entrainment by movement of the high-speed train and calculations for different forms of particles]. *Trudy konferentsii “Resursoberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte”* [Proc. of the Conf. “Resource-saving technologies on the railway transport”]. Tashkent, 2012. pp. 13-18.
18. Shlikhting G. *Teoriya pogrannichnogo sloya* [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 735 p.
19. Quinn D., Hayward M., Baker C.J., Schmid F., Priest J.A., Powrie W. A full-scale experimental and modeling study of ballast flight under high-speed trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transport*, 2010, vol. 224, no. 2, pp. 61-74.
20. Baker C. The flow around high speed trains. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, vol. 98, no. 6, pp. 277-298.
21. Muld T.W., Efraimsson G., Henningson D.S. Flow structures around a high-speed train extracted using Proper Orthogonal Decomposition and Dynamic Mode Decomposition. *Computers & Fluids*, 2012, no. 57, pp. 87-97.
22. Raghunathan R.S., Kim H.D., Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace sciences*, 2002, vol. 38, no. 6, pp. 469-514.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина); д.т.н. В. А. Габринцом (Украина)

Поступила в редколлегию 05.06.2013.

Принята к печати 08.08.2013.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.015:519.2

В. Ф. УШКАЛОВ¹, Л. Г. ЛАПІНА^{1*}, И. А. МАЩЕНКО¹¹Отдел статистической динамики механических систем, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, ул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 376 45 94, эл. почта victush@gmail.com^{1*}Отдел статистической динамики механических систем, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, ул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47 24 55, эл. почта lglap@bigmir.net¹Отдел статистической динамики механических систем, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, ул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47 24 55, эл. почта mashdnsk@gmail.com

РАСЧЕТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Цель. Формирование реализаций расчетных возмущений для исследования динамических качеств железнодорожных экипажей. **Методика.** Основой для построения составляющих возмущения являются записи показаний вагона-путеизмерителя, зафиксированные на одном из характерных участков Приднепровской железной дороги. Для получения фактических геометрических параметров рельсовой колеи записи путеизмерителя, использующего двухточечную схему измерений, преобразуются с учетом передаточной функции измерительной системы. Модель расчетного возмущения представлена в виде четырех составляющих: симметричной вертикальной неровности, определяемой как полусумма вертикальных неровностей правого и левого рельсов; кососимметричной вертикальной неровности пути, определяемой как полуразность вертикальных неровностей правого и левого рельсов; горизонтальных неровностей правого и левого рельсов. Критерием приемлемости построенных возмущений является близость определенных с их помощью значений показателей динамических качеств вагонов и соответствующих экспериментальных данных. **Результаты.** Предложено три способа формирования расчетного возмущения. Первый – использование в качестве составляющих расчетных возмущений записей показаний вагона-путеизмерителя, зарегистрированных на участке с достаточно высокой для заданного состояния пути балльностью, при этом симметричные вертикальные составляющие возмущения, полученные по записям просадок, корректируются в зависимости от массо-жесткостных параметров исследуемого вагона. Второй – построение и применение теоретических реализаций неровностей, соответствующих по спектральному составу реальному пути. Третий – создание полигармонической модели возмущения, параметрами которой являются значения основных частот и амплитуд, характерных для неровностей железнодорожного пути. Возможность практического применения построенных моделей возмущений показана на примере определения нормируемых показателей динамических качеств порожнего и груженого полувагонов. Сравнение расчетных показателей с экспериментальными данными показало их достоверность. **Научная новизна.** Построены три модели расчетных возмущений, которые могут использоваться при расчетах по оценке максимальных значений нормируемых динамических показателей грузовых экипажей. **Практическая значимость.** Применение результатов таких исследований позволяет давать приемлемые прогнозные оценки показателей динамических качеств проектируемых или модернизируемых единиц железнодорожного подвижного состава, уточнять значения отдельных параметров системы на стадии создания опытных образцов, сокращать расходы на ходовые испытания и т. п.

Ключевые слова: грузовые вагоны; динамические качества; возмущения со стороны пути; неровности пути; показания вагона-путеизмерителя

Введение

Теоретические исследования, в частности расчеты вынужденных колебаний железнодорожных экипажей, на сегодняшний день являются неотъемлемой составляющей процесса создания новых или модернизации существующих единиц подвижного состава. Их результаты позволяют давать прогнозные оценки показате-

лей динамических качеств проектируемых или модернизируемых экипажей, корректировать значения отдельных параметров системы на стадии создания опытных образцов, сокращать расходы на ходовые испытания и т. п.

Для получения достоверных прогнозных оценок показателей динамических качеств грузовых вагонов наряду с обоснованным выбором расчетной схемы и учетом основных характе-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ристик системи [5, 8, 6, 11, 12] необходимым условием является корректное задание входных возмущений.

Информацией для построения возмущений, действующих на рельсовый экипаж со стороны пути, могут быть, например, показания вагона-путеизмерителя, который производит измерения геометрических параметров рельсовой колеи в процессе движения, т. е. под динамической нагрузкой. Разработаны различные системы мониторинга и диагностики состояния пути, использование результатов работы которых для расчетов в каждом случае имеет свои особенности [1–4, 13, 14]. На железных дорогах Украины состояние рельсового пути контролируется вагонами-путеизмерителями ЦНИИ-2 (или переоборудованными из них КВЛ-П1М), в которых применяются двухточечные схемы измерения вертикальных неровностей каждой рельсовой нити (просадок) и горизонтальных неровностей (положения рельсовых нитей по направлению в плане).

Цель

Целью работы является разработка способов формирования реализаций расчетных возмущений для исследования динамических качеств железнодорожных экипажей.

Методика

В данной работе предложено три способа построения расчетных входных возмущений на основе записей показаний вагона-путеизмерителя. Каждое возмущение включает в себя четыре составляющие: симметричную вертикальную неровность рельсового пути, характеризующую неровности профиля пути и определяемую как полусумма вертикальных неровностей правой и левой рельсовых нитей; кососимметричную вертикальную неровность пути, характеризующую превышение одной рельсовой нити над другой и определяемую как полуразность вертикальных неровностей двух рельсовых нитей; две горизонтальные неровности – для правой и левой рельсовых нитей.

Поскольку записи показаний путеизмерителя отличаются от фактических неровностей пути под ним как формой, так и величиной [8], то для устранения методической погрешности измерений они должны быть преобразованы

с учетом передаточной функции измерительной системы. Формирование реализаций фактических неровностей для каждого анализируемого отрезка пути осуществляется следующим образом: к записям просадок и неровностей в плане применяется прямое преобразование Фурье, полученные комплексные коэффициенты Фурье умножаются на комплексную обратную частотную характеристику измерительной системы (имеющую разный вид для вертикальных и горизонтальных неровностей), затем с помощью обратного преобразования Фурье определяются реализации неровностей [10].

Критерием приемлемости построенных возмущений является близость определенных с их помощью значений показателей динамических качеств вагонов и соответствующих экспериментальных данных.

Результаты

Первый способ заключается в использовании в качестве составляющих расчетных возмущений непосредственно записей показаний путеизмерителя, зарегистрированных на участке с достаточно высокой для заданного состояния пути балльностью. Сопоставление расчетных значений нормируемых показателей динамических качеств полувагонов, полученных при задании возмущений, соответствующих участкам пути хорошего состояния, с результатами экспериментов показало, что значения показателей в вертикальной плоскости для порожнего вагона расположены в области экспериментальных данных, а для груженого – существенно ниже ее нижней границы. В то же время расчетные значения показателей полувагона в горизонтальной плоскости и качественно, и количественно хорошо согласуются с результатами экспериментов. Это позволило предположить, что вертикальные составляющие возмущения, сформированные по записям просадок, нуждаются в корректировке.

Необходимость корректировки связана с особенностями традиционного способа измерений: величина просадок рельсовых нитей, измеряемая путеизмерителем и используемая при формировании вертикальных составляющих возмущения, зависит не только от геометрических неровностей пути, но и от динамического взаимодействия железнодорожного пути

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

и вагона-путеизмерителя. На уровень динамической составляющей в каждой точке пути влияют многие параметры – участвующие во взаимодействии массы, упругие характеристики подвешивания, демпфирование в подвешивании, скорость движения экипажа, значение геометрической составляющей и др., поэтому для всех грузовых экипажей, имеющих значения параметров, отличные от параметров вагона-путеизмерителя, изготовляемого на базе пассажирского вагона, вертикальные составляющие расчетных возмущений нужно корректировать с учетом данных о параметрах конкретного вагона. Составляющие возмущения в горизонтальной плоскости, которые в меньшей степени испытывают влияние характеристик экипажа, а в основном определяются собственно геометрией пути, в корректировке не нуждаются.

Корректирующий коэффициент предлагается [10] приближенно определять в виде постоянной для данного грузового экипажа величины, взяв за основу способ корректирующих множителей [11].

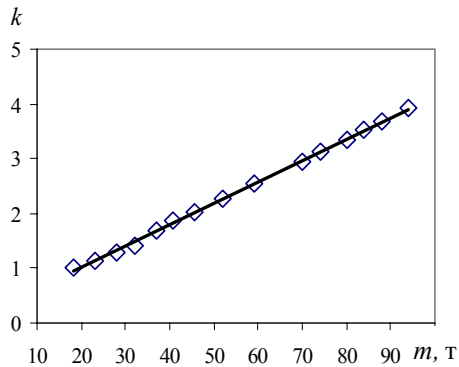


Рис. 1. Корректирующий коэффициент

Для широкого класса четырехосных грузовых вагонов с тележками модели 18–100 (или комплексно модернизированных тележек 18–100) построена зависимость (рис. 1) корректирующего коэффициента k от массы вагона (тары или брутто) m , выраженной в тоннах. При определении этого коэффициента использованы значения масс пятнадцати видов грузовых вагонов, оборудованных тележками модели 18–100 (маркеры \diamond). Как видно из графика, изменение уровня вертикальной составляющей возмущения при изменении массовых парамет-

ров вагонов является весьма существенным; для порожних вагонов корректирующий коэффициент близок к единице.

Зависимость корректирующего коэффициента от массы вагона, приведенная на графике, близка к линейной, поэтому ее можно заменить линейным трендом (сплошная линия на рис. 1) и описать уравнением

$$k = 0,039m + 0,231, \quad (1)$$

при этом величина квадрата смешанной корреляции, отражающая близость значений линии тренда к фактическим данным и в идеальном случае равная единице, составляет 0,999; относительная погрешность не превышает 5 %.

При использовании в качестве вертикальных составляющих возмущений неровностей правой и левой рельсовых нитей обработанные записи просадок необходимо умножать на корректирующие коэффициенты, значения которых различны в каждой точке пути [10].

Второй способ формирования расчетных входных возмущений в условиях недостатка экспериментальных данных о геометрии пути состоит в построении реализаций процессов, соответствующих по спектральному составу неровностям реального пути. Для этого оценки спектральных плотностей фактических неровностей пути группируются в зависимости от наибольшей на участке степени отступлений соответствующих неровностей от норм содержания рельсовой колеи. В качестве обобщающей характеристики используется огибающая максимальных значений спектральных плотностей. В этом случае полностью учитывается частотный состав анализируемых неровностей. Аналитическое выражение такой огибающей аппроксимируется дробно-рациональной функцией, аналогичной тем, которые рекомендованы для статистического описания случайных неровностей на дорогах различного качества содержания Федеральным управлением железных дорог США [12].

Далее с помощью алгоритма Райса – Пирсона генерируются теоретические реализации неровностей. Расчетные возмущения следует формировать из определенного сочетания таких реализаций с учетом наибольших на участке степеней отступлений неровностей от норм и комбинации случайных фаз гармонических

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

компонент, принимая во внимание тот факт, что характер изменения неровностей правой и левой рельсовых нитей близок к синхронному.

Отметим, что значения среднеквадратических отклонений показателей динамических качеств грузовых вагонов, полученные при использовании построенных согласно этому способу возмущений, будут существенно завышенными.

Третий способ построения расчетных возмущений базируется на применении результатов исследования частотного состава неровностей на различных участках пути. Частоты, при которых имеются значительные пики на графике спектральной плотности и, следовательно, доля энергии гармонических колебаний с этими частотами велика, будем называть характерными для анализируемого процесса. Основные характерные частоты для вертикальных неровностей железнодорожного пути в целом и соответствующие им амплитуды определены по результатам анализа спектральных плотностей составляющих возмущений, полученных по записям вагона-путеизмерителя [7]. С использованием значений этих частот и амплитуд могут быть построены различные модели расчетного возмущения для проведения исследований динамических качеств полувагонов, вертикальные составляющие (симметричная и кососимметричная) которых представлены в виде линейной комбинации гармонических компонент:

$$B(x) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \sin(2\pi x / L_i), \quad (2)$$

где a_i и L_i , $i = \overline{1, N}$ – соответственно амплитуда и длина волны гармонической компоненты; N – количество гармонических компонент в модели возмущения.

Горизонтальные составляющие такого возмущения могут быть представлены в аналогичном виде с учетом результатов амплитудно-частотного анализа горизонтальных неровностей пути.

Сравнение возмущений. Рассмотрим три модели возмущений, сформированных описанными выше способами:

– возмущение В1, соответствующее реальному участку пути с качественной оценкой «хо-

рошо» и суммой баллов по вертикальным неровностям 58 (54 балла за просадки правой рельсовой нити, одно отступление от норм содержания рельсовой колеи IV степени и два – II степени; 2 балла за просадки левой рельсовой нити, одно отступление II степени; 2 балла за перекося рельсовых нитей) и 17 баллов за отступления в плане по обоим рельсовым нитям;

– возмущение В2, построенное по аналитическим выражениям огибающих максимальных значений спектральных плотностей вертикальных неровностей пути с отступлениями от норм не выше II и IV степени и горизонтальных неровностей I и II степени по правой и левой рельсовым нитям соответственно;

– возмущение В3, вертикальные составляющие которого вычислены по формуле (2) с учетом восьми основных характерных частот и параметрами a_i и L_i , $i = \overline{1, 8}$ из табл. 1, 2 для $p = 0,99$ [6]; горизонтальные составляющие приняты такими же, как и в возмущении В1.

На рис. 2 показаны фрагменты вертикальных (симметричной и кососимметричной) и горизонтальных на двух рельсовых нитях составляющих указанных возмущений. Из графиков видно, что в основном самый низкий уровень симметричной составляющей имеет возмущение В1, более высокий – возмущения В2 и В3.

Наибольшее значение кососимметричной составляющей имеет возмущение В1, чуть ниже – В3 и самое низкое – В2. Как свидетельствуют данные ведомостей о состоянии пути, наиболее характерными неровностями, которые составляют основной вклад в балльность, являются перекося рельсовых нитей, что как раз соответствует высокому уровню кососимметричной составляющей возмущений. Следовательно, по этому признаку возмущения В1 и В3 наиболее соответствуют типичным реальным участкам пути.

Уровень горизонтальных составляющих и отличия на двух рельсовых нитях у всех возмущений примерно одинаковы. Это связано с тем, что горизонтальные составляющие возмущений, в отличие от вертикальных, практически не зависят от параметров экипажа, а определяются, в основном, геометрией пути.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

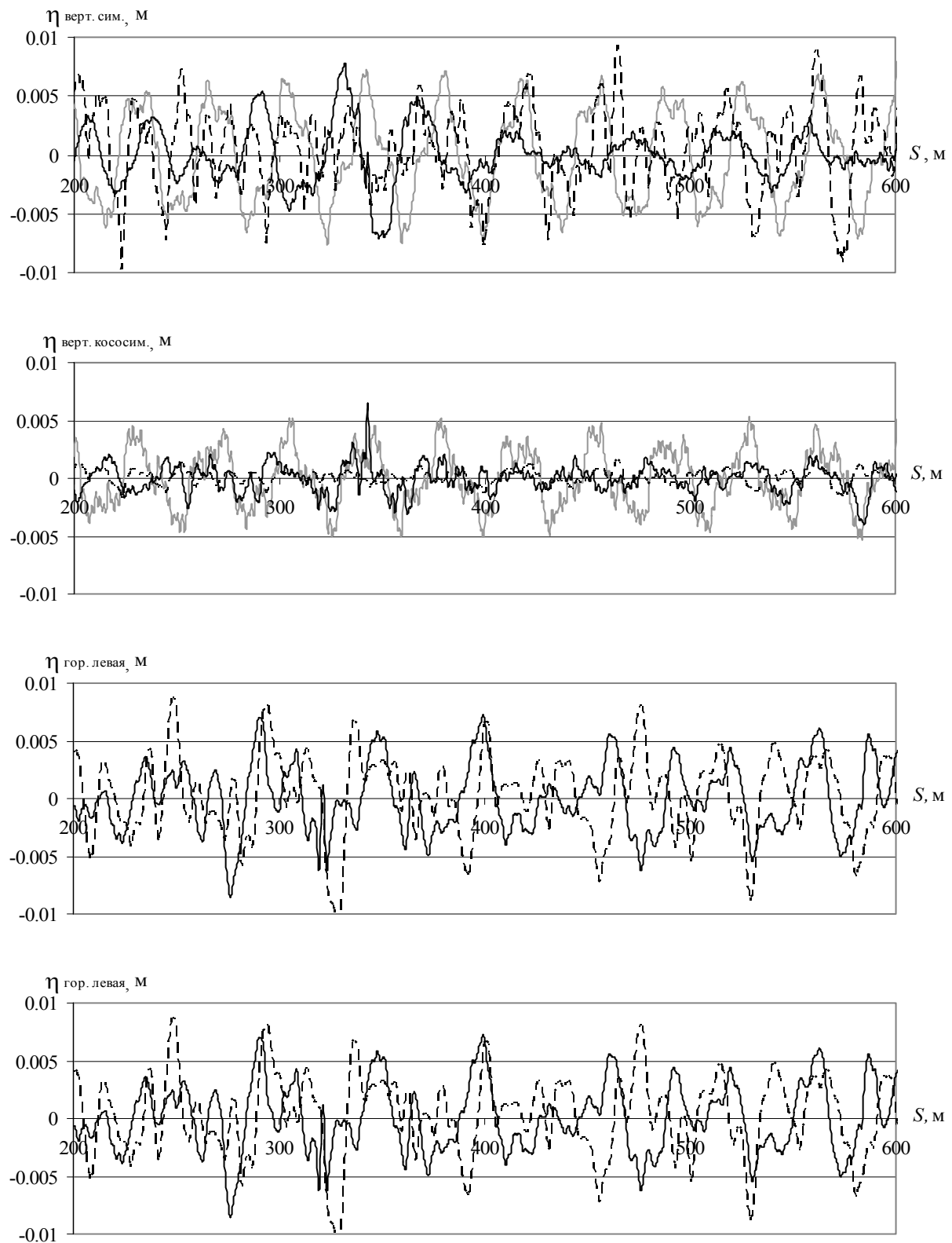


Рис. 2. Составляющие расчетных возмущений (сплошная темная линия – возмущение B1, штриховая линия – возмущение B2, сплошная светлая линия – возмущение B3)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

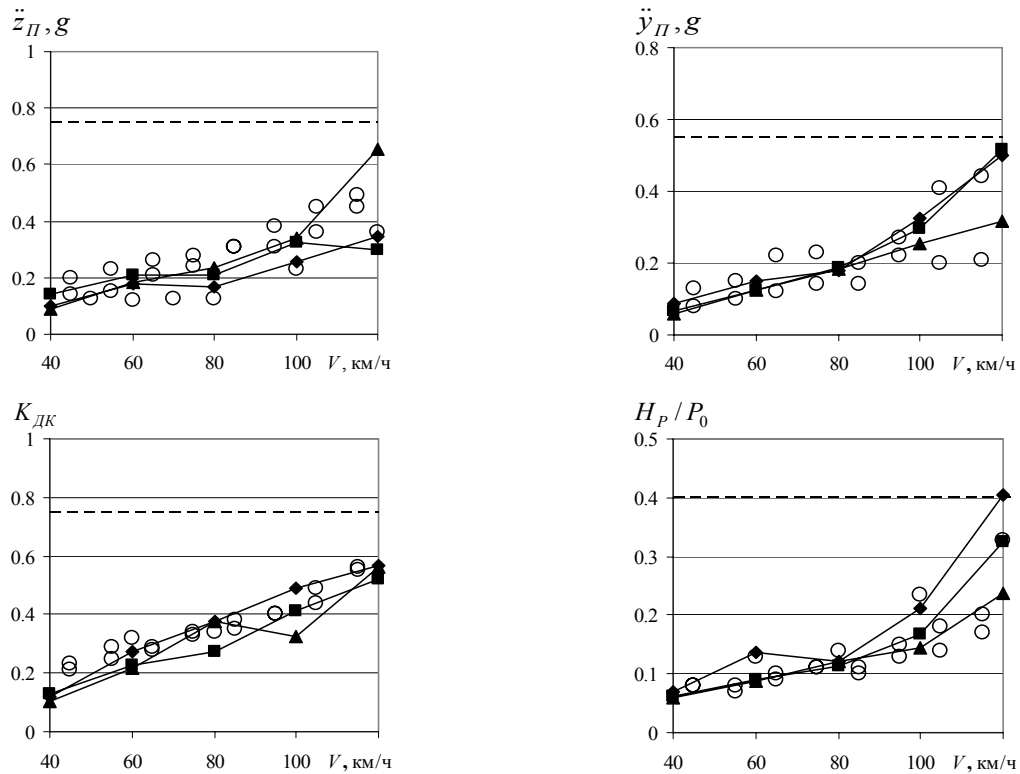


Рис. 3. Показатели динамических качеств порожнего полувагона

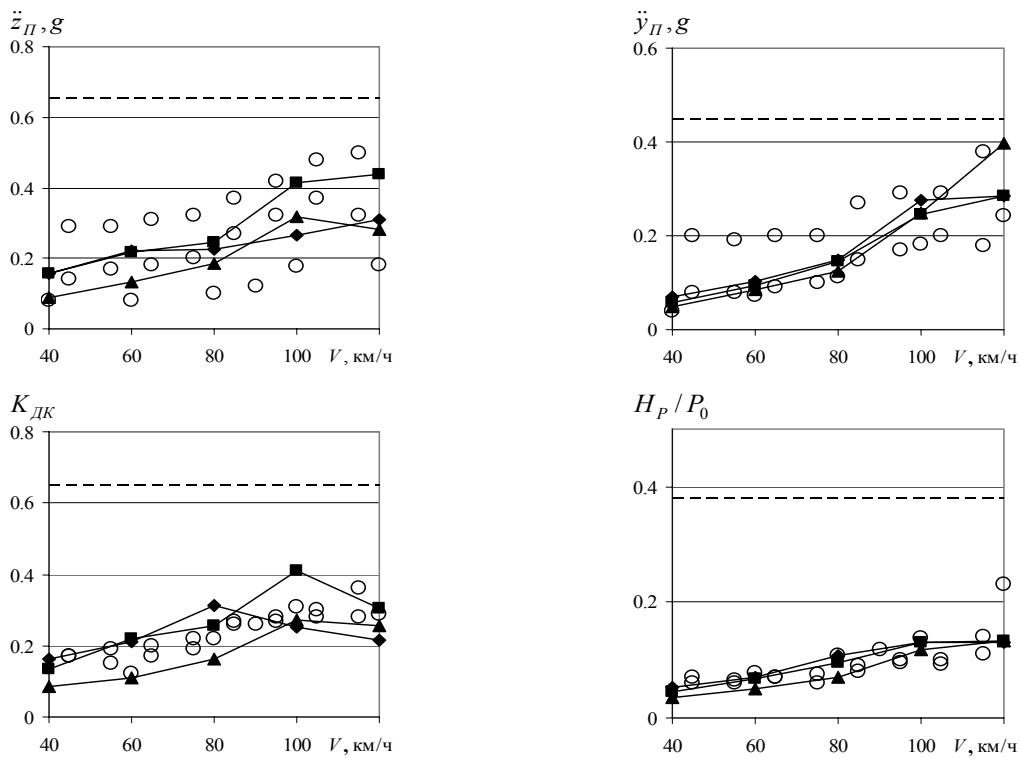


Рис. 4. Показатели динамических качеств груженого полувагона

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

При расчетах линейных систем можно спрогнозировать характер результатов, которые будут получены. Так, примерно в той же последовательности, что и уровни симметричных составляющих возмущений, будут располагаться максимальные значения вертикальных ускорений кузова, а максимальные значения горизонтальных ускорений кузова будут достаточно близкими. Поведение показателей, зависящих от нескольких составляющих возмущения, менее предсказуемо. При расчетах же нелинейных систем подобный прогноз сделать весьма затруднительно.

Для оценки возможности использования построенных моделей возмущений выполнены расчеты по определению показателей динамических качеств полувагонов, которые описываются нелинейными уравнениями. В качестве примера на рис. 3, 4 показаны зависимости от скорости движения максимальных значений вертикальных \ddot{z}_n и горизонтальных \ddot{y}_n ускорений пятников, коэффициентов вертикальной динамики $K_{дк}$ кузова и рамных сил H_p в долях статической осевой нагрузки P_0 порожнего и груженого полувагонов. Результаты, полученные при задании возмущения В1 – сплошные линии с маркерами \blacklozenge , возмущения В2 – сплошные линии с маркерами \blacktriangle , возмущения В3 – линии с маркерами \blacksquare . Маркеры \bigcirc на рисунках соответствуют экспериментальным значениям динамических показателей полувагонов, полученным на дорогах Украины и России; горизонтальными штриховыми линиями нанесены уровни значений для «допустимого» хода вагона.

Как видно из рисунков, расчетные значения всех показателей имеют близкую к экспериментальной зависимость от скорости движения, лежат, в основном, в области экспериментальных данных и не превышают предельно допустимых значений. Следовательно, результаты, полученные с помощью всех трех предложенных моделей возмущений, можно считать приемлемыми для оценки максимальных значений нормируемых показателей динамических качеств грузовых вагонов.

Научная новизна и практическая значимость

Задание корректных входных возмущений при теоретической оценке динамических показателей экипажа необходимо для получения

достоверных прогнозов об эффективности эксплуатации на отечественных железных дорогах экипажей с измененной конструкцией или новых образцов. Предложенные способы построения расчетных возмущений, основанные на известных подходах, являются оригинальными с точки зрения разработанных схем их реализации.

Выводы

Предложенные три модели расчетных возмущений пригодны для использования при компьютерном исследовании динамических качеств грузовых вагонов. При этом наиболее достоверно оцениваются максимальные значения нормируемых показателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боронахин, А. М. Малогабаритная интегрированная система диагностики рельсового пути / А. М. Боронахин, Л. Н. Олейник, Н. С. Филиппеня // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 1 (64). – С. 63–74.
2. Боронахин, А. М. Мобильная инерциальная система мониторинга рельсового пути / А. М. Боронахин, Е. Д. Бохман // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2011. – № 10. – С. 84–91.
3. Боронахин, А. М. К вопросу о синтезе путеизмерительных комплексов нового поколения / А. М. Боронахин, В. И. Гупалов, Н. С. Филиппеня // Железные дороги мира. – 2004. – № 8. – С. 68–72.
4. Використання цифрової вимірювальної техніки для експериментальних досліджень взаємодії колії і рухомого складу / І. О. Бондаренко, Д. М. Курган, О. М. Патласов, В. Є. Савлук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 124–128.
5. Захаров, С. М. Математическое моделирование влияния параметров пути и подвижного состава на процессы изнашивания колеса и рельса / С. М. Захаров, Ю. С. Ромен // Вестн. ВНИИЖТа. – 2010. – № 2. – С. 26–30.
6. К вопросу моделирования пути при исследовании взаимодействия пути и подвижного состава / М. И. Уманов, В. В. Цыганенко, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 30. – С. 239–242.
7. Лапина, Л. Г. Амплитудно-частотный анализ вертикальных неровностей железнодорожного

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- пути / Л. Г. Лапина, И. А. Машенко // Техническая механика. – 2012. – № 3. – С. 9–15.
8. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис, С. М. Захаров, Дж. Ландгрэн и др. – М. : Интекст, 2002. – 408 с.
 9. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0020 : затв. наказом Укрзалізниці від 17.01.1996 р. № 9-Ц. – К., 2005. – 48 с.
 10. Ушкалов, В. Ф. Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Машенко // Заліз. трансп. України. – 2012. – № 1. – С. 38–41.
 11. Ушкалов, В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – К. : Наук. думка, 1982. – 360 с.
 12. Garg, V. K. Dynamics of Railway Vehicle Systems / V. K. Garg, R. V. Dukkipati. – New York : Academic Press, 1984. – 407 p.
 13. The influence of track irregularities on the running behavior of high-speed trains / I-Y. Choi, J-H. Um, J. S. Lee, H-H. Choi // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2013. – Vol. 227. – Issue 1. – P. 94–102.
 14. Pombo, J. An alternative method to include track irregularities in railway vehicle dynamic analyses / J. Pombo, J. Ambrósio // Nonlinear Dynamics. – 2012. – Vol. 68. – Issue 1–2. – P. 161–176.

В. Ф. УШКАЛОВ¹, Л. Г. ЛАПІНА^{1*}, І. О. МАЩЕНКО¹

¹Відділ статистичної динаміки механічних систем, Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, м. Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 376 45 94, ел. пошта victush@gmail.com

¹Відділ статистичної динаміки механічних систем, Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47 24 55, ел. пошта lglap@bigmir.net

¹Відділ статистичної динаміки механічних систем, Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України, вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47 24 55, ел. пошта mashdnsk@gmail.com

РОЗРАХУНКОВІ ЗБУРЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНИХ ЯКОСТЕЙ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Мета. Формування реалізацій розрахункових збурень для дослідження динамічних якостей залізничних екіпажів. **Методика.** Основою для побудови складових збурення є записи показань вагона-колієвимірювача, зафіксовані на одній з характерних ділянок Придніпровської залізниці. Для отримання фактичних геометричних параметрів рейкової колії записи колієвимірювача, який використовує двоточкову схему вимірів, перетворюються з урахуванням передаточної функції вимірювальної системи. Модель розрахункового збурення представлено у вигляді чотирьох складових: симетричної вертикальної нерівності, яка визначається як півсума вертикальних нерівностей правої та лівої рейок; кососиметричної вертикальної нерівності, яка визначається як піврізниця вертикальних нерівностей правої та лівої рейок; горизонтальних нерівностей правої і лівої рейок. Критерієм прийнятності побудованих збурень є близькість визначених за їх допомогою значень показників динамічних якостей вагонів і відповідних експериментальних даних. **Результати.** Запропоновано три способи формування розрахункового збурення. Перший – використання як складових розрахункових збурень записів показань вагона-колієвимірювача, зареєстрованих на ділянці з досить високою для заданого стану колії бальністю, при цьому симетричні вертикальні складові збурення, отримані за записами осідань, коригуються залежно від масо-жорсткісних параметрів досліджуваного вагона. Другий – побудова і застосування теоретичних реалізацій нерівностей, які за спектральним складом відповідають реальній колії. Третій – створення полігармонічної моделі збурення, параметрами якої є значення основних частот і амплітуд, характерних для нерівностей залізничної колії. Можливість практичного застосування побудованих моделей збурень показана на прикладі визначення нормованих показників динамічних якостей порожнього й навантаженого піввагонів. Порівняння розрахункових показників з експериментальними даними показало їх достовірність. **Наукова новизна.** Побудовано три моделі розрахункових збурень, які можуть використовуватися при розрахунках щодо оцінки максимальних значень нормованих динамічних показників вантажних екіпажів. **Практична значимість.** Застосування результатів таких досліджень дозволяє давати прийнятні прогнози оцінки показників динамічних якостей проєктованих або модернізованих одиниць залізничного рухомого складу, уточнювати значення окремих параметрів системи на стадії створення дослідних зразків, скорочувати витрати на ходові випробування й та ін.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Ключові слова: вантажний вагон; динамічні якості; збурення з боку колії; нерівності колії; показання вагона-колесівимірювача

V. F. USHKALOV¹, L. G. LAPINA^{1*}, I. A. MASHCHENKO¹

¹Dep. «Statistical Dynamics of Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics NASU&SSAU, Lyashko-Popel Str., 15, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 376 45 94, e-mail victush@gmail.com

^{1*}Dep. «Statistical Dynamics of Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics NASU&SSAU, Lyashko-Popel Str., 15, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 47 24 55, e-mail lglap@bigmir.net

¹Dep. «Statistical Dynamics of Mechanical Systems», Institute of Technical Mechanics NASU&SSAU, Lyashko-Popel Str., 15, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 47 24 55, e-mail mashdnsk@gmail.com

CALCULATED DISTURBANCES FOR EVALUATION OF DYNAMICAL PROPERTIES OF FREIGHT CARS

Purpose. To form realizations of the calculated disturbances for studying the dynamic properties of railway vehicles. **Methodology.** Records of the track-test car for one of the typical track sections of the Pridneprovsk railroad are the basic data for building the disturbance components. To derive the true geometric parameters of the railway gauge the records of the track-test car using a double-point metering circuit are transformed considering the transfer function of the measuring system. A model of the calculated disturbances is presented as the four components: a symmetric vertical irregularity determined as a semi-sum of vertical irregularities of the right and left rails; an oblique-symmetric vertical irregularity of the track determined as a semi-difference of vertical irregularities of the right and left rails; horizontal irregularities of the right and left rails. Acceptability criterion of the constructed disturbances is a relationship between the values of the dynamical properties factors of cars and the corresponding experimental data. **Findings.** The three techniques for the calculated disturbances forming are proposed. The first technique uses records of the track-test car for the track with a sufficiently high amount for given track conditions as components of the calculated disturbances. In so doing symmetrical vertical components of disturbances resulting from records of settling are corrected with the mass and stiffness parameters of the car under consideration. The second technique uses building and applying the theoretical realizations of irregularities corresponding to a real track according to a spectral analysis. The third technique ensures a polyharmonic model of disturbances, the parameters of which are the values of the basic frequencies and amplitudes that are typical for irregularities of a railway track. A possibility of practical applying of the constructed models of disturbances are presented using an example for defining the standardized factors of the dynamical properties of empty and loaded open cars. Comparison of the calculated factors and experimental data demonstrated its assurance. **Originality.** The three models of the calculated disturbances that can be used for calculating estimation of the maximal values of the standardized dynamical factors of freight vehicles are proposed. **Practical value.** The research results ensure an acceptable predicted evaluation of the dynamical properties factors for the designed or refitted vehicles of railway rolling stock, refinement of the values of the certain system parameters at the stage of prototypes, reduction of the expenses for performance trials, etc.

Keywords: freight cars; dynamic quality; disturbances from the road; track irregularity; track-test records

REFERENCES

1. Boronakhin A.M., Oleynik L.N., Filipenya N.S. Malogabaritnaya integrirovannaya sistema diagnostiki relsovogo puti [Small-scale integrated system of diagnostics of railway track]. *Giroskopiya i navigatsiya – Gyroscopy and Navigation*, 2009, no. 1, pp. 63-74.
2. Boronakhin A. M., Bokhman E. D. Mobilnaya inertsialnaya sistema monitoringa relsovogo puti [The mobile inertial system of monitoring of a rail way]. *Izvestiya SPbGETU "LETI" – Bulletin of SPSEU "LETI"*, 2011, no. 10, pp. 84-91.
3. Boronakhin A.M., Gupalov V.I., Filipenya N.S. K voprosu o sinteze puteizmeritelnykh kompleksov novogo pokoleniya [To the question of the track-test complexes synthesis of the new generation]. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 2004, no. 8, pp. 68-72.
4. Bondarenko I.O., Kurhan D.M., Patlasov O.M., Savluk V.Ye. Vykorystannia tsyfrovoy vymirivualnoi tekhniki dlia eksperymentalnykh doslidzhen vzaємodii kolii i rukhomoho skladu [The use of digital measuring technology for experimental studies of track and rolling stock interaction]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsional-*

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 124-128.
5. Zakharov S.M., Romen Yu.S. Matematicheskoye modelirovaniye vliyaniya parametrov puti i podvizhnogo sostava na protsessy iznashivaniya koleasa i relsa [Mathematical modeling of the influence of the track and rolling stock parameters on the processes of wheel and rail wear]. *Vestnik VNIIZhTa – VNIIZhT Bulletin*, 2010, no. 2, pp. 26-30.
 6. Umanov M.I., Tsyganenko V.V., Reydemeyster A.G., Khalipova N.V. K voprosu modelirovaniya puti pri issledovanii vzaimodeystviya puti i podvizhnogo sostava [To the question of track modeling at the cooperation research of the track and rolling stock]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 30, pp. 239-242.
 7. Lapina L.G., Mashchenko I.A. Amplitudno-chastotnyy analiz vertikalnykh nerovnostey zheleznodorozhnogo puti. [Amplitude and frequency analysis of the vertical irregularities of railway track]. *Tekhnicheskaya mekhanika – Technical mechanics*, 2012, no. 3, pp. 9-15.
 8. Kharris U.Dzh., Zakharov S.M., Landgren Dzh., Turne Kh., Ebersen V. *Obobshcheniye peredovogo opyta tyazhelevogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya koleasa i relsa* [Generalization of advanced experience of heavy vehicle motion: wheel and rail interworking]. Moscow, Intekst Publ., 2002. 408 p.
 9. *Tekhnichni vkazivky shchodo otsinky stanu reikovoï kolii za pokaznykamy koliievymirivvalnykh vahoniv ta zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannia reikovoï kolii* [Technical instructions in relation to estimation of the rail track state according to the parameters of the track-test cars and providing of train motion safety at the deviations from the norms of rail track maintenance]. Kyiv, 2005. 48 p.
 10. Ushkalov V.F., Lapina L.G., Mashchenko I.A. Raschetnyye vozmushcheniya dlya issledovaniya dinamiki zheleznodorozhnykh vagonov [Computation disturbances for dynamics research of the railway cars]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2012, no. 1. pp. 38-41.
 11. Ushkalov V.F., Reznikov L.M., Redko S.F. *Statisticheskaya dinamika relsovykh ekipazhey* [Statistical dynamics of rail cars]. Kyiv, Nauk. Dumka Publ., 1982. 360 p.
 12. Garg V.K., Dukkipati R.V. Dynamics of Railway Vehicle Systems. New York, Academic Press Publ., 1984. 407 p.
 13. Il-Yoon Choi, Ju-Hwan Um, Jun S Lee, Hyun-Ho Choi. The influence of track irregularities on the running behavior of high-speed trains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2013, vol. 227, issue 1, pp. 94-102.
 14. Pombo J., Ambrósio J. An alternative method to include track irregularities in railway vehicle dynamic analyses. *Nonlinear Dynamics*, 2012, vol. 68, issue 1-2, pp. 161-176.

Статья рекомендована к публикации д.т.н. Н. А. Радченко (Украина); д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина)

Поступила в редколлегию 19.12.2012

Принята к печати 24.07.2013

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 69:005.93

А. В. РАДКЕВИЧ^{1*}, И. А. АРУТЮНЯН²

^{1*}Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47 18 65, эл. почта bely-a@yandex.ru

²Каф. «Промышленное и гражданское строительство», Запорожская государственная инженерная академия, пр. Ленина, 226, 69006, Запорожье, Украина, тел. +38 (066) 900 78 28, эл. почта iirara@yandex.ru

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Цель. Разработка теоретико-методологических подходов и научно-практических рекомендаций относительно управления материальными потоками строительного комплекса. **Методика.** Исследование включает анализ существующих научных работ по вопросам, связанным с управлением программами развития строительства с учетом логистизации на предприятиях разной отраслевой принадлежности, которые относятся к строительному комплексу; обобщение и систематизацию опыта принятия управленческих решений в процессе подготовки производства, в частности управление движением материальных потоков строительных ресурсов и сопровождающих их информационных потоков, логический анализ, моделирование и системную обработку информации. **Результаты.** Результаты дают возможность руководству строительных организаций оценить материально-техническое обеспечение своих строительных объектов согласно срокам строительства, технологии строительных процессов, а также учесть минимизацию затрат. **Научная новизна.** С единых системных позиций на основе развития методики организации, планирования и управления сформулированы теоретические и методологические основы управления формированием логистических систем в программах развития строительного комплекса. **Практическая значимость.** Вклад в решение многих сложных организационных и экономических задач, которые сопровождаются проблемами развития строительства, обеспечивается за счет повышения эффективности управления материальными потоками строительного комплекса.

Ключевые слова: организация строительного производства; логистика; логистические системы; материальный поток; информационный поток; строительный комплекс

Введение

На сегодняшний день общество не может эффективно развиваться и функционировать без строительного комплекса. От эффективного развития строительной отрасли зависит реконструкция жилищных фондов, строительство жилья, промышленных предприятий, транспортных объектов, больниц, школ, торговых центров и тому подобное. Строительный комплекс дает возможность для роста производства

во всех отраслях экономики Украины [1, 8, 9].

Переход к рыночным отношениям сопровождается изменениями как в самих строительных системах, так и в среде их функционирования. Результатом социально-экономических изменений стал резкий рост неопределенности внешней среды для строительства [3, 4].

Для развития строительства и строительного комплекса в целом в современных условиях необходим новый инструментарий, который

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

позволяет комплекс проблем (задач) организовать в виде системы с учетом межсистемных связей и найти оптимальное решение для этой системы.

Строительный комплекс можно рассмотреть в виде производственных систем, где должны учитываться связи между их участниками (строительные объекты – заводы стройиндустрии). Эффективное воспроизводство этих систем обеспечивается с помощью организации материальных потоков и управления ними [4].

Цель

Рассмотрение инновационных (логистических и системотехнических) подходов, которые создают оптимальные условия организации бесперебойного обеспечения строительного производства ресурсами с учетом управления материальными, информационными, финансовыми и трудовыми потоками, соответствующими технологии и организации строительного процесса и позволяющими успешно завершить строительство в срок при минимальных расходах.

Методика

Строительство – это система взаимоотношений предприятий стройиндустрии, выраженных через материально-техническое обеспечение стройки с учетом межсистемных связей. Для строительства любых зданий и сооружений необходимы строительные материалы, конструкции и изделия, сырье и технологическое оборудование и др., количество которых определено проектом на строительно-монтажные работы. Процесс организации строительного производства предусматривает четкую поставку этих ресурсов в заданном объеме, в указанные сроки и соответствующего качества [5]. Для решения подобных задач применяются методы логистики.

Логистика – наука об организации, планировании и оптимизации материальных потоков, услуг и связанных с ними информационных и других потоков, управлении ими в определенной экономической системе для достижения поставленных перед ней целей [12].

Материальный поток (МП) – находящиеся в состоянии движения материальные ресурсы, незавершенное производство и готовая продук-

ция, к которым применяются логистические операции или функции, связанные с физическим перемещением в пространстве (погрузка, разгрузка, перевозка, затаривание продукции, разукрупнение и т. п.) [5, 12].

Материальные ресурсы (МР) – предметы труда: сырье, основные и вспомогательные материалы, полуфабрикаты, комплектующие изделия, сборочные единицы, топливо, запасные части, предназначенные для ремонта и обслуживания технологического оборудования и других основных фондов [5, 12].

Решению сложных задач по совершенствованию управления строительным комплексом способствует логистический подход. Актуальность развития управления на принципах логистики выросла в условиях перехода к рыночным отношениям. Это связано с увеличением горизонтальных хозяйственных связей между предприятиями и организациями строительного комплекса [7, 11].

Результаты

Статья раскрывает проблемы организации и управления материально-техническим обеспечением строительного производства, что связано с определением цели исследования – формирование организационных решений строительных проектов (объектов) на базе инновационно-логистических подходов, которые требуют четкого и рационального планирования и управления материальными потоками.

Строительный комплекс тесно связан со всеми отраслями хозяйства. С его участием создают большинство основных производственных и непроизводственных фондов. Вместе с тем комплекс является потребителем продукции многих отраслей: в строительстве используется 10 % продукции машиностроения, 20 % проката черных металлов, 40 % лесоматериалов, изделий химической промышленности (лаки, краски, пластмассы). Для производства строительных материалов нужно большое количество топлива и воды. Строительные материалы, конструкции являются важной составной частью грузооборота транспорта [4, 6, 9].

Изучение строительного комплекса Украины является крайне актуальным.

Для того чтобы построить любой объект, необходимы сырье, материалы, полуфабрикаты,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

конструкции, технологическое оборудование и тому подобное – до сотни наименований. А это, в свою очередь, требует четко сформировать организационную систему обеспечения строительного проекта (объекта). Поэтому капитальное строительство в условиях рыночной экономики объективно сопрягается с логистикой, а именно управлением материальными потоками и сопровождающими их информационными потоками [2].

На основе сформулированной проблематики была разработана программа «Информационный поток» (рис. 1), которая позволяет рассчитать обеспечение строительных объектов материальными ресурсами.

с учетом дефицита, приоритета, наличия ресурсов, календарного начала строительства. Данные параметры отражены в математической модели в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \varpi_i, \\ & \sum_{r=1}^R C_{br} \sum_{t=1}^T \psi_{irt-T_i}^{(v)}, \\ & \sum_{t=1}^T \max \left\{ \sum_{\tau=1}^t \psi_{irt-\Theta_i}^{(v)} - \sum_{\tau=1}^t \mu_{r\tau}, 0 \right\}, \\ & \sum_{t=1}^T \max \left\{ \sum_{\tau=1}^t \mu_{r\tau} - \sum_{\tau=1}^t \psi_{irt-T_i}^{(v)} - Q_r, 0 \right\} \rightarrow \text{opt.} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

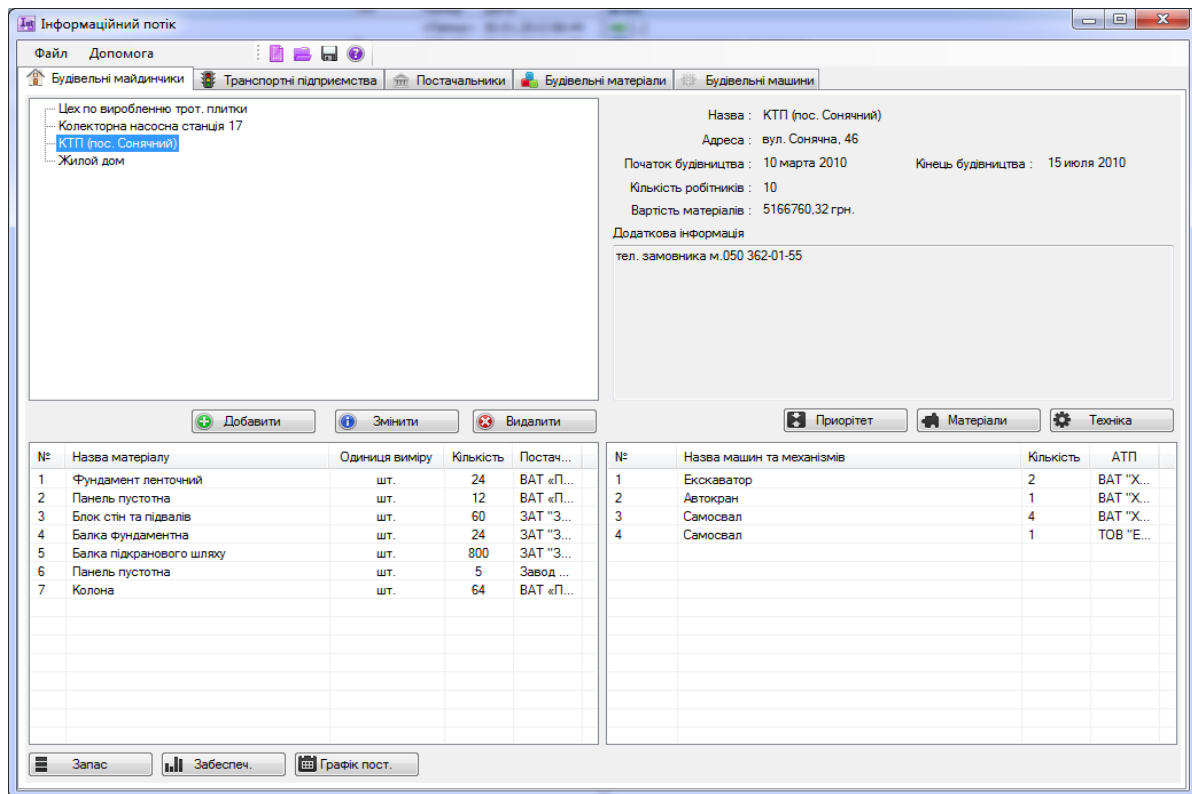


Рис. 1. Интерфейс программы «Информационный поток»

На практике при организации строительства следует учитывать такие факторы, как приоритет объекта, стоимость, лимит и дефицит, наличие строительных ресурсов, календарное начало и окончание, и т. п. Поэтому в программе «Информационный поток» детально была учтена информация, представленная в системе (1).

Расчет обеспечения строительных объектов, указанных в окне программы, произведен

$$IN = \sum_{i=1}^I \varpi_i \sum_{r=1}^R C_{br} \sum_{t=1}^T \psi_{irt-T_i}^{(v)} - \sum_{\tau=1}^t \mu_{r\tau} - \sum_{\tau=1}^t \psi_{irt-T_i}^{(v)} - Q_r,$$

где ϖ_i – приоритет объекта i ; C_{br} – стоимость строительного ресурса br ; $\psi_{irt}^{(v)}$ – лимит ресурса br ; T_i – календарное начало выполнения объекта i ; $\mu_{r\tau}$ – наличие ресурса br в календарный месяц t ; Q_r – объем запаса ресурса br ;

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$T_i^{(p)}$, $T_i^{(n)}$ – соответственно раннее и позднее календарное начало выполнения объекта i .

Ниже приведен пример использования программы «Информационный поток» для организации строительных объектов.

При нажатии кнопки «Обеспечение» («Забезпечення») проводится расчет обеспечения строительных площадок (объектов) материалами (Колонна). Расчеты приведены в табл. 1–3. На рис. 2–4 показано обеспечение строительных объектов согласно приоритету, календарному началу строительства, наличию ресурсов, дефициту.

Таблица 1

Цех по производству тротуарной плитки

| № | Месяц | Дефицит, шт. | Дефицит, грн | Обеспечение материалом, % |
|---|---------|--------------|--------------|---------------------------|
| 1 | 4.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 2 | 5.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 3 | 6.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 4 | 7.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 5 | 8.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 6 | 9.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 7 | 10.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 8 | 11.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 9 | 12.2012 | 0 | 0 | 100 |

Таблица 2

Коллекторная насосная станция 17

| № | Месяц | Дефицит, шт. | Дефицит, грн | Обеспечение материалом, % |
|---|--------|--------------|--------------|---------------------------|
| 1 | 4.2012 | 14 | 45602,48 | 86 |
| 2 | 5.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 3 | 6.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 4 | 7.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 5 | 8.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 6 | 9.2012 | 0 | 0 | 100 |

Таблица 3

КТП (пос. Солнечный)

| № | Месяц | Дефицит, шт. | Дефицит, грн | Обеспечение материалом, % |
|---|--------|--------------|--------------|---------------------------|
| 1 | 4.2012 | 24 | 78175,68 | 0 |
| 2 | 5.2012 | 7 | 22801,24 | 30 |
| 3 | 6.2012 | 9 | 29315,88 | 25 |
| 4 | 7.2012 | 0 | 0 | 100 |
| 5 | 9.2012 | 0 | 0 | 100 |

График ресурсного обеспечения строительства: Колонна 1К60-2М2

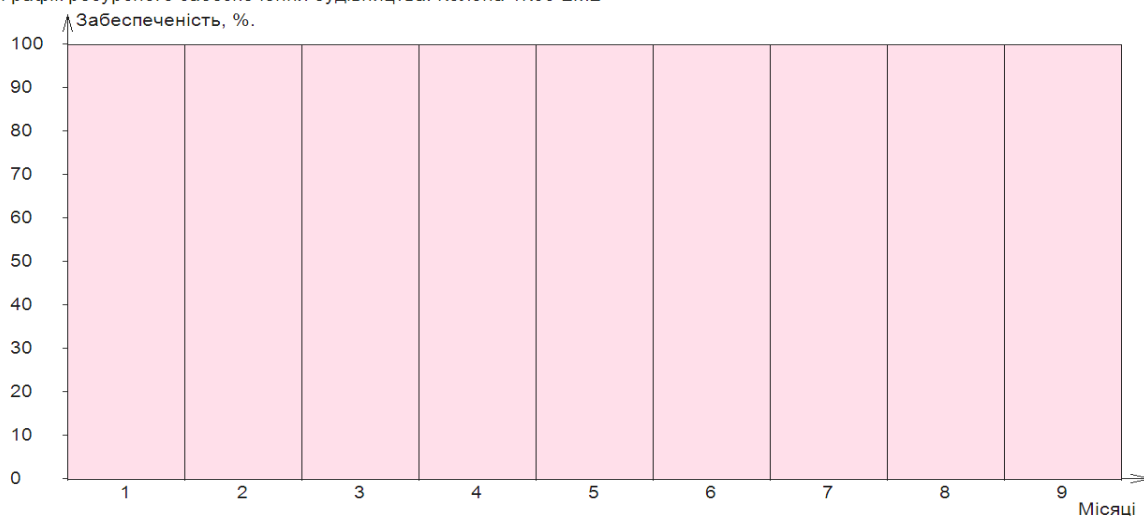


Рис. 2. График ресурсного обеспечения строительства объекта «Цех по производству тротуарной плитки»

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Графік ресурсного забезпечення будівництва: Колона 1К60-2М2

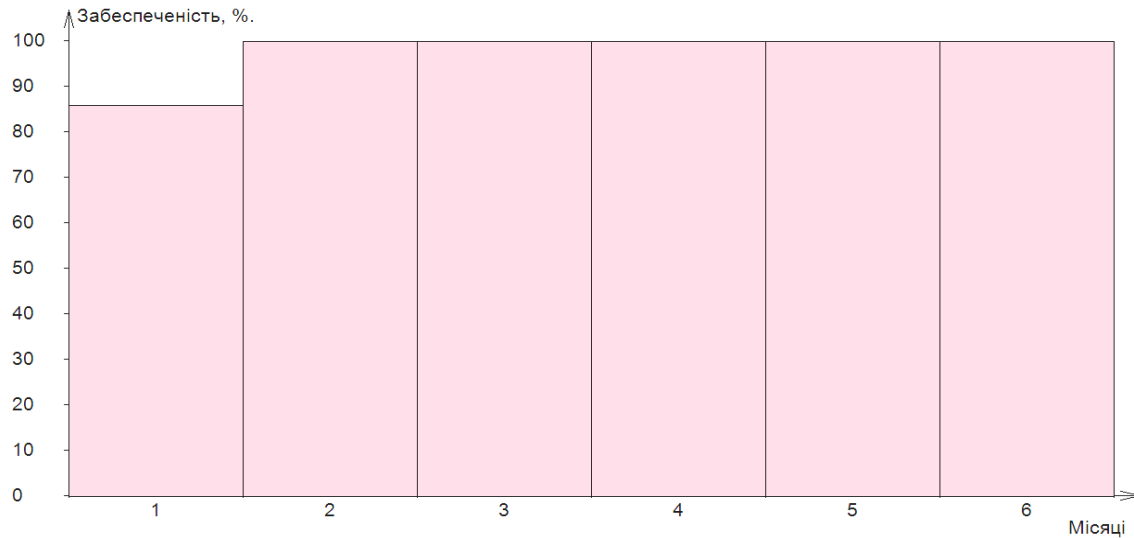


Рис. 3. Графік ресурсного забезпечення будівництва об'єкта «Коллекторная насосная станция 17»

Графік ресурсного забезпечення будівництва: Колона 1К60-2М2

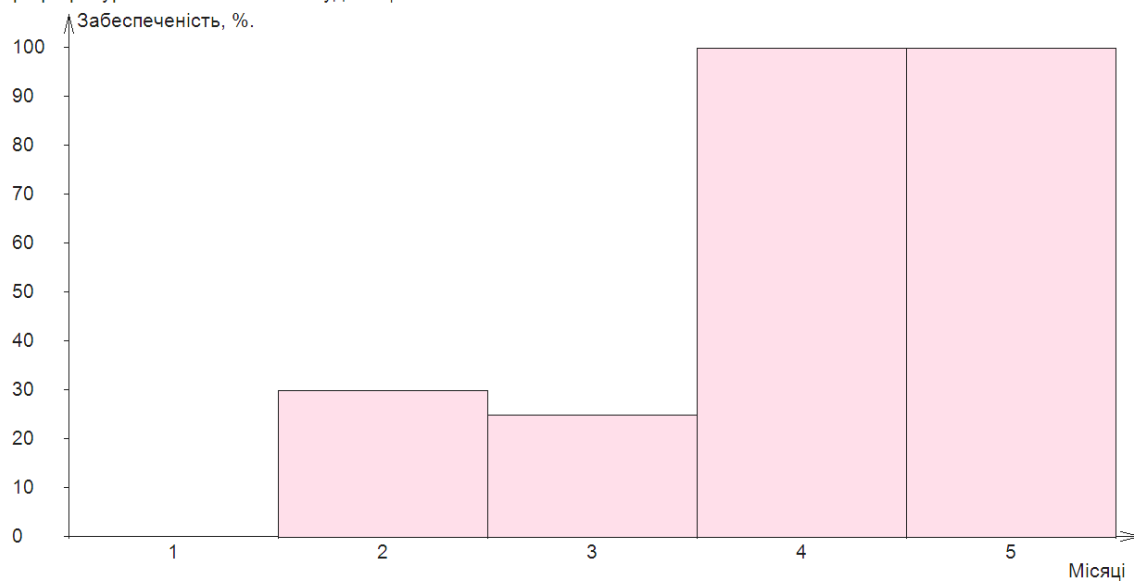


Рис. 4. Графік ресурсного забезпечення будівництва об'єкта «КТП (пос. Солнечный)»

На графиках, которые выдает программа, показано приоритет объекта и его обеспечение согласно наличию и дефицита выбранного материала. Это дает возможность руководству строительной организации оценить материально-техническое обеспечение своих строительных объектов согласно срокам строительства, технологии строительных процессов, а также учесть минимизацию затрат.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые с единых системных позиций на основе развития методики организации, планирования и управления сформулированы теоретические и методологические основы управления материальными потоками в программах строительного комплекса.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Существенными возможностями организации и управления программами строительного комплекса является применение современных научно-методологических принципов управления материальными и сопровождающими их информационными, финансовыми потоками. Это достигнуто благодаря универсальной базе классической теории организации и логистики строительства с учетом создания научно-аналитического и методологического инструментария организации, планирования, управления и оптимизации строительных процессов, опираясь на эффективное формирование логистической системы, которая является существенным вкладом в научную базу в отрасли знаний «Организация строительного производства» и «Логистика строительства».

Представлена модель управления материальными потоками в сфере обеспечения строительного комплекса ресурсами, что позволяет рассчитывать производственные запасы материальных ресурсов для бесперебойного обеспечения строительных объектов и проведения расчетов с поставщиками.

Выводы

Исходя из полученных результатов, крайне актуальным является применение методов логистики для материально-технического обеспечения строительства за счет принятия эффективных решений в программах развития и функционирования строительного комплекса на базе управления материальными потоками-ресурсами, с гармонизацией технологии и организации строительного процесса с минимальными расходами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Абрамов, Л. И. Организация и планирование строительного производства. Управление строительной организацией / Л. И. Абрамов, Э. А. Минаенкова. – М. : Стройиздат, 1999. – 400 с.
- Ефименко, А. З. Управление запасами сырьевых материалов и их оптимизация на предприятиях стройиндустрии / А. З. Ефименко, А. Н. Рыбко, Н. Н. Дергачев // Экономика строительства. – 2005. – № 10. – С. 38–45.
- Завадкас, Э. К. Комплексная оценка и выбор ресурсосберегающих решений в строительстве / Э. К. Завадкас. – Вильнюс : Мокслас, 1987. – 212 с.
- Кирнос, В. М. Организация строительства / В. М. Кирнос, В. Ф. Залуни, Л. Н. Дадиверина. – Д. : Пороги, 2005. – 309 с.
- Логистическая организация капитального строительства / под ред. В. Н. Стаханова. – Ростов-на-Д. : РГСУ, 1998. – 256 с.
- Неруш, Ю. М. Логистика / Ю. М. Неруш. – М. : ТК Велби: Проспект, 2006. – 520 с.
- Організація та проектування логістичних систем : підручник / за ред. М. П. Денисенка, П. Р. Лековця, Л. І. Михайлової. – К. : Центр учбової л-ри, 2010. – 336 с.
- Павлов, И. Д. Модели управления проектами : учеб. пособие / И. Д. Павлов, А. В. Радкевич. – Запорожье : ГУ «ЗИГМУ», 2004. – 320 с.
- Пшинько, А. Н. Повышение уровня системности экономики – основной путь выхода из кризиса / А. Н. Пшинько, В. В. Мямлин, С. В. Мямлин // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 36. – Д., 2011. – С. 275–283.
- Пшинько, А. Н. Переход на модель высокоэффективной национальной экономики – реальный путь решения экономических проблем в государстве / А. Н. Пшинько, В. В. Мямлин, С. В. Мямлин // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 294–303.
- Смиричинський, А. Логістичний менеджмент у будівництві : монографія / А. Смиричинський, В. Смиричинський, В. Мартинюк. – Т. : ЗБРУЧ, 2006. – 262 с.
- Стаханов, В. Н. Логистика в строительстве / В. Н. Стаханов, Е. К. Ивакин. – М. : Приор, 2001. – 176 с.
- Jonsons, J. C. Contemporary Logistics / J. C. Jonsons, D. F. Wood. – New York : MacMillan, 2007. – 325 p.
- Küpper, H. Planungsverfahren und Planungsinvestitionen als Instrumente des Controlling / H. Küpper, B. Winckler, S. Zhang // Die Betriebswirtschaft. – № 50. – 1990. – P. 435–458.
- Moller, C. Paradigms in Logistics / C. Moller, J. Johansen. – Denmark : University of Aalborg, 2005. – 324 p.

А. В. РАДКЕВИЧ^{1*}, І. А. АРУТЮНЯН²

^{1*}Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47 18 65,

ел. пошта bely-a@yandex.ru

²Каф. «Промислове та цивільне будівництво», Запорізька державна інженерна академія, пр. Леніна, 226, 69006, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (066) 900 78 28, ел. пошта iriara@yandex.ru

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ ПОТОКАМИ БУДІВЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

Мета. Розробка теоретико-методологічних підходів і науково-практичних рекомендацій стосовно управління матеріальними потоками будівельного комплексу. **Методика.** Містить аналіз існуючих наукових праць з питань, пов'язаних з управлінням програмами розвитку будівництва з урахуванням логістизації на підприємствах різної галузевої приналежності, що належать до будівельного комплексу; узагальнення та систематизацію досвіду прийняття управлінських рішень у процесі підготовки виробництва, зокрема управління рухом матеріальних потоків будівельних ресурсів та інформаційних потоків, що їх супроводжують, логічний аналіз, моделювання і системну обробку інформації. **Результати.** Результати дають можливість керівництву будівельних організацій оцінити матеріально-технічне забезпечення своїх будівельних об'єктів згідно з термінами будівництва, технологією будівельних процесів, а також врахувати мінімізацію витрат. **Наукова новизна.** З єдиних системних позицій на основі розвитку методики організації, планування і управління сформульовано теоретичні й методологічні основи управління формуванням логістичних систем у програмах розвитку будівельного комплексу. **Практична значимість.** Внесок у вирішення багатьох складних організаційних і економічних завдань, які супроводжуються проблемами розвитку будівництва, забезпечується за рахунок підвищення ефективності управління матеріальними потоками будівельного комплексу.

Ключові слова: організація будівельного виробництва; логістика; логістичні системи; матеріальний потік; інформаційний потік; будівельний комплекс

А. V. RADKEVICH^{1*}, I. A. ARUTYUNYAN²

^{1*}Dep. «Building Production and Geodesy», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 47 18 65, e-mail bely-a@yandex.ru

²Dep. «Industrial and Civil Building», Zaporizhzhya State Engineering Academy, Lenin Sq., 226, 69006, Zaporizhzhya, Ukraine, tel. +38 (066) 900 78 28, e-mail iriara@yandex.ru

INNOVATIVE APPROACHES TO ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF MATERIAL STREAMS OF BUILDING COMPLEX

Purpose. Development of theoretic and methodological approaches and scientific and practical recommendations concerning the management of the material flows of building complex. **Methodology.** Research includes analysis of existing scientific works concerning the problems of management of the construction development programs taking into account logistization on the enterprises of different branches related to the building complex. Experience generalization of administrative decision making in the process of production preparation, in particular the motion of material flows management of building resources and information flows (which accompany building resources), systematization of experience, logic analysis, design and system processing of information. **Findings.** Results give the building organization management an opportunity to estimate the material and technical support of the building objects according to the terms of building, technology of building processes, as well as to take into account the minimization of expenses. **Originality.** Originality lies in the fact that the theoretical and methodological management foundations of the logistic system formation in the programs of building complex development are formulated on the basis of organization methodology development, planning and management from the point of view of the only system positions. **Practical value.** The contribution to the decision of the number of complex organizational and economic problems accompanied by the problems of building development is provided due to the increase of management efficiency of the material flows of building complex.

Keywords: organization of building production; logistics; logistic systems; material flow; information flow; building complex

REFERENCES

1. Abramov L.I., Minayenkova E.A. *Organizatsiya i planirovaniye stroitel'nogo proizvodstva. Upravleniye stroitel'noy organizatsiyey* [Organization and planning of building production. Management of building organization]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1999. 400 p.
2. Yefimenko A.Z., Rybko A.N., Dergachev N.N. Upravleniye zapasami syryevykh materialov i ikh optimizatsiya na predpriyatiyakh stroyindustrii [Management of reserve of raw materials and their optimization on enterprises of construction industry]. *Ekonomika stroitelstva – Construction economics*, 2005, no. 10, pp. 38-45.
3. Zavadskas E.K. *Kompleksnaya otsenka i vybor resursosberegayushchikh resheniy v stroitelstve* [Complex assessment and choice of resource-saving solutions in building]. Vilnius, Mokslos Publ., 1987. 212 p.
4. Kirnos V.M., Zalunin V.F., Dadiverina L.N. *Organizatsiya stroitelstva* [Organization of construction]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2005. 309 p.
5. Stakhanov V.N. *Logisticheskaya organizatsiya kapital'nogo stroitelstva* [Logistic organization of major construction work]. Rostov na Donu, RGSU Publ., 1998. 256 p.
6. Nerush Yu.M. *Logistika* [Logistics]. Moscow, TK Velbi, Prospekt Publ., 2006. 520 p.
7. Denysenko M.P., Levkovets P.R., Mykhailova L.I. *Orhanizatsiia ta proektuvannia lohistychnykh system* [Organization and design of logistic systems]. Kyiv, Tsentr uchbovoi literatury Publ., 2010. 336 p.
8. Pavlov I.D., Radkevich A.V. *Modeli upravleniya proyektami* [Control models of projects]. Zaporozhye, GU «ZIGMU» Publ., 2004. 320 p.
9. Pshinko A.N., Myamlin V.V., Myamlin S.V. Povysheniye urovnya sistemnosti ekonomiki – osnovnoy put vykhoda iz krizisa [Enhancement of economics systemacy level as the basic way out of the crisis]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport imeni arademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 275-283.
10. Pshinko A.N., Myamlin V.V., Myamlin S.V. Perekhod na model vysokoeffektivnoy natsionalnoy ekonomiki – realnyy put resheniya ekonomicheskikh problem v gosudarstve [Transition to the model of high-efficiency national economics as the real method of solving economic problems in the country]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transport imeni arademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41, pp. 294-303.
11. Smyrychynskyi A., Smyrychynskyi V., Martyniuk V. *Lohistychnyi menedzhment u budivnytstvi* [Logistical management in construction]. Ternopil, ZBRUCH Publ., 2006. 262 p.
12. Stakhanov V.N., Ivakin Ye.K. *Logistika v stroitelstve* [Logistic in construction]. Moscow, Prior Publ., 2001. 176 p.
13. Jonsons J.C., Wood D.F. *Contemporary Logistics*, New York, MacMillan Publ., 2007. 325 p.
14. Küpper H., Winckler B., Zhang S. Planungsverfahren und Planungsinvestitionen als Instrumente des Controlling, *Die Betriebswirtschaft*, 1990, no. 50, pp. 435-458.
15. Moller C., Johanser J., *Paradigms in Logistics*. Denmark, University of Aalborg Publ., 2005. 324 p.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. И. Нетесой (Украина); д.т.н., доц. А. А. Чубом (Украина)

Поступила в редколлегию 07.06.2013

Принята к печати 12.08.2013

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

К. В. ГОНЧАРОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТОНАЛЬНИХ РЕЙКОВИХ КОЛАХ7

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Є. П. БЛОХІН, Р. Б. ГРАНОВСЬКИЙ, Є. М. ДЗИЧКОВСЬКИЙ, О. Є. КРИВЧИКОВ,
Н. Й. ГРАНОВСЬКА, А. ЦЮПА**

РЕЗУЛЬТАТИ ХОДОВИХ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДИЗЕЛЬНОГО ПОЇЗДА ТИПУ 630М
ВИРОБНИЦТВА АТ PESA (ПОЛЬЩА)18

Д. О. БОСІЙ

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ
ЗМІННОГО СТРУМУ30

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Г. ВАЙЧУНАС, Г. ГЕЛУМБІЩКАС, Л. П. ЛІНГАЙТІС

ПРОБЛЕМИ ЗНОСУ КОЛІС ТЕПЛОВІЗІВ ПРИ ОНОВЛЕННІ ПАРКУ38

Д. М. КОЗАЧЕНКО

ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ.....47

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

В. Д. ПЕТРЕНКО, Д. О. ЯМПОЛЬСЬКИЙ, І. О. СВЯТКО

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ ЗАЛІЗНИЧНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА56

О. С. ЧЕРНИШОВА, М. І. УМАНОВ, В. В. КОВАЛЬОВ, Ю. С. МАРКОВ, О. В. ГУБАР

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ У ПІСЛЯРЕМОНТНИЙ
ПЕРІОД НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ63

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

І. О. ВАКУЛЕНКО, Ю. Л. НАДЕЖДІН, В. А. СОКІРКО, І. П. ВОЛЧОК, О. А. МІТЯЄВ

ЕЛЕКТРИЧНА ІМПУЛЬСНА ОБРОБКА ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ73

А. Я. КУЛІЧЕНКО, М. О. КУЗІН, Л. І. ВАКУЛЕНКО

НАКОПИЧЕННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНІВ ЗГІДНО З КРИТЕРІСМ ПИТОМОЇ
ЕНЕРГІЇ ПОВНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ83

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

В. М. ПАХОМОВА, Л. В. СТРИБУЛЕВИЧ

МОДИФІКОВАНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ МАРКЕРНОГО
МЕТОДУ ДОСТУПУ ДО ШИНИ.....90

ПРОМИСЛОВИЙ ТРАНСПОРТ

О. М. БОНДАРЄВ, Д. О. ЯГОДА, О. О. БОНДАРЄВ, В. М. СКОБЛЕНКО

ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ МІЦНОСТІ КОРПУСІВ ТЯГОВИХ
РЕДУКТОРІВ ЗВАРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ КЕВРЗ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ СЕРІЙ EP2, EP9.....99

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Н. В. БЕЗРУКАВИЙ

ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНИХ ВІБРАЦІЙ НА КОЕФІЦІЄНТ ЗАПАСУ СТІЙКОСТІ ВАГОНІВ
ПРОТИ СХОДУ З РЕЙОК ПРИ ВПОВЗАННІ ГРЕБЕНЯ КОЛЕСА НА РЕЙКУ111

В. М. БУБНОВ, С. В. МЯМЛІН, М. Б. МАНКЕВИЧ

ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ НА ВІЗКАХ МОДЕЛІ 18-1711118

| | |
|--|-----|
| Р. Ш. ІСАНОВ ДВОШАРОВИЙ ПОТІК ПОВІТРЯ ПРИ ОБТІКАННІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ПОЇЗДА..... | 127 |
| В. Ф. УШКАЛОВ, Л. Г. ЛАПІНА, І. О. МАЩЕНКО РОЗРАХУНКОВІ ЗБУРЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНИХ ЯКОСТЕЙ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ..... | 135 |
| ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО | |
| А. В. РАДКЕВИЧ, І. А. АРУТЮНЯН ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ ПОТОКАМИ БУДІВЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ | 145 |

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

К. В. ГОНЧАРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ.....7

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Е. П. БЛОХИН, Р. Б. ГРАНОВСКИЙ, Е. М. ДЗИЧКОВСКИЙ, А. Е. КРИВЧИКОВ,

Н. И. ГРАНОВСКАЯ, А. ЦИЮПА

РЕЗУЛЬТАТЫ ХОДОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНОГО ПОЕЗДА ТИПА 630М
ПРОИЗВОДСТВА АО PESA (ПОЛЬША).....18

Д. А. БОСЫЙ

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГОВЫХ
ПОДСТАНЦИЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА30

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

Г. ВАЙЧУНАС, Г. ГЕЛУМБИЦКАС, Л. П. ЛИНГАЙТИС

ПРОБЛЕМЫ ИЗНОСА КОЛЕС ТЕПЛОВЗОВ ПРИ ОБНОВЛЕНИИ ПАРКА.....38

Д. Н. КОЗАЧЕНКО

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ47

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

В. Д. ПЕТРЕНКО, Д. А. ЯМПОЛЬСКИЙ, И. А. СВЯТКО

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА56

О. С. ЧЕРНЫШОВА, М. И. УМАНОВ, В. В. КОВАЛЕВ, Ю. С. МАРКОВ, А. В. ГУБАРЬ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗАТОРОВ В ПОСЛЕРЕМОНТНЫЙ
ПЕРИОД НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ.....63

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

И. А. ВАКУЛЕНКО, Ю. Л. НАДЕЖДИН, В. А. СОКИРКО, И. П. ВОЛЧОК, А. А. МИТЯЕВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА СВАРОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА73

А. Я. КУЛИЧЕНКО, Н. О. КУЗИН, Л. И. ВАКУЛЕНКО

НАКОПЛЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНОВ ПО КРИТЕРИЮ УДЕЛЬНОЙ
ЭНЕРГИИ ПОЛНОЙ ДЕФОРМАЦИИ83

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТА И ЭКОНОМИКИ

В. Н. ПАХОМОВА, Л. В. СТРИБУЛЕВИЧ

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ ПРИ МАРКЕРНОМ
МЕТОДЕ ДОСТУПА К ШИНЕ90

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ

А. М. БОНДАРЕВ, Д. А. ЯГОДА, А. А. БОНДАРЕВ, В. М. СКОБЛЕНКО

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ КОРПУСОВ ТЯГОВЫХ
РЕДУКТОРОВ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ КЭВРЗ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ СЕРИЙ ЭР2, ЭР999

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

Н. В. БЕЗРУКАВЫЙ

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ВАГОНА
ПРОТИВ СХОДА С РЕЛЬСОВ ПРИ ВПОЛЗАНИИ ГРЕБНЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС111

В. М. БУБНОВ, С. В. МЯМЛИН, Н. Б. МАНКЕВИЧ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ТЕЛЕЖКАХ МОДЕЛИ 18-1711.....118

Р. Ш. ИСАНОВ

ДВУХСЛОЙНЫЙ ПОТОК ВОЗДУХА ПРИ ОБТЕКАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОЕЗДА..... 127

В. Ф. УШКАЛОВ, Л. Г. ЛАПИНА, И. А. МАЩЕНКО

РАСЧЕТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ 135

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А. В. РАДКЕВИЧ, И. А. АРУТЮНЯН

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ
СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА 145

CONTENTS

TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

K. V. HONCHAROV

INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES IN TONAL TRACK CIRCUITS.....7

TRANSPORT ECOLOGY

E. P. BLOHIN, R. B. GRANOVSKIY, E. M. DZICHKOVSKIY, A. E. KRIVCHIKOV,

N. I. GRANOVSKAYA, A. TSIYUPA

DYNAMIC RUNNING TEST RESULTS OF DIESEL TRAIN 630M OF PRODUCTION A.S. PESA (POLAND) 18

D. O. BOSIY

POWER QUALITY COMPLEX ESTIMATION AT ALTERNATING CURRENT TRACTION SUBSTATIONS30

OPERATION AND REPAIR OF THE TRANSPORT MEANS

G. VAYCHUNAS, G. GELUMBITSKAS, L. P. LINGAYTIS

PROBLEMS OF LOCOMOTIVE WHEEL WEAR IN FLEET REPLACEMENT38

D. M. KOZACHENKO

OBJECT-ORIENTED MODEL OF RAILWAY STATIONS OPERATION.....47

RAILWAY TRACK

V. D. PETRENKO, D. O. YAMPOLSKIY, I. O. SVIATKO

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATION MODELS OF RAILWAY SUBGRADE56

O. S. CHERNYSHOVA, M. I. UMANOV, V. V. KOVALEV, Y. S. MARKOV, O. V. GUBAR

USE EFFICIENCY OF DYNAMIC STABILIZER IN THE POST-REPAIR PERIOD OF RAILWAYS IN UKRAINE63

MATERIAL SCIENCE

I. A. VAKULENKO, YU. L. NADEZHIN, V. A. SOKIRKO, I. P. VOLCHOK, A. A. MITIAEV

ELECTRIC PULSE TREATMENT OF WELDING CONNECTION OF ALUMINUM ALLOY73

A. YA. KULICHENKO, N. O. KUZIN, L. I. VAKULENKO

FATIGUE DAMAGE ACCUMULATION OF DEATAILS IN CARS ACCORDING TO CRITERION OF SPECIFIC ENERGY OF TOTAL STRAIN83

TRANSPORT AND ECONOMIC TASKS MODELING

V. N. PAKHOMOVA, L.V. STRIBULEVICH

MODIFIED NETWORK SIMULATION MODEL WITH TOKEN METHOD OF BUS ACCESS.....90

INDUSTRIAL TRANSPORT

O. M. BONDAREV, D. O. YAGODA, O. O. BONDAREV, V. M. SKOBLENKO

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF STRENGTH INDICES FOR TRACTION REDUCTION-GEAR HOUSINGS OF WELDED CONSTRUCTION KEVRZ FOR ELECTRIC TRAINS ER2, ER9.....99

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

N. BEZRUKAVYY

THE INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY VIBRATIONS ON DERAILMENT STABILITY COEFFICIENT OF CARS AT WHEEL FLANGE CLIMBING ON THE RAIL..... 111

V. M. BUBNOV, S. V. MYAMLIN, N. B. MANKEVYCH

DYNAMIC PERFORMANCE OF FREIGHT CARS ON BOGIES MODEL 18-1711 118

R. SH. ISANOV

DOUBLE LAYER AIR CURRENT DURING THE HIGH SPEED TRAIN FLOW-AROUND127

V. F. USHKALOV, L. G. LAPINA, I. A. MASHCHENKO

CALCULATED DISTURBANCES FOR EVALUATION OF DYNAMICAL PROPERTIES OF FREIGHT CARS.....135

TRANSPORT CONSTRUCTION

A. V. RADKEVICH, I. A. ARUTYUNYAN

INNOVATIVE APPROACHES TO ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF MATERIAL STREAMS OF BUILDING COMPLEX.....145

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).

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії збірника 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! Журнал готується до експертизи в наукометричній базі даних SciVerse Scopus. Із цим фактом пов'язаний ряд необхідних вимог, а саме: 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_statia.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_vidomosti.doc.
- **Третій** – рецензія (відсканована). Назва файлу – Ivanov_II_recenziia.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 Миргородська А. І.



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.

АСПРАНТУРА

| № | 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).

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 4 (46) 2013

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – Т. О. Колесникова

Комп'ютерне верстання – Ю. С. Марков

Літературна обробка – О. О. Котова, О. М. Врублевська

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 18,83. Тираж 300 пр. Зам. № _____.

**Видавництво Дніпропетровського національного університету 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.diit.edu.ua, visnik@diit.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)**

№ 4 (46) 2013

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – Т. А. Колесникова

Компьютерная верстка – Ю. С. Марков

Литературная обработка – О. А. Котова, О. М. Врублевская

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 18,83. Тираж 300 экз. Зам. № _____.

**Издательство Днепропетровского национального университета 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.diit.edu.ua, visnik@diit.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. VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO
UNİVERSİTETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS. BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 4 (46) 2013

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – Т. О. Kolesnikova

Computer makeup – Y. S. Markov

Redaction – О. О. Kotova, О. М. Vrublevs'ka

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 18,83. Circulation 300. Order no. _____.

Publication of 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

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Address of small offset printing office

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

Тел.: +38 (056) 47-19-66, *Fax:* +38 (056) 47-19-83



СУЧАСНІ ЗАКЛАДИ ОСВІТИ - 2013
Четверта Міжнародна виставка

CERTIFICATE

якості наукових публікацій
УДОСТОЄНИЙ

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Міністерство освіти і науки,
молоді та спорту України



Міністр

Д. Табачник

Рішення
показники наукометричної
базисних Scopus
за 2012 рік

Національна академія
педагогічних наук України



Президент

В. Кремень

Асоціація користувачів
Української науково-освітньої
телекомунікаційної мережі «Уран»



Голова Ради

Ю. Якименко

Україна, м. Київ

