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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№5 (77)

2018

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

№ 5 (77) 2018

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
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Моделювання задач транспорту та економіки
Нетрадиційні види транспорту. Машини та механізми
Промисловий транспорт
Рухомий склад залізниць і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро
2018

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ Пшінько О. М., доктор технічних наук

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА Козаченко Д. М., доктор технічних наук

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР Колесникова Т. О., кандидат наук із соціальних комунікацій

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

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

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України.
Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін.
Друкується за рішенням вченої ради університету від 05.11.2018 р., протокол № 4

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

Адреса засновника та редакції вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: 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», (ISSN 1993-9175);
з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

© Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2018

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 5 (77) 2018

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
Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование
Материаловедение
Моделирование задач транспорта и экономики
Нетрадиционные виды транспорта. Машины и механизмы
Промышленный транспорт
Подвижной состав железных дорог и тяга поездов
Транспортное строительство

Днипро
2018

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА	Пшинько А. Н., доктор технических наук
ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА	Пичугов С. А., доктор физико-математических наук
ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА	Козаченко Д. Н., доктор технических наук
ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ	Колесникова Т. А., кандидат наук по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):
Афанасов А. М., Банников Д. О., Бараш Ю. С., Беляев Н. Н., Бобырь Д. В., Бобровский В. И., Боднарь Б. Е., Босов А. А., Вакуленко И. А., Власова Т. И., Волкова В. Е., Габринец В. А., Гаврилюк В. И., Гетьман Г. К., Главацкий К. Ц., Гненный О. Н., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Доценко Е. Н., Дудкина В. В., Жуковицкий И. В., Заблудовский В. А., Казакевич М. И., Капица М. И., Копытко В. И., Костин Н. А., Кравец В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган Н. Б., Муха А. М., Настечик М. П., Нетеса Н. И., Оковитый С. И., Очкасов А. Б., Петренко В. Д., Пичугов С. А., Пичурин В. В., Полишко Т. В., Радкевич А. В., Радченко Н. А., Ракша С. В., Скалозуб В. В., Снежко Л. А., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. И., Штапенко Э. Ф., Эйтутис Г. Д., Яришкина Л. А.

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

Журнал зарегистрирован	Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины. Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г. Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки). Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др. Печатается по решению ученого совета университета от 05.11.2018 г., протокол № 4
Издатель	Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (г. Днипро) Свидетельство субъекта издательского дела ДК № 1315 от 31.03.2003 г.
Адрес учредителя	ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днипро, Украина, 49010, тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; сайт журнала: http://stp.diit.edu.ua/

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

© Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 2018

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

Scientific journal

No. 5 (77) 2018

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
Information and Communication Technologies and Mathematical Modeling
Material Science
Transport and Economic Tasks Modeling
Non-Traditional Transport Modes. Machines and Mechanisms
Industrial Transport
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro
2018

Founder:

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

Chairman of the Editorial Board of the University	Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Editor-in-Chief	Pichugov, S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Secretary	Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

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

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

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 г. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 05.11.2018, Protocol no. 4
Publisher	Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:
1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175),
since 2013 – «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, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.212.5

В. В. СКАЛОЗУБ[1*], И. В. КЛИМЕНКО[2*]

[1*]Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

[2*]Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта vanya.klymenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5149-3974

МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАРКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Цель. Основной целью статьи является совершенствование автоматизированных систем эксплуатации парков железнодорожных технических систем – электродвигателей (ЭД) постоянного тока стрелочных переводов, с учетом факторов неопределенности. **Методика.** Решение задачи получено за счет развития модели и метода оптимального планирования процессов эксплуатации множества ЭД. Метод использует информационную технологию по оценке параметров текущих и прогнозируемых состояния ЭД на основе их индивидуальных моделей. Модели формируют как для отдельных ЭД, так и для заданных групп. В модели факторы недетерминированности учитывают на основе показателя Херста. Задача планирования сводится к расчету оптимальной последовательности обслуживания объектов парка ЭД, которая обеспечивает минимум общих ожидаемых эксплуатационных затрат. **Результаты.** В работе был выполнен анализ основных известных моделей, автоматизированных технологий и систем эксплуатации парков ЭД (АСЭД) на основе дистанционного мониторинга. Исходя из практики обслуживания парков ЭД, была предложена новая категория объектов анализа – группа обслуживания (ГЭД). Для повышения достоверности прогнозирования по индивидуальным моделям ЭД и ГЭД разработана процедура классификации процессов, использующая показатель Херста. Сформулирована технолого-экономическая модель по планированию процессов эксплуатации парков ЭД. Выполнено развитие автоматизированной системы управления парков ЭД (АСУЭД) на основе усовершенствованной модели планирования процессов эксплуатации парков стрелочных ЭД постоянного тока. Модель оптимального планирования обеспечивает минимизацию ожидаемых эксплуатационных затрат на эксплуатацию парка ЭД за счет выбора очередности обслуживания групп ЭД. При планировании используют специализированную процедуру классификации недетерминированных данных дистанционного мониторинга ЭД, которая позволяет повысить точность прогнозирования параметров состояний объектов. **Научная новизна**. В статье получили развитие математические модели и информационные технологии дистанционного мониторинга процессов эксплуатации парков железнодорожных технических систем, стрелочных ЭД, основанные на формировании индивидуальных моделей ЭД и ГЭД, на оценке их текущих и прогнозированных состояний, с учетом случайных факторов. Предложенная модель оптимального планирования, как выбора последовательности обслуживания ГЭД, отличается групповым обслуживанием объектов парка ЭД, а также применением специализированной процедуры классификации данных мониторинга ЭД. **Практическая значимость** полученных результатов определяется обеспечением новых возможностей группового оптимального планирования обслуживания парка ЭД по критерию минимума ожидаемых затрат. Процедура классификации данных мониторинга процессов эксплуатации позволяет повысить достоверность результатов прогнозирования антиперсистентных

doi: 10.15802/stp2018/141430 © В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

временных последовательностей, а также обеспечивает получение интерпретации результатов классификации данных наблюдений, исходя из потребности практического применения.

Ключевые слова: парки технических систем; электродвигатели стрелочных переводов; процессы эксплуатации; условия неопределенности; автоматизированная система; мониторинг; прогнозирование; индивидуальные модели процессов; модель оптимального планирования; эксплуатационные затраты

Введение

В настоящее время одной из приоритетных задач железнодорожного транспорта Украины является всестороннее уменьшение эксплуатационных расходов и повышение эффективности процессов автоматизированной эксплуатации парков технических систем (ТС) [1, 5, 8]. В представленной статье в качестве объектов исследования рассмотрены парки электродвигателей (ЭД) постоянного тока, используемых в железнодорожных стрелочных переводах (СП) – важных системах управления процессами перевозок. Количество этих систем составляет несколько десятков тысяч. Только в Юго-Западном филиале их насчитывается около 6 тис. Основная цель работы заключается в совершенствовании метода оптимального планирования процессов эксплуатации парка ЭД (МОПЭД), а также в развитии соответствующих систем автоматизированного дистанционного мониторинга и диагностирования текущего и прогнозируемого состояния объектов парка ЭД. Планирование процессов эксплуатации парка ЭД здесь заключается в расчете такой оптимальной последовательности обслуживания групповых объектов парка (ГЭД), которая обеспечивает минимальные общие затраты на его эксплуатацию, при условии соблюдения требований по устойчивости и надежности процессов железнодорожных перевозок. Особенностью процедур анализа и прогнозирования параметров состояния является обслуживание групп ТС (ГЭД), а также применение метода классификации временных последовательностей [7], представляющих оценки параметров процессов эксплуатации ЭД.

На железных дорогах Украины процессы эксплуатации ЭД осуществляются на основе планово-предупредительного метода (ППМ) [4], согласно которому процедуры оценки текущего состояния предусматривают исключение ЭД из реальных процессов для организации комплекса работ по контролю элементов ТС, по измерению значений их параметров. Отмечено в [1, 6], что изъятие ЭД из процессов эксплуатации требует существенных дополнительных временных, финансовых, материальных и других затрат, а главное – может влиять на оценки значений параметров состояний ТС.

По технологии ППМ эксплуатации стрелочных переводов и их ЭД устанавливают их периодическое обследование по составленному графику [1, 2, 5]. К недостаткам существующей технологии обслуживания СП относят значительные затраты времени, выполнение операций в ручном режиме, большую вероятность человеческого фактора. Вместе с этим отсутствует непрерывный контроль параметров СП, что делает невозможным своевременное выявление и ликвидацию неисправностей. В условиях внедрения высокоскоростного движения поездов актуальность задачи повышения эффективности автоматизированного обслуживания парков СП и ЭД возрастает.

Развитие автоматизированных систем управления эксплуатацией парков ТС, в том числе стрелочных ЭД, происходит на основе применения современных информационных технологий (ИТ) и методов искусственного интеллекта [1, 5, 8]. В рамках этого направления разрабатываются новые решения задачи по организации и интеграции данных мониторинга, диагностирования, а также по обобщению результатов эксплуатации парка ЭД и планированию. Установлено, что повышение результативности этих методов и соответствующих технологий их реализации с учетом текущего состояния возможно на основе использования средств интеллектуальных систем: моделей кластеризации, методов искусственных нейронных сетей, экспертных систем [4, 12, 14]. В работах [5, 6, 8] предложена технология эксплуатации ЭД постоянного тока, которая не требует их извлечения из СП. Она позволяет выполнять непрерывную дистанционную диагностику ЭД, устраняет многие недостатки ППМ обслуживания стрелок электрической

doi: 10.15802/stp2018/141430 © В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

централизации. Эта технология позволяет повысить точность измерения параметров, сократить время проверки состояния стрелок электрической централизации, снизить требования к квалификации обслуживающего персонала и уменьшить срок его пребывания на железнодорожных путях в зонах повышенной опасности, автоматизировать процессы диагностирования ЭД и др.

Переход к автоматизированной эксплуатации парков ЭД является экономически выгодным, позволяет повысить надежность стрелочных электроприводов, даже с учетом отказов, которые проявляются только при работе стрелочного перевода. Такой вывод в полной мере соответствует мировым тенденциям по внедрению систем дистанционного диагностирования и созданию автоматизированных рабочих мест (АРМ) [1, 5, 8].

Как примеры применения современных автоматизированных систем дистанционного диагностирования парков ЭД (АСЭД) на рис. 1, 2 представлены спектральные характеристики токов ЭД железнодорожных СП модели МСП-0,25, которые соответствуют их различным неисправностям. Виды неисправностей ЭД определены экспертом по методике [1, 2, 5].

На спектрограммах по оси абсцисс отложено время, по оси ординат – частота гармоник спектра.

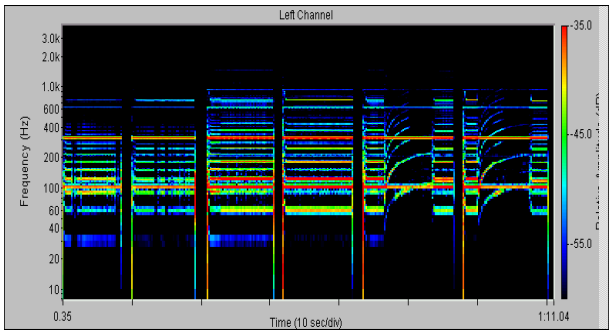


Рис. 1. Спектрограмма двигателя модели МСП-0,25: два обрыва якоря и короткое замыкание пластин коллектора

Fig. 1. Spectrogram of the MSP-0.25 engine: two armature breaks and short circuit in the collector plates

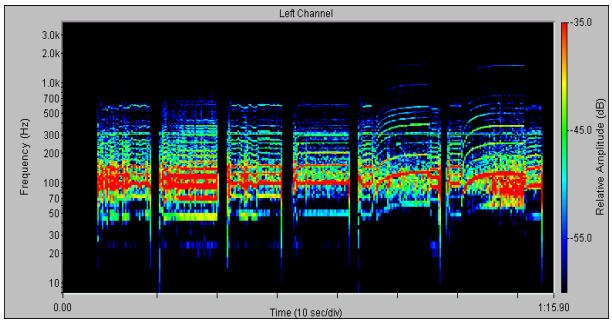


Рис. 2. Спектрограмма двигателя МСП-0,25: четыре места обрыва секций якоря

Fig. 2. Spectrogram of the MSP-0.25 engine: four places where the armature sections break

Отметим, что совокупность неисправностей (рис. 1, 2) обнаружена только с помощью расчетов на основе анализа спектров токов, а не статическими методами измерений (с помощью омметра, трансформатора, импульсного и др.).

АСЭД осуществляет управление процессами дистанционного диагностирования, а также решает отдельные задачи эксплуатации парков ЭД [1, 2, 7]. В АСЭД выполняют измерения характеристик двигателей, которые находятся под влиянием номинальных, рабочих значений напряжения, токов, магнитных полей, центробежных сил. АСЭД базируется на анализе частотного спектра рабочего тока двигателя, реализованного с помощью быстрого преобразования Фурье [2, 5]. Для каждого ЭД в индивидуальных моделях (ИМЭД) сохраняют характеристики исправного состояния, которые используют для расчета оценки достоверности выявленных неисправностей при диагностике. Распознавание возможных неисправностей ЭД выполняют нейронными сетями Кохонена [11]. Анализ взаимного расположения кластеров на топологической карте Кохонена позволяет выявлять сходства или различия между разными видами неисправностей (обрыв секции якоря, круговой огонь и др.). Входной слой сети Кохонена состоит из 256 элементов, на каждый из которых подаются величины интенсивности гармоник преобразования Фурье тока ЭД. Выходной слой сети представляет собой топологическую карту. В результате экспериментов лучшую способность к кластеризации показала топологическая карта размерностью 3 на 5 элементов [5, 6]. На основе текущего и прогнозируемого технического состояния каждого ЭД

doi: 10.15802/stp2018/141430
© В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

в дальнейшем определяют очередности их обслуживания.

В [8] для реализации непосредственных процедур управления парком ЭД с учетом их технического состояния разработана двухуровневая система математических моделей, верхний уровень которой представляет главные контролируемые свойства парка в целом, а также обеспечивает определение оценок параметров текущего состояния. На нижнем уровне формируются ИМЭД, представляющие эволюцию состояний ЭД.

Цель

Целью статьи является развитие и совершенствование вышеизложенных моделей, методов и подходов, а именно:

– совершенствование индивидуальных моделей процессов эксплуатации как отдельных ЭД, так и построение моделей определенных групп ЭД (ГЭД);

– формирование общей экономико-технологической модели ГЭД для расчета последовательности обслуживания заданных групп ТС ГЭД;

– применение усовершенствованного метода прогнозирования показателей процессов эксплуатации ГЭД за счет процедуры классификации последовательностей данных мониторинга ИМЭД.

Методика

Содержательно задачу автоматизированного управления эксплуатацией парка АСЭД можно сформулировать следующим образом. Рассматривают и автоматизировано контролируют определенное множество сложных технико-технологических объектов одинакового назначения (в частности ЭД), парк технических систем, а также процессы их эксплуатации. В соответствии с технологией функционирования и методикой обслуживания ТС парка разделены на группы (ГЭД), элементы которых при планировании рассматривают совместно. Объекты парка характеризуются наборами свойств, значения которых указывают на их некоторое «текущее» состояние, отражающее ход и возможности дальнейшей эксплуатации каждой из ТС. Техническое состояние объекта на данном этапе эксплуатации определяют по «сигналам», снимаемым с него, причем дистанционно, без исключения из процессов эксплуатации. Данные о параметрах текущего состояния соответствующим образом обрабатывают, анализируют и обобщают, а также накапливают в системе АСЭД. Считаются известными ресурсы (технические, материальные, трудовые и др.), необходимые или выделенные для эксплуатации парка объектов. Задача состоит в обеспечении реализации и надежности совокупности железнодорожных транспортных технологий парка ТС. Также нужно обеспечить повышение эффективности процессов эксплуатации парка объектов, что выполняют на основе формирования интеллектуальной автоматизированной технологии и системы оптимального управления по текущему и прогнозируемому состоянию. При этом нужно непрерывно определять текущее техническое состояние компонентов парка ТС. Результатами мониторинга являются оценки параметров текущего состояния. Эту информацию фиксируют в индивидуальных моделях процессов эксплуатации ЭД в виде временных рядов (ВР) [5, 7, 8].

При обнаружении неисправных состояний объекта необходимо определить вид неисправности и получить оценку достоверности. На основе данных мониторинга объектов и предварительных данных о процессах эксплуатации, представленных в детерминированных терминах, или с учетом характеристик неопределенности технологических или эксплуатационных процессов нужно спрогнозировать возможные изменения технического состояния элементов системы, а также установить рациональные очередности диагностики и обслуживания объектов парка ТС с учетом требований безопасности транспортной системы и ограниченных ресурсов процессов эксплуатации.

Для определения очередности обслуживания объектов парка ЭД как части планирования процессов эксплуатации применяют специализированные экономико-математические модели и методы оптимального планирования, рассмотренные ниже. Задача эксплуатации парков заключается в определении последовательности обслуживания (диагностирования, осмотров ЭД, ремонтов) ТС или их элементов, а также групп ГЭД с учетом приближенных оценок

doi: 10.15802/stp2018/141430
© В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

их текущего и прогнозируемого состояния, которые обеспечивают минимальные общие эксплуатационные расходы.

Результаты

Представим задачу автоматизированного оптимального управления эксплуатацией парков ТС (ЭД), развивая метод [6-8], как последовательность реализации следующих задач:

1. Образование групп ЭД парка, формирование индивидуальных моделей процессов эксплуатации стрелочных ЭД, ИМ для ГЭД, общей технолого-экономической модели эксплуатации парка.
2. Дистанционное измерение, мониторинг, спектральный анализ рабочих токов, диагностирование текучих состояний ЭД.
3. Оценка параметров и состояний инфраструктуры, классификация ИМ отдельных ЭД, а также их ГЭД, прогнозирование характеристик состояний объектов парка.
4. Формирование оптимального плана как выбора последовательности обслуживания ГЭД.
5. Реализация управления этапа *T,* выполнение и учет в информационных моделях результатов работ по эксплуатации парка ЭД.
6. Коррекция индивидуальных моделей ЭД, ГЭД, а также парка в целом.

Для реализации указанной постановки задачи оптимального планирования потребовалось ввести новую категорию моделей объектов парка – ГЭД, модели групповых свойств ЭД (стрелочные переводы станции, ее участков и т. п.). Формирование и учет групповых свойств объектов парка выполнен с помощью специализированных процедур АСЭД.

При заданных множествах групп ЭД, одновременно включаемых в план обслуживания, возникает задача по оценке характеристик ГЭД, представленных ВР, на основе свойств отдельных ЭД. С учетом требований обеспечения надежности транспортных систем параметры ГЭД определяют на основе функций max/min. Поскольку на различных этапах обслуживания реализация функций расчета групповых свойств ГЭД может быть на разных двигателях, то поведение ВР групповых свойств может иметь сложный недетерминированный характер [10]. Ряды групповых свойств могут быть антиперсистентными [7, 9], как и последовательности значений уровней ВР отдельных ЭД. Рассмотрим вопросы прогнозирования и планирования процессов эксплуатации парков ЭД, представленных в ИМЭД недетерминированными ВР.

Данные о процессах эксплуатации железнодорожного транспорта, накапливающиеся в различных автоматизированных системах управления (АСУ), можно рассматривать как временные ряды (ВР) – упорядоченные по этапам контроля значения заданных показателей. Оценки показателей имеют сложную динамическую структуру и отражают свойства технологических, эксплуатационных, финансовых [9, 10] и других процессов железнодорожного транспорта. В работах [5, 7] исследованы возможности применения новых методов анализа ВР, представляющих свойства вагонопотоков, на основе показателя Херста (XV) [5]. XV оценивает стохастичность ряда, наличие в нем долговременной «памяти», используя процедуру R/S-анализа. Значение XV позволяет классифицировать процессы на персистентные (трендостойкие,
$H > 0{,}5$), антиперсистентные (излом тенденции, $H < 0{,}5$), случайные ($H \approx 0$), используя величины вида:

$$H = \frac{\log(R / S)}{\log(a * N)}, \qquad (1)$$

где H – показатель Херста; S – среднее квадратическое отклонение ВР; R – размах накапливаемых отклонений; N – число периодов наблюдений; a – константа ($a = \pi/2$ для «коротких» ВР, соответствующих реальным процессам железнодорожных перевозок) [9, 13].

В работах [6-8] были исследованы свойства ВР, характеризующих количество вагонов, отправленных по станциям за сутки. Было выяснено, что показатель Херста этих ВР часто находится в интервале [0,3; 0,5], то есть сведения о предыдущих свойствах и поведении ВР не сохраняются. Это свидетельствует о проблемах прогнозирования и планирования процессов эксплуатации парков ТС.

Для дальнейшего исследования процессов, описывающихся ВР в области «белого шума»

doi: 10.15802/stp2018/141430
© В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

(H = [0,4, 0,5]) была разработана процедура усреднения уровней ВР, а также предложена процедура ПКР – классификации ВР. Согласно ПКР, на основе исходного ВР формируется серия новых ВР: ВР$i(k)$, k = 2, 3, ... Здесь параметр k указывает количество последовательно расположенных уровней ряда, которые используют для построения очередного уровня преобразованного ряда (как среднего значения уровней k) на i-м этапе процедуры ПКР. Затем вновь образованные ВР$i(k)$ исследуют на основе модели (1). Построение ВР$i(k)$ заканчивают, если для некоторого k соответствующий ВР$i(k)$ станет персистентным по (1), или же на i-м этапе ПКР будут выполнены требования: H(ВР$i(k)$) > H*, H* – задано. К полученным на k-м этапе модифицированным рядам ВР$i(k)$ далее применяют стандартные статистические методы моделирования и прогнозирования.

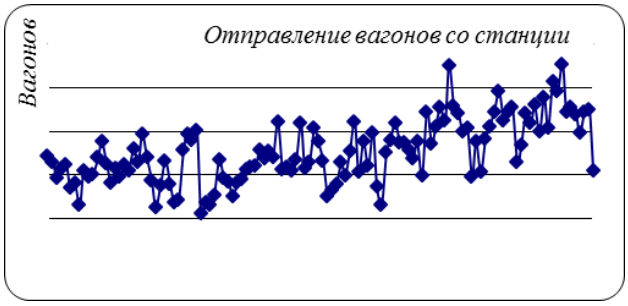


Рис. 3. ВР вагонопотока при k = 3 суток, H = 0,71.

Fig. 3. Time series of the car traffic volume at k = 3 days, H = 0,71

На рис. 3 приведен пример ВР (3) вагонопотока на станции, полученный при агрегировании за 3 суток (ВР третьего класса). Его показатель Херста (1) равен H = 0,71, но $BP_1(k)$ был H = 0,18. Таким образом, для ВР (рис. 3) на практике возможно прогнозирование оценок показателей (затраты, количества вагонов и др.) «с шагом 3».

Процедура ПКР усреднения уровней позволяет дифференцировать процессы, представленные ВР, устанавливая k, при которых возможно более обоснованное формирование моделей прогнозирования. На рис. 4 и 5 приведены примеры ВР различных классов, выявленных на основе ПКР.

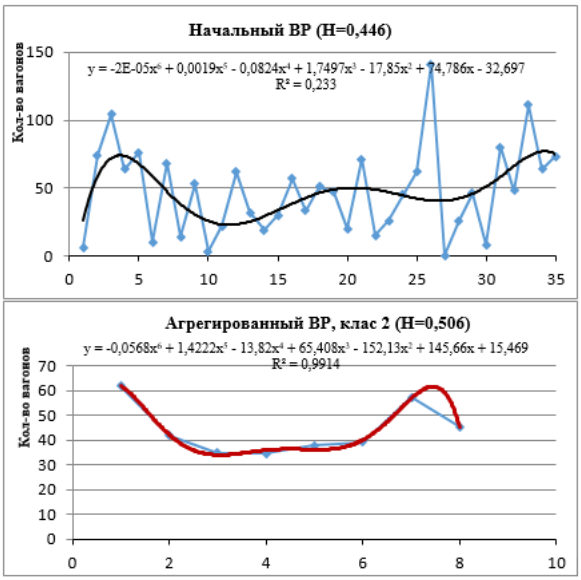


Рис. 4. Пример процессов класса 2

Fig. 4. An example of processes, class 2

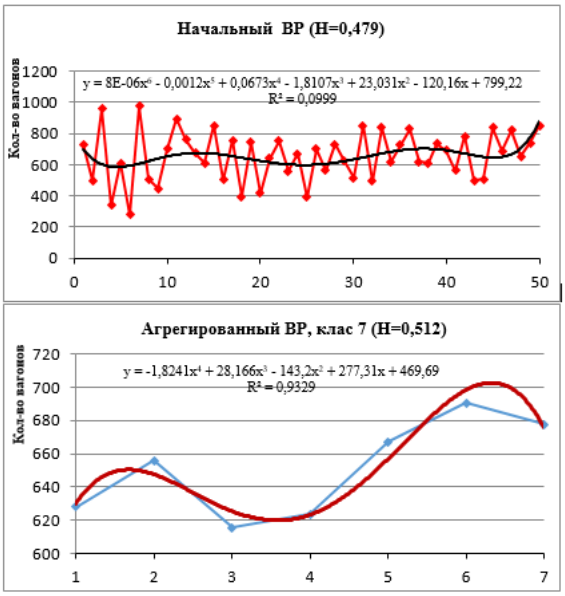


Рис. 5. Примеры классификации ВР железнодорожных процессов

Fig. 5. Examples of the time series classification for the railway processes

Слева сверху (рис. 4 и 5) указаны исходные, а ниже соответствующие преобразованные ВР, а также даны значения их показателей Херста (1) и коэффициенты детерминации моделей [5, 11].

Одним из отличительных свойств метода эксплуатации парка ТС, разрабатываемого

doi: 10.15802/stp2018/141430
© В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

в статье, является применение процедуры ПКР для классификации ВР процессов эксплуатации, формируемых в ИМЭД и ГЭД (этап 3, классификация ВР).

Модуль мониторинга сравнивает полученный спектр тока ЭД со спектром его исправного состояния, хранимого в соответствующей ИМЭД. При обнаружении «существенных» различий этих спектров спектральные характеристики рассматриваемого ЭД поступают в модуль диагностирования, на выходе которого получают как виды, так и оценки достоверности выявленных неисправностей. Эти оценки хранятся в ИМЭД, формируя ВР, далее используемый для прогнозирования технического состояния электродвигателя.

Структура системы ИМ процессов эксплуатации парка ЭД (мониторинг, диагностирование, прогнозирование, ремонты) имеет вид иерархии (рис. 6). Уровни моделей сформированы по функциональному назначению. ИМ-0 – представляет собой совокупность моделей АСЭД согласно [6, 8].

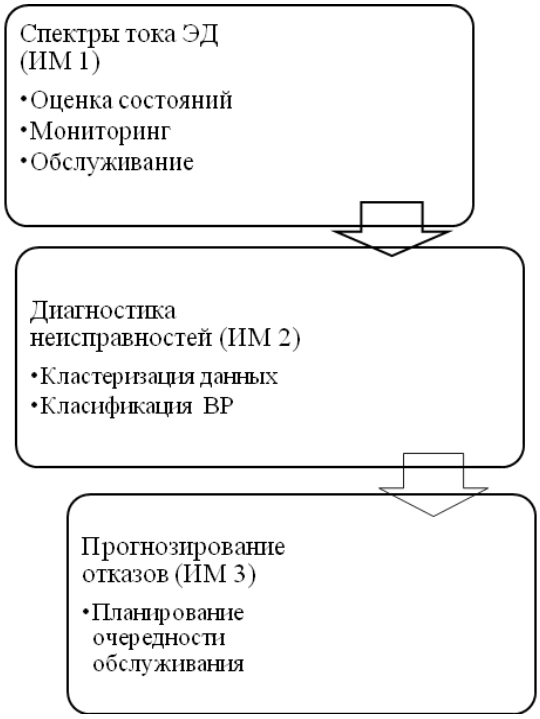


Рис. 6. Система индивидуальных интеллектуальных моделей процессов эксплуатации парка ЭД

Fig. 6. The system of individual intellectual models of the park operation processes of electric motors

Уровень ИМ-1 обеспечивает данными процедуры определения текущего состояния парка ЭД. Модели уровня ИМ-2 используют для процедур кластеризации данных спектров, а также классификации ВР, получаемых при мониторинге. Для определения класса ВР применяют процедуру ПКР. Данные о спектрах тока ЭД дают возможность установить существующие или же скрытые неисправности контролируемых устройств, которые могут возникнуть на следующих этапах эксплуатации ЭД, а также оценить ожидаемый срок до их проявления.

Выявленные на основе ИМЭД (рис. 5) непосредственные или потенциальные неисправности ЭД анализируют моделями прогнозирования и планирования процессов эксплуатации (ИМ-3). Оценки параметров ИМ-3 используют для решения задач оптимизации очереди обслуживания ГЭД.

Для формирования процедур мониторинга состояний парка ЭД в реальном масштабе времени могут быть использованы методы и средства автоматизации станций [14]. Обработку и интерпретацию данных ИМ, с учетом возможности развития парка ЭД, а также расширения перечня контролируемых параметров объектов, обеспечивают современные технологии онтологической поддержки процедур классификации [12], концептуального моделирования данных сложной структуры [13] и др. Использование указанных методов и технологий позволяет создавать современные АСУЭД, реализующие также и задачи прогнозирования и планирования процессов эксплуатации парков ЭД железнодорожных стрелочных переводов.

С учетом процедур ПКР набор данных ИМЭД электродвигателей содержит следующие характеристики:

– временные последовательности (ВР) спектров тока ЭД;

– информация о свойствах ВР – константа Херста (1) исходного ВР, класс ВР, а также значение XV преобразованного ВР, построенного по процедуре ПКР;

– классификация возможных отказов ЭД по спектрам тока (вид неисправности, а также достоверность этого состояния) – прогнозный период до события, полученный методом линейной экстраполяции [6];

doi: 10.15802/stp2018/141430
© В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

– оценки числа переключений стрелки за установленный период.

На основе ИМЭД формируют $ИДГ_k$ – модели обслуживания групп ЭД при эксплуатации. Общую оценку свойств $ИДГ_k$ получают на основе функций max/min, применяемых к показателям каждого ЭД группы. В набор свойств $ИДГ_k$ входят: затраты на нормативное обслуживание ($ЗН_k$), дополнительные технологические затраты при выходе двигателей из строя ($ДЗ_k$), нормативное число переключений стрелок за установленный период (NT_k). По NT_k вычисляют аналоги вероятности для расчета показателя возможных общих затрат. Также для $ИДГ_k$ на основе показателя Херста вычисляют свойства группового ВР, его класс (процедура ПКР). В случае необходимости выполняют классификацию преобразованного по ПКР ряда, что позволяет уточнить модели прогнозирования процессов эксплуатации для ГЭД и ЭД.

Модель оптимального планирования очередности обслуживания (МОПОО) ГЭД реализуют следующим образом. Считаются заданными период планирования T и max ресурс на обслуживание (максимально возможное количество ЭД, которое можно обслужить за период T) – $ED(T)$. Для каждой $ИМГЭД_k$ на основе ее BP_k определяют количество возможных отказов за период T – $n(T)$, а также их виды. Кроме того, устанавливают ГЭД, которые подлежат плановому обслуживанию согласно нормативов (ПНО) [1] – $ГЭД_H(T)$ и количество ЭД в них – $n_H(T)$. Таким образом, суммарное количество ЭД в каждой группе, которые подлежат ремонту:

$$n_{ГЭД_k}(T) = n(T) + n_H(T)$$

При этом если $n(T) = 0$, то ГЭД подлежит только нормативному обслуживанию. В этом случае форматируется множество $G(T)$:

$$G(T) = \{ГЭД_k(T)\},\ \forall\ n_{ГЭД_k} > 0.$$

Если количество $ГЭД(T)$ в плановом периоде, которые подлежат обслуживанию,

$$(n_{ГЭД_k}(T) > 0,\ \ \forall\ k = \overline{1, ED(T)})$$

не превышает 12, достаточно будет использовать перебор всех возможных вариантов перестановки ГЭД. При большом $n_{ГЭД_k}(T) > 14$ выбор оптимальной перестановки можно осуществить с использованием поисковой оптимизации – генетических алгоритмов [4, 6, 12].

Для формирования модели расчета очередности обслуживания ГЭД разработан специализированный показатель эффективности планирования. Показатель соответствует оценкам ожидаемых дополнительных затрат (ОДЗ) за период планирования T. Очередность обслуживания ГЭД, при которой эти затраты минимальны, является оптимальной. Величину ОДЗ рассчитывают так:

– по модели $ИДГ_k$ выбирают $ДЗ_k$ и NT_k, на основе которых вычисляют оценки вероятностей событий отказов в группе $P(NT_k)$;

– для ЭД, входящих в $ИДГ_k$, по моделям ИМЭД определяют общие дополнительные затраты $ДЗ_{рем}$ на ремонт ЭД, которые могут выйти из строя в период планирования (с учетом возможного прогнозируемого типа отказа):

– $ЗН_k$ нормативные затраты на ремонт ЭД (убрать?).

$$ДЗ_{рем} = \sum_n З_{вид\ рем} * n_{ЭД}\ .$$

Значение $ОДЗ_k$ равно:

$$ОДЗ_k = \left(ОДЗ_k * P(NT_k)\right) + ДЗ_{k\ рем} + ЗН_k .$$

МОПОО ГЭД имеет вид:

$$\sum_{k=1}^{n} ОДЗ_k \to \min . \qquad (2)$$

Условие отбора ГЭД в множество $G(T)$ осуществляют с учетом (2).

При расчете $ОДЗ_k$ был установлен период планирования, по которому вычислены $ОДЗ_k$. В то же время в процессе эксплуатации возможны события, которые требуют оперативной коррекции плана. Эти события приводят к появлению новых групп $ИДГ_k$, в которых в пе-

doi: 10.15802/stp2018/141430
© В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

риод планирования могут произойти отказы (по результатам диагностики токов ЭД). Принятие решений относительно таких групп ЭД – задача оперативного планирования эксплуатации парка ЭД.

ВР спектров токов могут рекомендовать несколько видов возможных неисправностей одновременно, но с разными временами их возможного проявления. Исходя из этих данных, проводят расчет оценок надежности транспортной системы, по которым и выбирают группу ЭД для первоочередного обслуживания.

Научная новизна и практическая значимость

В статье получили развитие метод и информационные технологии дистанционного мониторинга и оптимального планирования процессов эксплуатации парков железнодорожных технических систем. Научная новизна полученных результатов определяется следующим: впервые предложена модель оптимального планирования, как выбора последовательности обслуживания групп объектов парка ЭД. Усовершенствованы индивидуальные модели эксплуатации ЭД и ГЭД, которые отличаются дополнительной информацией по классификации данных мониторинга ЭД, что позволяет уточнить оценки текущих и прогнозированных состояний с учетом случайных факторов.

Полученные результаты обеспечивают новые возможности группового оптимального планирования обслуживания парка ЭД по критерию минимума ожидаемых затрат. Процедура классификации данных мониторинга позволяет повысить достоверность результатов прогнозирования антиперсистентных временных последовательностей, а значит и обоснованность планов по очередности обслуживания объектов парка ЭД.

Выводы

В статье исследованы вопросы совершенствования метода планирования процессов эксплуатации парка технических средств, основанного на прогнозировании состояний ЭД и групп ЭД по данным индивидуальных моделей. Для определения оптимальной последовательности обслуживания парка ЭД была разработана МОПОО позволяющая повысить достоверность определения очередности обслуживания ГЭД, используя оценки показателя Херста.

Предложена новая категория объектов анализа – группа обслуживания (ГЭД). Полученная модель обеспечивает минимизацию затрат по ГЭД на эксплуатацию парка ЭД за счет применения специализированной процедуры классификации индивидуальных данных дистанционного мониторинга параметров ЭД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизация процессов диагностики электродвигателей стрелочных переводов в условиях эксплуатации / А. П. Разгонов, А. Б. Руденко, В. В. Скалозуб, О. М. Швец // Залізн. трансп. України. – 2009. – № 6. – С. 20–22.
2. Дистанционное диагностирование состояния стрелочных переводов по временной характеристике и спектральному составу токовой кривой / С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк, О. А. Гололобова, М. А. Ковригин // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 39–57. doi: 10.15802/stp2015/42159
3. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування : ЦШ 0060. – Київ : Укрзалізниця, 2009. – 111 с.
4. Максишко, Н. К. Аналіз і прогнозування еволюції економічних систем : монографія / Н. К. Максишко, В. О. Перепелиця. – Запоріжжя : Поліграф, 2006. – 236 с.
5. Скалозуб, В. В. Индивидуальные интеллектуальные модели для эксплуатации парка однородных железнодорожных технических систем на основе параметров текущего состояния / В. В. Скалозуб, В. Н. Осовик // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2014. – № 6. – С. 8–12.
6. Скалозуб, В. В. Методы интеллектуальных транспортных систем в задачах управления парками объектов железнодорожного транспорта по текущему состоянию / В. В. Скалозуб, О. М. Швец, В. Н. Осовик // Питання прикладної математики і математичного моделювання : зб. наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т ім. О. Гончара. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 229–242.

doi: 10.15802/stp2018/141430
© В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

7. Скалозуб, В. В. Розвиток процедур аналізу та прогнозування недетермінованих технолого-економічних процесів на основі показників хаотичної динаміки / В. В. Скалозуб, И. В. Клименко // Економіка: реалії часу. – 2016. – № 4 (26). – С. 82–90.
8. Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений в единой автоматизированной системе управления грузовыми железнодорожными перевозками Украины / В. В. Скалозуб, И. В. Жуковицкий, И. В. Клименко, А. П. Заец // Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. пр. – Дніпро, 2018. – № 3 (116). – С. 153–162.
9. Faggini, M. The failure of economic theory. Lessons from chaos theory / M. Faggini, A. Parziale // Modern Economy. – 2012. – Vol. 03. – Iss. 01. doi: 10.4236/me.2012.31001
10. Grabusts, P. Ontology-Based Classification System Development Methodology / P. Grabusts, A. Borisov, L. Aleksejeva // Information Technology and Management Science. – 2015. – Vol. 18. – Iss. 1. – P. 129–134. doi: 10.1515/itms-2015-0020
11. Kohonen, T. Self-Organizing Maps / T. Kohonen. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2001. – 501 p.
12. Ontology-Based System for Conceptual Data Model Evaluation / Z. Kazi, L. Kazi, B. Radulovic, M. Bhatt // International Arab Journal of Information Technology. – 2016. – Vol. 13, No. 5. – P. 542–551.
13. Piegat, A. Nonregular nonlinear sector modeling / A. Piegat // Applied Mathematics and Computer Science. – 1998. – Vol. 8, No. 3. – P. 101–123.
14. Zhukovyts'kyy, I. Use of an automaton model for the designing of real-time information systems in the railway stations / I. Zhukovyts'kyy // Transport problems. – 2017. – Vol. 12. – Iss. 4. – P. 101–108.

В. В. СКАЛОЗУБ[1*], І. В. КЛИМЕНКО[2*]

[1*]Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35,
ел. пошта skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751
[2*]Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35,
ел. пошта vanya.klymenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5149-3974

МЕТОД ПЛАНУВАННЯ НЕДЕТЕРМІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Мета. Основною метою статті є удосконалення автоматизованих систем експлуатації парків залізничних технічних систем – електродвигунів (ЕД) постійного струму стрілочних переводів, із урахуванням факторів невизначеності. **Методика.** Вирішення задачі отримано за рахунок розвитку моделі та методу оптимального планування процесів експлуатації множини ЕД. Метод використовує інформаційну технологію за оцінкою параметрів поточних і прогнозованих станів ЕД на основі їх індивідуальних моделей. Моделі формуються як для окремих ЕД, так і для заданих груп. У моделі чинники недетермінованості враховуються на основі показника Херста. Завдання планування зводиться до розрахунку оптимальної послідовності обслуговування об'єктів парку ЕД, яка забезпечує мінімум загальних очікуваних експлуатаційних витрат. **Результати.** У роботі був виконаний аналіз основних відомих моделей, автоматизованих технологій і систем експлуатації парків ЕД (АСЕД) на основі дистанційного моніторингу. Виходячи з практики обслуговування парків ЕД, була запропонована нова категорія об'єктів аналізу – група обслуговування (ГЕД). Для підвищення достовірності прогнозування за індивідуальними моделями ЕД і ГЕД розроблена процедура класифікації процесів, яка використовує показник Херста. Сформульована технолого-економічна модель із планування процесів експлуатації парків ЕД. Виконано розвиток автоматизованої системи управління парків ЕД (АСУЕД) на основі удосконаленої моделі планування процесів експлуатації парків стрілочних ЕД постійного струму. Модель оптимального планування забезпечує мінімізацію очікуваних експлуатаційних витрат на експлуатацію парку ЕД за рахунок вибору послідовності обслуговування ГЕД. Під час планування використовують спеціалізовану процедуру класифікації недетермінованих даних дистанційного моніторингу ЕД, яка дозволяє підвищити точність прогнозування параметрів станів об'єктів. **Наукова новизна**. У статті отримали розвиток математичні моделі та інформаційні технології дистанційного моніторингу процесів експлуатації парків залізничних технічних систем, стрілочних ЕД, заснованих на формуванні індивідуальних моделей ЕД і ГЕД, на оцінці їх поточних і прогнозованих станів, із урахуванням випадкових чинників. Запропонована модель оптимального

doi: 10.15802/stp2018/141430 © В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

планування, як вибору послідовності обслуговування ГЕД, відрізняється груповим обслуговуванням об'єктів парку ЕД, а також застосуванням спеціалізованої процедури класифікації даних моніторингу ЕД. **Практична значимість** отриманих результатів визначається забезпеченням нових можливостей групового оптимального планування обслуговування парку ЕД за критерієм мінімуму очікуваних витрат. Процедура класифікації даних моніторингу процесів експлуатації дозволяє підвищити достовірність результатів прогнозування антиперсистентних часових рядів, дозволяє отримати інтерпретацію класифікації, виходячи з потреби практичного застосування.

Ключові слова: парки технічних систем; електродвигуни стрілочних переводів; процеси експлуатації; умови невизначеності; автоматизована система; моніторинг; прогнозування; індивідуальні моделі процесів; модель оптимального планування; експлуатаційні витрати

V. V. SKALOZUB[1*], I. V. KLYMENKO[2*]

[1*]Dep. «Computer Information Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryana, Lazaryan, St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 35, e-mail skalozhubtk@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

[2*]Dep. «Computer Information Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryana, Lazaryan, St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 35, e-mail vanya.klymenko@gmail.com, ORCID 0000-0001-5149-3974

METHOD FOR PLANNING NON-DETERMINED OPERATION PROCESSES OF RAILWAY TECHNICAL SYSTEM PARK

Purpose. The article is aimed to improve the automated systems operation of the railway technical system parks and switch D.C. electric motors (EMs), taking into account all uncertainties. **Methodology.** Solution of the problem was obtained through the development of the model and the method for optimal planning for the EMs set operation. The method is based on the information technology with the possibility to assess the parameters of the current and the predicted state of EMs based on their individual models. The models are built both for individual EMs and for the specified groups. The factors of non-determinism in the model are calculated based on the Hurst index. The task of planning is solved as calculating the optimal sequence of the EM facilities services, which provides a minimum of the total expected operating costs. **Findings.** The analysis of the main known models, the automated technologies and the systems of EM (ASEM) park operation on the basis of the remote monitoring was done in the research. Based on the practice of the EM park maintenance the new category of the analysis objects was proposed – the service group (SG). The new procedure for the processes classification was developed based on using the Hurst index to improve the reliability of EM and SG individual models forecasting. The technological and the economic model for planning the EM parks operation was created. The article presents the results of the developed automated data management system based on the improved model for the operation planning of the D.C. EM parks. The optimal planning model ensures the minimization of the expected operating costs for the EMs operation, due to the selection of the EM groups service queue. The specialized procedure is used to classify non-deterministic EM remote monitoring data during planning, which allows increasing the accuracy of forecasting the object state parameters. **Origilnality**. The article describes development of the mathematical model and the information technology for the remote monitoring of the railway technical systems park operation, the railway switch EMs based on the formation of EM and SG individual models, as well as on the evaluation of their current and predicted states, taking into account random factors. The proposed model of the optimal planning as the possibility to choose the SG service queue differs by the group maintenance of the EM facilities, as well as application of the specialized procedure for classifying EM monitoring data. **Practical value**. The practical value of the results is determined by the provision of the new opportunities for the group optimal planning of the EM service based on the criterion of the minimum expected costs. The procedure for the monitoring data classification of the operational processes makes it possible to increase the reliability of the forecasting antipersistent time sequences results. It also provides an interpretation of the observational data classification results based on the need for practical usage.

Keywords: technical system parks; electric motors of switches; operational processes; uncertainty conditions; automated system; monitoring; forecasting; individual process models; optimal planning model; operating costs

doi: 10.15802/stp2018/141430 © В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

REFERENCES

1. Razgonov, A. P., Rudenko, A. B., Skalozub, V. V., & Shvets, O. M. (2009). Avtomatizatsiya protsessov diagnostiki elektrodvigateley strelochnykh perevodov v usloviyakh ekspluatatsii. *Zaliznychnyi transport Ukrainy, 6*, 20-22. (in Russian)
2. Buryak, S. Y., Gavrilyuk, V. I., Hololobova, O. O., & Kovryhin, M. O. (2015). Remote diagnostics of turnouts state on timing and spectral composition in current curve. *Science and Transport Progress. 2(56)*, 39-57. doi: 10.15802/stp2015/42159 (in Russian)
3. *Instruktsiia z tekhnichnoho obsluhovuvannia prystroiv syhnalizatsii, tsentralizatsii ta blokuvannia*. (2009). Kyiv: Ukrzaliznytsia. (in Ukranian)
4. Maksyshko, N. K., & Perepelytsia, V. O. (2006). *Analiz i prohnozuvannia evoliutsii ekonomichnykh system*: *Monografiya*. Zaporizhzhia: Polihraf. (in Ukranian)
5. Skalozub, V., & Osovik, V. (2014). Individual intelligent models for operating a number of unified railway engineering systems based on the current state parameters. *Information and Control Systems at Railway Transport, 6*, 8-12. (in Russian)
6. Skalozub, V. V., Shvets, O. M., & Osovik, V. N. (2014). Methods of Intellectual Transport Systems in Tasks of Management by Parks of Objects of Railway Transport on Current Status. *Pytannia prykladnoi matematyky i matematychnoho modeliuvannia*, 229-242. (in Russian)
7. Skalozub, V. V., & Klymenko, Y. V. (2016). Rozvytok protsedur analizu ta prohnozuvannia nedeterminovanykh tekhnoloho-ekonomichnykh protsesiv na osnovi pokaznykiv khaotychnoi dynamiky. *Economics: Time Realities, 4(26)*, 82-90. (in Ukranian)
8. Skalozub, V. V., Zhukovitskiy, I. V., Klimenko, I. V., & Zaets, A. P. (2018). Creation of Intellectual Decision Support Systems in a Unified Automated System for Managing Rail Freight in Ukraine. *Systemni tekhnolohii: Rehionalnyi mizhvuzivskyi, 3(116)*, 153-162. (in Russian)
9. Faggini, M., & Parziale, A. (2012). The Failure of Economic Theory. Lessons from Chaos Theory. *Modern Economy, 03(01)*. doi: 10.4236/me.2012.31001 (in English)
10. Grabusts, P., Borisov, A., & Aleksejeva, L. (2015). Ontology-Based Classification System Development Methodology. *Information Technology and Management Science, 18(1)*, 129-134. doi: 10.1515/itms-2015-0020 (in English)
11. Kohonen, T. (2001). Self-Organizing Maps. Berlin; Heidelberg: Springer. (in English)
12. Kazi, Z., Kazi, L., Radulovic, B., & Bhatt, M. (2016). Ontology-Based System for Conceptual Data Model Evaluation. *International Arab Journal of Information Technology, 13(5)*, 542-551. (in English)
13. Piegat, A. (1998). Nonregular nonlinear sector modeling. *Applied Mathematics and Computer Science, 8(3)*, 101-123. (in English)
14. Zhukovyts'kyy, I. (2017). Use of an automaton model for the designing of real-time information systems in the railway stations. *Transport problems, 12(4)*, 101-108. (in English)

Надійшла до редколегії: 20.06.2018
Прийнята до друку: 03.10.2018

doi: 10.15802/stp2018/141430 © В. В. Скалозуб, И. В. Клименко, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 502.3:504.5

M. M. BILIAIEV[1*], O. V. BERLOV[2*], I. V. KALASHNIKOV[3*], V. A. KOZACHYNA[4*]

1*Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882
2*Dep. «Life Safety», Public higher education institution «Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskyi St., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlovalexandrr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7442-0548
3*State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznychproekt», Konariev St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X
4*Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

CALCULATION OF «VULNERABILITY» ZONE IN CASE OF TERRORIST ATTACK WITH CHEMICAL AGENTS

Purpose. The work involves the development of a numerical model for calculating the «vulnerability» zone of a possible terrorist attack objective with the use of a chemical agent in a built-up environment. The «vulnerability» zone is a territory near the attack objective, where the emission of a chemical agent during the attack will lead to undesirable consequences. The emission of a chemical agent outside the «vulnerability» zone will not create a dangerous concentration near the attack objective. **Methodology.** To solve this problem, we use the equation for the velocity potential, on the basis of which we determine the wind stream velocity field, and the equation adjoint to the equation of mass transfer in the atmospheric air of the chemical agent emitted in the event of a terrorist attack. During simulation, we take into account the uneven wind stream velocity field, atmospheric diffusion and the rate of emission of a chemically hazardous substance. For the numerical integration of the velocity potential equation, we use the method of A. A. Samarsky. For numerical solution of the adjoint equation, we introduce new variables and use an implicit difference splitting scheme. The peculiarity of the developed numerical model is the possibility of operative estimation of the «vulnerability» zone near a possible attack objective. **Findings**. The developed numerical model and computer program can be used for scientifically grounded assessment of the «vulnerability» zone near significant facilities in the event of possible attacks with the use of chemical (biological) agents. The constructed numerical model can be implemented on computers of small and medium power, which allows it to be widely used to solve the problems of this class when developing the emergency response plan. The results of the computational experiment are presented, which allow us to evaluate the possibilities of the proposed numerical model. **Originality**. An effective numerical model is proposed for calculating the «vulnerability» zone near the facility, which may be the target of a terrorist attack with the use of a chemical agent. The model is based on the numerical integration of the velocity potential equation and the equation adjoint to the equation of mass transfer of a chemically dangerous substance in the atmosphere. **Practical value.** The developed model can be used to organize protective actions near the target facility of a possible chemical attack by terrorists.

Keywords: terrorist attack; chemical pollution; «vulnerability» zone, adjoint equation; numerical simulation; air contamination

Introduction

Recently, special attention has been drawn to the tasks related to the assessment of the consequences of possible terrorist acts with the use of chemical (biological) agents [1, 2, 4–14]. Within the framework of this problem, it is possible to single out an extremely important and specific

doi: 10.15802/stp2018/146437 © M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

task – determining the «vulnerability» zone for the terrorist chemical attack objectives. The «vulnerability» zone is a territory near the attack objective, where the emission of a chemical agent during a terrorist act will lead to undesirable consequences at the facility. The release of a chemically hazardous substance outside this zone will not create a «problem» at the attacked facility.

Mathematically, this provision can be expressed as follows: at the objective of the potential terrorist chemical attack, up to the time point τ, the concentration of the hazardous substance must not exceed a certain dangerous value φ:

$$C(r_i, \tau) < \varphi. \quad (1)$$

Here φ is the concentration which results in a certain severity affects for a person.

It should be noted that the solution to this problem becomes quite complicated if the emission of a chemical agent is considered in a built-up environment – which is, in fact, the most obvious situation in the case of a chemical attack. As a «zero» approximation, one can neglect the influence of specific buildings and other facilities on the formation of chemical contamination area and use, for example, Gaussian models to solve the problem, as was done in the «ALOHA» code. For a more detailed assessment of the the contaminated areas, it is necessary to make calculations taking into account the influence of facilities on the formation of concentration fields. Such detailing can be different and determined by a number of factors (for example, availability of a sufficient amount of input information for modeling, available software package for calculations, time for obtaining results, etc.). The models used in practice for assessing the consequences of a terrorist act are based on solving the «direct» problem of mass transfer – i.e. direct solution of the equation of convective-diffusion dispersion of impurities in the *atmosphere at a given place* of emission of a hazardous substance. However, the use of such models requires considerable time to determine the «vulnerability» zone, since the solution to the problem is found by going through different emission points of a chemical agent during a possible terrorist attack, i.e. the problem is solved by the trial-and-error method. Using this approach requires a lot of time to obtain the desired result. In this regard, the actual problem is the development of effective methods for solving the «vulnerability» zone determination problems for various facilities in the context of the growing terrorist threat.

Purpose

The purpose of this work is to create a numerical model to determine the «vulnerability» zone of a facility in case of a chemical attack by terrorists in a built-up environment.

Methodology

We consider the solution method on the example of solving two problems that can be formulated when analyzing terrorist acts with the use of a chemical or biological agent.

Direct problem. If a chemical (biological) agent is used in a terrorist attack, contaminated area can be calculated on the basis of the following mass transfer equation (plan task) [2–5, 7, 8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + Q\delta(x - x_0)\delta(y - y_0), \quad (2)$$

where C – average concentration of chemical (biological) agent in atmospheric air; σ – coefficient taking into account the agent decomposition in the atmosphere; u, v – components of the air velocity vector; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – coefficients of atmospheric turbulent diffusion; Q – intensity of agent emission during the terrorist attack; $\delta(x - x_0)(y - y_0)$ – Dirac delta function; x_0, y_0 – coordinates of the agent emission source during the terrorist attack; t – time.

The boundary conditions for the equation (2) are written as [3]:

$$C = C_0 \quad \text{for } t = 0,$$

$C = 0$ at the boundaries of the calculated area, where C_0 is the known value.

When solving the «direct» problem, it is necessary to specify information about the chemical agent emission point (coordinates x_0, y_0), as well as the agent emission intensity Q).

doi: 10.15802/stp2018/146437
© M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

To apply the equation (1) in the case of dispersion of a chemical (biological) agent in a built-up environment, it is necessary to know the uneven velocity field of the wind flow, i.e. the value of the variables *u=f(x,y), v=f(x,y).* The definition of this field in the presence of buildings is a complex hydrodynamic problem. Abroad, to solve this problem, one traditionally uses the Navier-Stokes equations, supplemented by one or another turbulence model. This base allowed developing specialized software packages such as ANSYS Fluent, FAST, etc. These packages are a powerful tool for solving a wide class of problems. However, it is known that the use of the Navier-Stokes equations for calculating flows with large Reynolds numbers *(iRe),* requires the use of a very small computational grid, which immediately leads to large expenditures of computer time in the practical implementation of the model. In addition, very powerful computers are needed. This becomes a significant obstacle when it is necessary to carry out serial calculations, for example, when developing the ERP (Emergency Response Plan). In MES or in other competent organizations it is necessary to have fast-reading models, which, in this case, would take into account the most significant physical factors of the simulated process. In this work, to determine the wind velocity field *u=f(x,y), v=f(x,y)* in the built-up environment, the potential flow model will be used [5]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=0, \qquad (3)$$

where *P* is the velocity potential.

The value of the components of the wind velocity vector are determined on the basis of the ratios:

$$u=\frac{\partial P}{\partial x},\ v=\frac{\partial P}{\partial y}. \qquad (4)$$

For equation (2) the following boundary conditions are set:

– On solid boundaries the impermeability condition is set:

$$\frac{\partial P}{\partial n}=0,$$

where *n* is the unit vector of the outer normal to the boundary;

– On the boundary of the «out-flow» from the computational domain, the Dirichle boundary condition of the form *P*=const is set;

– On the boundaries where the air «in-flow» occurs, the Neumann boundary condition is set: $\frac{\partial P}{\partial n}=V$, where *V* is the known velocity of the air flow.

The solution of problems for determining the size and intensity of contaminated area on the basis of equations (1), (2) is called the direct mass transfer problem solution.

To determine the «vulnerability» zone of a facility in case of a possible chemical attack, one can use the equations (1) and (2) and determine this zone by «brute force searching» for various coordinate values x_0, y_0, i.e. perform calculations for various points of chemical agent emission. It is quite obvious that such a solution of the problem for determining the «vulnerability» zone using the brute force method for parameters x_0, y_0 requires a lot of computational work, which is not always convenient.

Adjoint problem. Now we will consider a different approach to determining the facilty «vulnerability» zone in case of a chemical terrorist attack.

This approach is based on the application of the adjoint equation (3) [3]:

$$-\frac{\partial C^*}{\partial t}-\frac{\partial uC^*}{\partial x}-\frac{\partial vC^*}{\partial y}+\sigma C^*=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C^*}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C^*}{\partial y}\right)+p, \qquad (5)$$

where C^* is the function associated with the function C, p is a certain function [3].

The boundary conditions for the adjoint problem have the form [3]:

$C^*=C_T^*$ – concentration of the chemical agent in atmospheric air at $t=T$;

$C^*=0$ at the boundaries of the calculated area.

The peculiarity of applying the equation (3) is that the wind flow velocity field is uneven in a built-up environment and is determined by preliminary solving the equation (2) with the subsequent calculation of the velocity vector components by dependencies (3).

doi: 10.15802/stp2018/146437 © M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

The form of the function p can be extremely diverse [3], for example:

$$p(x,y,t)=\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(t-\tau). \quad (6)$$

If the solution of the adjoint equation (5) is found, then, further, it is necessary to find the value of the following functional [3]

$$I=Q\int_0^T C^*(r_0,t)dt,$$

Having constructed the isolines of this functional, we find the solution of the problem posed out of the condition

$$I(r_0,\tau)<\varphi \quad (8)$$

We now consider the methodology for solving the adjoint equation. To solve the adjoint problem (4), we introduce new variables [3]:

$$u^{'}=-u\ ,\ v^{'}=-v,\ t^{'}=T-t.$$

The solution of the adjoint problem begins with the time t = T.

When using new variables, the equation (5) takes the form of equation (2). Next, we will conduct an approximation of the derivatives, following [2, 5]. The approximation of the time derivative is as follows:

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^{'}}\approx\frac{C_{ij}^{*n+1}-C_{ij}^{*n}}{\Delta t^{'}}.$$

Further, in the formulas, the symbols «*», ««« will be omitted.

The first derivatives are approximated by the relations [5]

$$\frac{\partial uC}{\partial x}=\frac{\partial u^+C}{\partial x}+\frac{\partial u^-C}{\partial x},$$
$$\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial v^+C}{\partial y}+\frac{\partial v^-C}{\partial y},$$

where

$$u^+=\frac{u+|u|}{2},\ u^-=\frac{u-|u|}{2},\ v^+=\frac{v+|v|}{2},\ v^-=\frac{v-|v|}{2}.$$

For approximation of the first derivatives, we use the formulas [2, 5]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial u^+C}{\partial x}&\approx\frac{u_{i+1,j}^+C_{ij}^{n+1}-u_{ij}^+C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x}=L_x^+C^{n+1},\\
\frac{\partial u^-C}{\partial x}&\approx\frac{u_{i+1,j}^-C_{i+1,j}^{n+1}-u_{ij}^-C_{ij}^{n+1}}{\Delta x}=L_x^-C^{n+1},\\
\frac{\partial v^+C}{\partial y}&\approx\frac{v_{i,j+1}^+C_{ij}^{n+1}-v_{il}^+C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y}=L_y^+C^{n+1},\\
\frac{\partial v^-C}{\partial y}&\approx\frac{v_{i,j+1}^-C_{i,j+1}^{n+1}-v_{ij}^-C_{ij}^{n+1}}{\Delta y}=L_y^-C^{n+1}.
\end{aligned} \quad (7)$$

Approximation of the second derivatives is carried out as follows [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x})\approx\mu_x\frac{C_{i+1,j}^{n+1}-C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2}-\mu_x\frac{C_{ij}^{n+1}-C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2}=$$
$$=M_{xx}^-C^{n+1}+M_{xx}^+C^{n+1},$$
$$\frac{\partial}{\partial y}(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y})\approx\mu_y\frac{C_{i,j+1}^{n+1}-C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2}-\mu_y\frac{C_{ij}^{n+1}-C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2}=$$
$$=M_{yy}^-C^{n+1}+M_{yy}^+C^{n+1}.$$

Taking into account the above designations of difference operators, we write the difference analogue of equation (2):

$$\frac{C_{ij}^{n+1}-C_{ij}^n}{\Delta t}+L_x^+C^{n+1}+L_x^-C^{n+1}+L_y^+C^{n+1}+$$
$$+L_y^-C^{n+1}+\sigma C_{ij}^{n+1}=$$
$$(M_{xx}^+C^{n+1}+L_{xx}^-C^{n+1}+L_{yy}^+C^{n+1}+L_{yy}^-C^{n+1})+$$
$$+Q_{ij}\delta_{ij}. \quad (9)$$

Now we carry out the splitting of the difference equation (9). The splitting equations at each step are written as:

At the first step ($k=n+\frac{1}{4}$):

$$\frac{C_{i,j}^{n+k}-C_{i,j}^n}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^+C^k+L_y^+C^k\right)+\frac{\sigma}{4}C_{i,j}^k=$$
$$=\frac{1}{4}\left(M_{xx}^+C^k+M_{xx}^-C^n+M_{yy}^+C^k+M_{yy}^-C^n\right), \quad (10)$$

At the second step ($k=n+\frac{1}{2}; c=n+\frac{1}{4}$;):

doi: 10.15802/stp2018/146437
© M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

$$\frac{C_{i,j}^{k}-C_{i,j}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^- C^k+L_y^- C^k\right)+\frac{\sigma}{4}C_{i,j}^{k}=$$

$$=\frac{1}{4}\left(M_{xx}^- C^k+M_{xx}^+ C^c+M_{yy}^- C^k+M_{yy}^+ C^c\right), \quad (11)$$

At the third step ($k=n+\frac{3}{4}; c=n+\frac{1}{2}$;) the dependence (11) is applied.

At the fourth step ($k=n+1; c=n+\frac{3}{4}$;) the dependence (10) is applied.

The desired value of the function *C* at each fractional step is determined by the «point-to-point computation» formula. At the last calculation step, we have the equation

$$\frac{\partial C^*}{\partial t'}=p\,.$$

To solve this equation, the Euler method is used.

For the numerical solution of the equation (2), the method by A.A. Samarskii is used. Preliminarily the equation (2) is reduced to evolutionary form.

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (12)$$

here t is fictitious time.

When $t\to\infty$, solution of the equation (12) tends to solution of the Laplace equation (3). To solve the equation (12), it is necessary to specify the potential field at *t*=0, for example, one can take *P*=0 in the entire computational domain.

The solution of equation (12) is split into two steps, at each step of splitting the difference equations have the form

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2}-P_{i,j}^{n}}{0,5\Delta\eta}=\frac{P_{i+1,j}^{n}-P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2}+\frac{-P_{i,j}^{n+1/2}+P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2}+$$

$$+\frac{P_{i,j+1}^{n}-P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2}+\frac{-P_{i,j}^{n+1/2}+P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2},$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1}-P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta}=\frac{P_{i+1,j}^{n+1}-P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}+\frac{-P_{i,j}^{n+1/2}+P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2}+$$

$$+\frac{P_{i,j+1}^{n+1}-P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}+\frac{-P_{i,j}^{n+1/2}+P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}.$$

The unknown value $P_{i,j}$, at each splitting step, is calculated using the explicit point-to-point computation formula.

For the software implementation of the constructed numerical model, FORTRAN was used.

Findings

Figures 1, 2 present the results of solving the «direct» task – the calculation of the chemical contamination zone during ammonia emission at a specific point of the area. The characteristic direction of the wind speed is shown by an arrow in the figure. As can be seen from the presented figures, the chemical contamination zone increases with time and covers the buildings located in the area of attack.

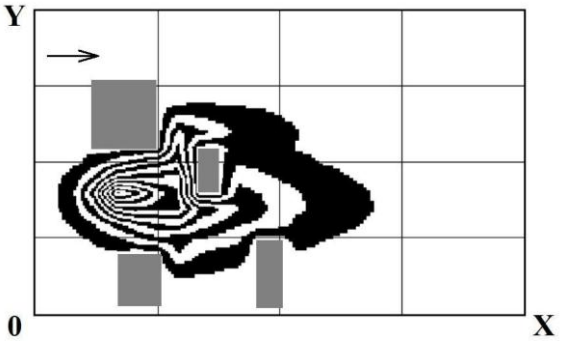


Fig. 1. Isolines of NH_3 concentration during a hypothetical terrorist attack $\tau=9$ (nondimensional time, direct problem solution):
1 – point of agent emission



Fig. 2. Isolines of NH_3 concentration during a hypothetical terrorist attack $\tau=14$ (nondimensional time, direct problem solution):
1 – point of agent emission n

The time to solve the direct problem is 3 seconds.

Fig. 3 shows the sketch of the computational domain in the second problem – «vulnerability»

doi: 10.15802/stp2018/146437
© M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

zone determination based on the adjoint equation. The situation of a possible chemical attack in the area of three buildings is simulated (Fig. 3). It was assumed that near the attack objective (building), the concentration of ammonia should not exceed the threshold value $\varphi = 9$ for time moment $\tau = 16$ (nondimensional concentration and time).

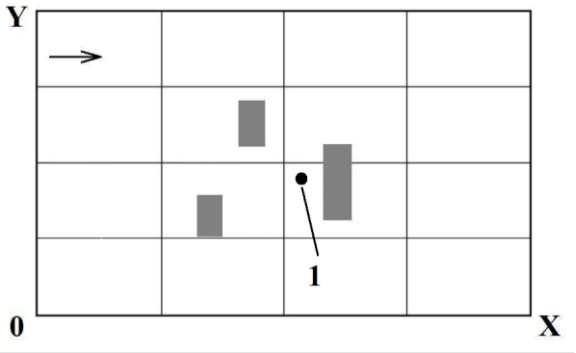


Fig. 3. Sketch of computational domain (the second task – «vulnerability» zone determination for the facility):
1 – target of terrorist attack

Figure 4 shows the lines of the functional (7) defined after solving the adjoint equation (5). The arrow in Fig. 3 and 4 indicates the wind direction.

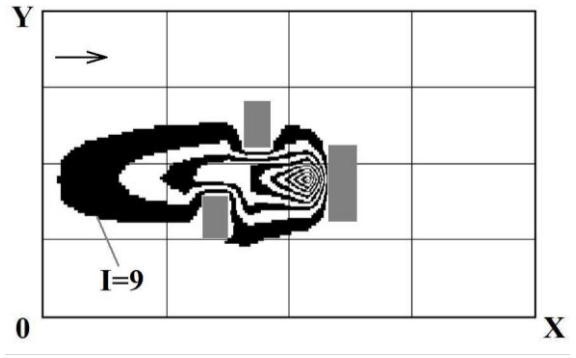


Fig. 4. Isolines of functional (7) for time moment $\tau = 16$ (nondimensional time)

The isolines in Fig. 4 show that if the chemical agent emission source is along one of the lines *I=const*, then the chemical effect on the objective of attack will be the same. Thus, isoline *I=9* shows that if the chemical agent emission is at one of the points on this isoline, then at the time moment $\tau = 16$ the concentration of the chemical agent near the objective of attack will correspond to a given value $\varphi = 9$ (here the concentration is nondimensional value).

The chemical agent emission inside the zone constrained by this isoline will lead to an even greater degree of atmospheric air contamination near the objective of attack.

It should be noted that the calculation time of the «vulnerability» zone is about 3 seconds.

Originality and practical value

The numerical model has been developed that allows determining the «vulnerability» zone near the objective of a possible terrorist attack with the use of a chemical (biological) agent.

The peculiarity of the developed model is the use of the adjoint equation to solve the problem together with the potential flow equation for calculating the wind velocity field in build-up environment. The computer time consumed for the implementation of the model is a few seconds.

Conclusions

The numerical model has been developed for determining the «vulnerability» zone of a facility during a possible chemical attack by a terrorist in build-up environment. The calculation basis is the solution of the adjoint mass transfer equation. The constructed model can be used to develop a strategy to minimize the consequences of terrorist attacks with the use of chemical (biological) agents. Further improvement in this direction should be carried out for developing a three-dimensional numerical model that allows determining the dimensions of the facility «vulnerability» zone during a possible terrorist attack.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск. Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – Москва : Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.

doi: 10.15802/stp2018/146437 © M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

4. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Barret, A. M. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness : Degree of Doctor of Philosophy / Anthony Michael Barret ; Carnegie Mellon University. – Pittsburg, Pennsylvania, 2009. – 123 p.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953
8. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations [Electronic resource]. – Available at: https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transport-operations?product=139 – Title from the screen. – Accessed : 29.01.2018.
10. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility / Aleksandr Tumanov, Vasily Gumenyuk, Vladimir Tumanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 90. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027
11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, Naser Moharram Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communication. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
12. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain / Cejun Cao, Congdong Li, Qin Yang, Fanshun Zhang // Sustainability. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 11. doi: 10.3390/su9112103
13. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Electronic resource] / Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Available at: http://open.alberta.ca/publications/9781460131213 – Title from the screen. – Accessed : 14.06.2018.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, Jan Bitta // Bezpecnostni vyzkum. The Science for Population Protection. – 2015. – No. 2.

М. М. БІЛЯЄВ[1*], О. В. БЄРЛОВ[2*], І. В. КАЛАШНІКОВ[3*], В. А. КОЗАЧИНА[4*]

[1*]Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882
[2*]Каф. «Безпека життєдіяльності», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlovalexandrr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7442-0548
[3*]ДП «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», вул. Конарєва, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X
[4*]Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

РОЗРАХУНОК ЗОНИ «УРАЗЛИВОСТІ» ОБ'ЄКТА ЗА МОЖЛИВОГО ТЕРАКТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ХІМІЧНОГО АГЕНТА

Мета. Робота передбачає розробку чисельної моделі для розрахунку зони «уразливості» можливого об'єкта атаки терориста із застосуванням хімічного агента в умовах забудови. Зона «уразливості» являє собою територію біля об'єкта атаки, де емісія хімічного агента під час теракту призведе до небажаних наслідків. Емісія хімічного агента поза зоною «уразливості» не створить небезпечну концентрацію біля об'єкта атаки. **Методика**. Для вирішення поставленого завдання використано рівняння для потенціалу швидкості, на базі якого визначено поле швидкості вітрового потоку, і рівняння, спряжене з рівнянням масопереносу в атмосферному повітрі хімічного агента, викинутого в разі теракту. Під час моделювання

doi: 10.15802/stp2018/146437 © M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

були враховані нерівномірне поле швидкості вітрового потоку, атмосферна дифузія, інтенсивність викиду хімічно небезпечної речовини. Під час чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використаний метод Самарського А. А. Для чисельного розв'язання спряженого рівняння введені нові змінні та застосована неявна різницева схема розщеплення. Особливістю розробленої чисельної моделі є можливість оперативної оцінки зони «уразливості» біля можливого об'єкта атаки. **Результати**. Розроблена чисельна модель і комп'ютерна програма можуть бути використані для науково обґрунтованої оцінки стану зони «уразливості» біля важливих об'єктів у разі можливих терактів із застосуванням хімічних (біологічних) агентів. Побудована чисельна модель може бути реалізована на комп'ютерах малої і середньої потужності, що дозволяє широко використовувати її для вирішення завдань зазначеного класу під час розробки плану ліквідації в аварійній ситуації. Наведені результати обчислювального експерименту, що дозволяють оцінити можливості цієї чисельної моделі. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективну чисельну модель для розрахунку зони «уразливості» біля об'єкта, який може бути ціллю терористичної атаки із застосуванням хімічного агента. Модель заснована на чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості й рівняння, що є спряженим до рівняння масопереносу хімічно небезпечної речовини в атмосфері. **Практична значимість.** Розроблена модель може бути використана для організації захисних заходів біля об'єктів можливої хімічної атаки терориста.

Ключові слова: теракт; хімічне забруднення; зона «уразливості»; спряжене рівняння; чисельне моделювання; забруднення атмосфери

Н. Н. БЕЛЯЕВ[1*], А. В. БЕРЛОВ[2], И. В. КАЛАШНИКОВ[3*], В. А. КОЗАЧИНА[4*]

[1*]Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

[2*]Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днипро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlovalexandrr@gmail.com, ORCID 0000-0002-7442-0548

[3*]ГП «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта «Укрзализнычпроект», ул. Конарева, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

[4*]Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

РАСЧЕТ ЗОНЫ «УЯЗВИМОСТИ» ОБЪЕКТА ПРИ ВОЗМОЖНОМ ТЕРАКТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО АГЕНТА

Цель. Работа предполагает разработку численной модели для расчета зоны «уязвимости» возможного объекта атаки террориста с применением химического агента в условиях застройки. Зона «уязвимости» представляет собой территорию возле объекта атаки, где эмиссия химического агента при теракте приведет к нежелательным последствиям. Эмиссия химического агента вне зоны «уязвимости» не создаст опасной концентрации возле объекта атаки. **Методика.** Для решения поставленной задачи использовано уравнение для потенциала скорости, на базе которого определено поле скорости ветрового потока, и уравнение, сопряженное с уравнением массопереноса в атмосферном воздухе химического агента, выброшенного в случае теракта. При моделировании были учтены неравномерное поле скорости ветрового потока, атмосферная диффузия, интенсивность выброса химически опасного вещества. При численном интегрировании уравнения для потенциала скорости использован метод Самарского А. А. Для численного решения сопряженного уравнения введены новые переменные и применена неявная разностная схема расщепления. Особенностью разработанной численной модели является возможность оперативной оценки зоны «уязвимости» возле возможного объекта атаки. **Результаты.** Разработанная численная модель и компьютерная программа могут быть использованы для научно обоснованной оценки положения зоны «уязвимости» возле значимых объектов в случае возможных терактов с применением химических (биологических) агентов. Построенная численная модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать ее для решения задач рассматриваемого класса при разработке плана ликвидации в аварийной ситуации. Представлены результаты вычислительного эксперимента, позволяющие оценить возможности этой численной модели. **Научная новизна.** Предложена эффективная численная модель для расчета зоны

doi: 10.15802/stp2018/146437 © M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

«уязвимости» возле объекта, который может быть целью террористической атаки с применением химического агента. Модель основана на численном интегрировании уравнения для потенциала скорости и уравнения, являющегося сопряженным к уравнению массопереноса химически опасного вещества в атмосфере. **Практическая значимость.** Разработанная модель может быть использована для организации защитных мероприятий возле объектов возможной химической атаки террориста.

Ключевые слова: теракт; химическое загрязнение; зона «уязвимости»; сопряженное уравнение; численное моделирование; загрязнение атмосферы

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: Uchebebnoe posobie dlya vuzov.* Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Marchuk, G. I. (1982). Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
6. Barret, A. M. (2009). Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness. (Dissertation of Doctor of Philosophy). Carnegie Mellon University, Pittsburg. (in English)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress, 1(61),* 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953 (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security, 87-91*. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. *CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations*. Retrived from https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transport-operations?product=139 (in English)
10. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 90*. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027 (in English)
11. Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, & Naser Moharram Nejad. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communication, 10(1),* 192-204. (in English)
12. Cao, C., Li, C., Yang, Q., & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability, 9(11).* doi: 10.3390/su9112103 (in English)
13. Government of Alberta. Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrived from http://open.alberta.ca/publications/9781460131213 (in English)
14. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, & Jan Bitta. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *Bezpecnostni vyzkum. The Science for Population Protection, 2.* (in English)

Received: June 04, 2018
Accepted: September 28, 2018

doi: 10.15802/stp2018/146437 © M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 629.42.083-047.58

B. E. BODNAR[1], O. B. OCHKASOV[2*], E. B. BODNAR[3], T. S. HRYSHECHKINA[4], M. V. OCHERETNYUK[5]

[1]Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 01, e-mail bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772
[2*]Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214
[3]Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X
[4]Dep. «Higher Mathematics», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 36 26 04, e-mail grishechkina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150
[5]Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

SIMULATION OF LOCOMOTIVE REPAIR ORGANIZATION BY THE METHODS OF QUEUE SYSTEMS THEORY

Purpose. The article is aimed to evaluate the influence of locomotives` operation and reliability indicators on the system of locomotives repair organization in depot, using the methods of queue theory. **Methodology.** The article describes the locomotive repair workshop using the terms and concepts of the queue systems theory (QST). The tasks solved during simulation of the repair workshop operation are formulated, the list of initial data and simulation results is given. A graphical simulation environment Simulink was used as a software simulation tool. **Findings.** It was established that the main indicators of locomotive depot operation are affected by the volume of traffic, the reliability of locomotives, the rule used to select locomotives from the queue, the number of operating repair bays. The developed model of the depot repair workshop will make possible rational planning of the repair workshop`s equipment use, the human capital, the time of putting the locomotives into repair taking into account the workshop loading uniformity, as well as to improve the repair parts supply logistics. This model in a simplified form describes the repair process of the main diesel locomotive fleet, and can be supplemented depending on the repair type performed in the depot. **Originality.** The paper presents the locomotive repair depot as an object of the queue systems theory. The simulation model of the locomotive repair depot was developed. It allows analyzing the influence of various factors on the system of locomotives` repair organization in the depot. **Practical value**. The obtained results make it possible to determine the influence of locomotives` operation and reliability indicators on the organization of the locomotive repair depot operation. In further studies, the developed model can be used to improve the system of repair organization on the railway network when introducing new series of locomotives and changing the strategy of their maintenance.

Keywords: locomotive repair workshop; simulation; queue system theory; organization of the repair workshop operation

Introduction

Improvement of the locomotives` repair system organization is one of the ways to reduce operating costs. Management system restructuring of Ukrzaliznytsia`s locomotive facilities involves the separation of operation and repair functions of traction rolling stock. Such an approach is already used at large industrial transport enterprises (metallurgical enterprises, ore mining and processing enterprises). Foreign railway companies (RR, Lithuanian Railways, etc.) also carried out the functions` separation of locomotive operation and their repairs between the locomotive depots. On the basis of the

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

largest depots, the repairs of locomotives allocated not only in this depot, but also in the other ones, are performed. Another part of the depots performs solely the locomotive maintenance during operation. At this stage in Ukrzaliznytsia operate locomotive depots specialized in locomotive series and repair types (CR-2, CR-3).

Separation of depots into operational and repair ones requires careful consideration, as the repair program is changing, which can lead to the formation of locomotives queue waiting for repairs, and this in turn will lead to increase in their downtime. On the one hand, when using this approach, the enterprise`s costs increase, this is due to the locomotive's withdrawal from operation and the costs of their transportation from the operating depot to the repair one. On the other hand, there may be a low loading of repair enterprises, which leads to the idle of repair facilities waiting for the locomotives supply. The described situations eventually lead to the maintenance costs increase for both the locomotives and the technological equipment. The positive thing is that the creation of specialized depots reduces the capital costs for the repairs organization, increases the equipment use efficiency, increases the labor productivity, and, as a consequence, the repair quality. The distribution task of the repair program between the repair depots of the railway network and the methodology of selecting the specialized depots is an urgent task [7, 10, 16]. Solution of this task involves the development of general model for the locomotives` repair organization at a level not less than that of the Ukrzaliznytsia`s regional branch. The part of this model is the model of locomotives` repair organization at the level of repair depot. This article is devoted to the analysis of methods and approaches to simulating the operation organization of the repair locomotive depot.

The initial data when simulating the repair organization in the locomotive depot is the need for locomotive repairs. From the point of view of the operating company, the locomotive is a part of the overall locomotive fleet management system. To maintain a given level of locomotive reliability, the transport companies use a certain maintenance system. In this case, the choice of the locomotive maintenance system is influenced by such factors as the repair enterprise characteristics, the type of service and operating conditions, the performance history of each locomotive (electronic passport), the level of equipment and loading of the repair enterprise, the failure statistics (reliability) of locomotive units and the locomotives of this series, as well as a number of other factors.

Based on the analysis [7, 12, 14, 19, 20] of the existing systems of locomotive fleet management, the main tasks are formulated that need to be addressed when choosing a system of technical maintenance of locomotives. Among them are as follows:

– development of the methodology for repair units loading planning, taking into account the technical condition of the locomotive fleet and the volume of planned repair works;

– development of methodology for planning logistical support for repair units, taking into account the technical condition of the locomotive fleet and the volume of planned repair works.

Solution of the set tasks also requires the creation of the model for the locomotive repair organization in the repair depot, taking into account the repair units loading planning, the technical condition of the locomotive fleet, and the volume of the performed works.

The methods of the queue system theory [5, 7, 8, 11, 13], optimization [2, 4, 9, 15], the theory of economic and mathematical modeling [1, 4], analysis of the large amounts of data and simulation modeling are used during the development of the repair organization model in the locomotive depot [18].

Purpose

To analyze the influence of locomotives` operation and reliability indicators on the locomotive repair system organization in the depot with the use of the queue theory methods.

Methodology

The task of planning the locomotive putting into repair is to reduce the idle time of locomotives in repair and waiting for repairs, which significantly affects the locomotive availability. At the same time, it is necessary to ensure the loading uniformity of the repair units, the possibility of planning the supply of components and consumables, as well as to ensure a given level of the locomotive fleet reliability.

The existing system of repair planning is based on the control of overhaul periods. It determines

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

the need for repair or maintenance on the basis of comparison with the normative values of the between-repair mileages of locomotives (first of all, when working in trains) or the operating time (for example, when used for shunting or export works). Typical standards for between-repair mileages according to locomotive series can be set individually for different locomotive series.

The need for repair or maintenance for this locomotive is fixed in the event the between-repair mileage, or the operating time, have become more than the normative ones for the corresponding repair type. In this case, according to regulatory documents, for the loading uniformity of the depot repair workshops and locomotive repair plants, it is possible to regulate the overhauls (usually within -10% + 25%). That is, fixing of the need for repair or maintenance takes place for a certain interval of values of between-repair mileage or the operating time of locomotive.

Current values of between-repair mileages or locomotive operating time are determined based on the accounting for their work (by processing the running schedules of the drivers). At the same time, since the determination of the need for repair or maintenance should be carried out for the future, forecasting of changes in these parameters is used. As a rule, forecasting is carried out based on their average values.

Planning of locomotives` putting into repair can be of two types: the calendar planning and the planning by mileage. When planning according to calendar time one proceeds from the average daily mileage during this period or the planned task in order to determine a planned day of locomotive putting into repair. The disadvantage of this method of planning is that the actual daily mileage of locomotives greatly varies due to their different technical condition, different idle times in the current repair, different degrees of use at work and other things and it is significantly different from the planned one. More expedient is the planning according to the mileage, since in this case the locomotives are put into repair according to the established frequency. The disadvantage of this method of planning is possible uneven performance of the daily maintenance plan. The maintenance schedule of an individual locomotive is based on the established periodicity of maintenance, repair cycle and daily mileage of locomotive.

This approach is used in the case of the planned-preventive locomotive repair system. However, its use when implementing the combined repair system or the one, which takes into account the technical condition of the locomotives, is not rational, since in this case the repair volume and the overhaul periods are determined for each individual locomotive taking into account the reliability characteristics of the locomotive units.

For the operational planning of putting the locomotives into repair, one has to know the probabilities of locomotives being in different conditions (operation, repair type, idle time when waiting for repair, etc.).

When solving this problem, it is expedient to use the tools of queue theory.

Let us consider in more detail the possibility of using the queue theory approaches to simulate the processes of putting the locomotive into repair and its implementation, analyzing the loading of repair bays and calculating their required quantity.

In the queue theory the methods of probability theory and mathematical statistics are used. The queue theory considers the theoretical basis of rational design and operation of queue systems (QS). The queue system operation consists in performing the flow of applications received by it. The subject of the queue theory is the establishment of a relationship between the nature of the application flow, the performance of certain channels, the number of channels and the service efficiency.

The following indicators can be the efficiency characteristics of services:

– the average idle-time of certain channels;

– the average time of waiting in the queue;

– the probability that the received application will be accepted for service immediately;

etc.

The given characteristics describe the degree of the system's suitability to perform the application flow (i.e., its capacity). The average number of applications that a system can serve per unit of time is considered as capacity.

Maintenance of requirements in the system is performed by the service channels. A classical queue system contains from one to an infinite number of channels.

Depending on the availability of the possibility for the beginning of servicing the QS are divided into:

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

– lossy systems in which the claims that did not find any free handler at the time of receipt are lost;

– the systems with waiting, which have an infinite capacity storage for buffering the received requirements, while the waiting requirements form a queue;

– the systems with end capacity storage (with waiting and restrictions), in which the queue length cannot exceed the storage capacity. At the same time, the requirement received by the overflow system in which there is no free place for waiting is lost.

The selection of the application from the queue is made using the discipline of service. Its examples are: FIFO (first in, first out), random, SF (short forward). In systems with waiting, a storage in the general case can have a complex structure. The system can be single-channel and multichannel.

To simulate the locomotive fleet repair under conditions of locomotive depot, a waiting system that has infinite capacity storage for buffering the received requirements is suitable. At this the waiting locomotives form a queue. Also in this case, from our point of view, it is most appropriate to choose a requirement from the queue according to the FIFO system.

In this system, the repair bays are the service facilities (channels), the flow of applications is the number of locomotives received by the service system for a certain time: year, month, week, shift, hour, minute. The application flow serves as the basis for planning the production program of the repair bays.

Due to the randomness of the incoming application flow and the duration of their execution, there is always some average number of idle locomotives. Therefore, it is necessary to distribute the number of repair bays between different subsystems so that the idle time and, therefore, the losses would be minimal. Note that the locomotive queue system is a discrete type physical system *S* with a countable set of states:

$$S_0, S_1, S_2, ..., S_n, ...$$

At any moment of time *t* the system *S* can be in one of these states. Then for any *t*:

$$\sum_k p_k(t) = 1,$$

where $p_k(t)$ $(k = 0,1,2,...,n,...)$ – is the probability that at the moment of time *t* the system will be in the state S_k.

Let us consider in more detail the repair workshop of the locomotive depot, in which all types of depot repairs are performed, as a queue system for locomotives.

Repair workshop with repair bays, in terms of queue theory, has the following characteristics:

– it is an open system, since the source of applications is outside the system (operation depot) and has an infinite number of them;

– by the nature of the queue creation it is a waiting system with an infinite queue. Non-preferential service discipline, the service system can be adopted any of the previously considered ones;

– by the number of channels it is a multichannel system with parallel channel arrangement. In this paper, we consider the depot as a system with heterogeneous channels, since when performing repairs in the depot, the bays specialized according to the repair types are used (M-3, CR-1, etc.).

For the repair workshop as a queue system, the main factor that determines the processes occurring in it is the input application flow – the number of locomotives that need one or another type of repair. The Poisson application flow was considered during the simulation. The service time of one application is accepted as distributed according to the demonstrative law.

To analyze the random processes with discrete states it is convenient to use the so-called graph of states and transitions. For further calculation of the efficiency characteristics of the QS operation, it is necessary to determine the possible states of the system, as well as the probability of occurrence of these states (p_i), which are called the limit probabilities of the system.

The graph of the states of the repair workshop with repair positions *n* and places in the queue *m* is shown in Fig. 1.

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

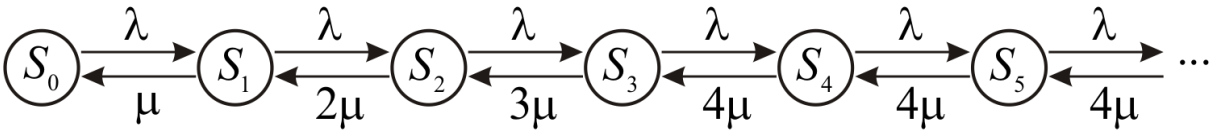


Fig. 1. The graph of the repair workshop states with *n* repair positions and a limited queue

Let us introduce the following designations: i – is the number of locomotive sections (applications) in the queue system (in the queue and on the service); λ_i – is the intensity of sections receipt into the system, provided that there are already i sections in the system; μ_i – is the output flow intensity of the served sections, provided that there are i sections in the system; p_i – is the probability that there are i sections in the system; ρ – is the summary bay loading intensity (or the channel loading intensity)

The repair workshop of locomotives can take one of the following states:

– S_0 – all positions are free; S_1 – the one position is occupied, and the rest ones $n-1$ are free;

– S_2 – two positions are occupied, and the rest ones $n-2$ are free; S_n – all positions are occupied, but there is no queue;

– S_{n+1} – all positions are occupied, one locomotive (section) is in the queue;

– S_{n+m} – all positions are occupied, m locomotives (sections) are in the queue.

It should be noted that in this system the service flow intensity will increase from μ to $n\mu$ with the increase in the number of applications from 0 to n. Accordingly, the number of service channels is increased. With the number of requirements exceeding n, the service intensity remains equal to $n\mu$.

When simulating, the following tasks need to be solved: simulating the repair workshop operation for a specified number of hours; determining the probabilities of the repair workshop conditions $S_0 \cdots S_{n+m}$; determining the average number of applications (locomotives) in the service queue; determining the average number of applications for service; determining the average number of applications in the system; determining the average duration of the application stay in the queue; determining the average duration of the application stay in the system; determining the system relative capacity; determining the absolute system capacity.

For the probabilities $p_1(t)$, $p_2(t)$,…, $p_n(t)$ the system of linear differential equations (Erlang equations) will be:

$$\frac{dp_0}{dt} = -\lambda p_0 + \mu p_1;$$

$$\frac{dp_1}{dt} = -\lambda p_1 - \mu p_1 + \lambda p_0 + 2\mu p_2;$$

$$\frac{dp_2}{dt} = -\lambda p_2 - 2\mu p_2 + \lambda p_1 + 3\mu p_3;$$

$$\frac{dp_3}{dt} = -\lambda p_3 - 3\mu p_3 + \lambda p_2 + 4\mu p_4;$$

$$\frac{dp_4}{dt} = -\lambda p_4 - 4\mu p_4 + \lambda p_3 + 4\mu p_5;$$

$$\frac{dp_5}{dt} = -\lambda p_5 - 4\mu p_5 + \lambda p_4 + 4\mu p_6. \qquad (1)$$

In the steady (stationary) state (with $t \to \infty$) the system of equations takes the form:

$$\lambda p_0 = \mu p_1;$$

$$\lambda p_1 = 2\mu p_2;$$

$$\lambda p_2 = 3\mu p_3;$$

$$\lambda p_3 = 4\mu p_4;$$

$$\lambda p_4 = 4\mu p_5. \qquad (2)$$

Let us add a normalizing condition:

$$\sum_{i=0}^{\infty} p_i = 1. \qquad (3)$$

Its meaning is that at any moment the workshop must be in one of its states (idle, operation, operation with a queue).

The initial data for the simulation of the repair workshop operation are: the number of repair positions; simulation time; the intensity of the incoming

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

application flow (including the scheduled and unscheduled repairs); the duration of service at each repair position for each repair type.

As a result of simulation, the following indicators of the QS (locomotive repair workshop) are determined: the probability of the system conditions $S_0 \cdots S_{n+m}$; the average number of applications (locomotives) in the queue for service; the average number of applications in the system; the average duration of stay in the queue; the average duration of application stay in the system. The simulation results of the repair workshop operation for a given time include the number of the received applications and the number of hours spent for service.

To determine the probability of finding a QS in one of the possible conditions, we use formulas 4–6:

$$p_0 = \left(1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \ldots + \frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{1}{(n-\rho)}\right)^{-1} \quad (4)$$

$$p_k = \frac{\rho^k}{k!} p_0, \ (k = 1..n), \quad (5)$$

where k – is the number of the occupied repair bays;

$$p_{n+i} = \frac{\rho^{n+i}}{n^i \cdot n!} p_0, \ (i = 5,6,...) \quad (6)$$

The probability of queue formation is determined by the formula:

$$p_q = \frac{\rho^n}{n!} \cdot \frac{n}{n-\rho} \cdot p_0. \quad (7)$$

The average application number in a queue:

$$L_q = \frac{\rho^{n+1}}{n!} \cdot \frac{n}{(n-\rho)^2} \cdot p_0 \quad (8)$$

Average number of applications served:

$$L_{ser} = \rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (9)$$

The average number of application stay in the system:

$$\bar{t}_{QS} = \frac{L_q}{\lambda} + \frac{Q}{\mu}, \quad (10)$$

where Q – is the relative QS capacity (in this case it is equal to one).

Average time in the queue:

$$\bar{t}_q = \frac{L_q}{\lambda}. \quad (11)$$

Findings

To study the influence of the system of maintenance, operation and repair organization of locomotives, as well as their reliability level, a model was developed and the operation of the main diesel locomotive repair workshop at the repair depot was simulated. When simulating, it was taken the performance of all types of depot repair of diesel locomotives TM-3, CR-1, CR-3 and unscheduled repairs in the repair workshop. When organizing the applications servicing (locomotive repair simulation), specialization of repair bays by the repair type was taken. There are two groups of repair bays. Unscheduled repairs and CR-3 are performed in one group, CR-1 and TM-3 are performed in another group of repair bays.

A graphical environment Simulink was used as a simulation software. The block diagram of the repair workshop model of the locomotive depot is presented in Fig. 2

The blocks 1 and 2 form the applications for the diesel locomotives repair interspaced in time in a random manner. Block 3 forms the time for performing repair in a random manner. The calculation of application number and the service time of diesel locomotives is made in accordance with the current regulatory documentation. In this case, it is allowed the deviation of the receipt time ± 20% from the norm. The block 4 «repair position» was used as a repair depot in the model. The time required to perform the corresponding repair type is determined by this block depending on the repair type ± 20%. FIFO discipline has been adopted as the discipline for servicing the applications. The queue of diesel locomotives waiting for repair is organized by the block 5.

A simulation of the repair workshop for the allocated locomotive fleet of $N = 18$ diesel locomotives (36 sections) of the 2TE116 series was performed. The average daily mileage of diesel locomotives was taken $l = 500$, the simulation time is 365 days, the share of unscheduled repairs is 5%. The simulation results are shown in Table 1–3.

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

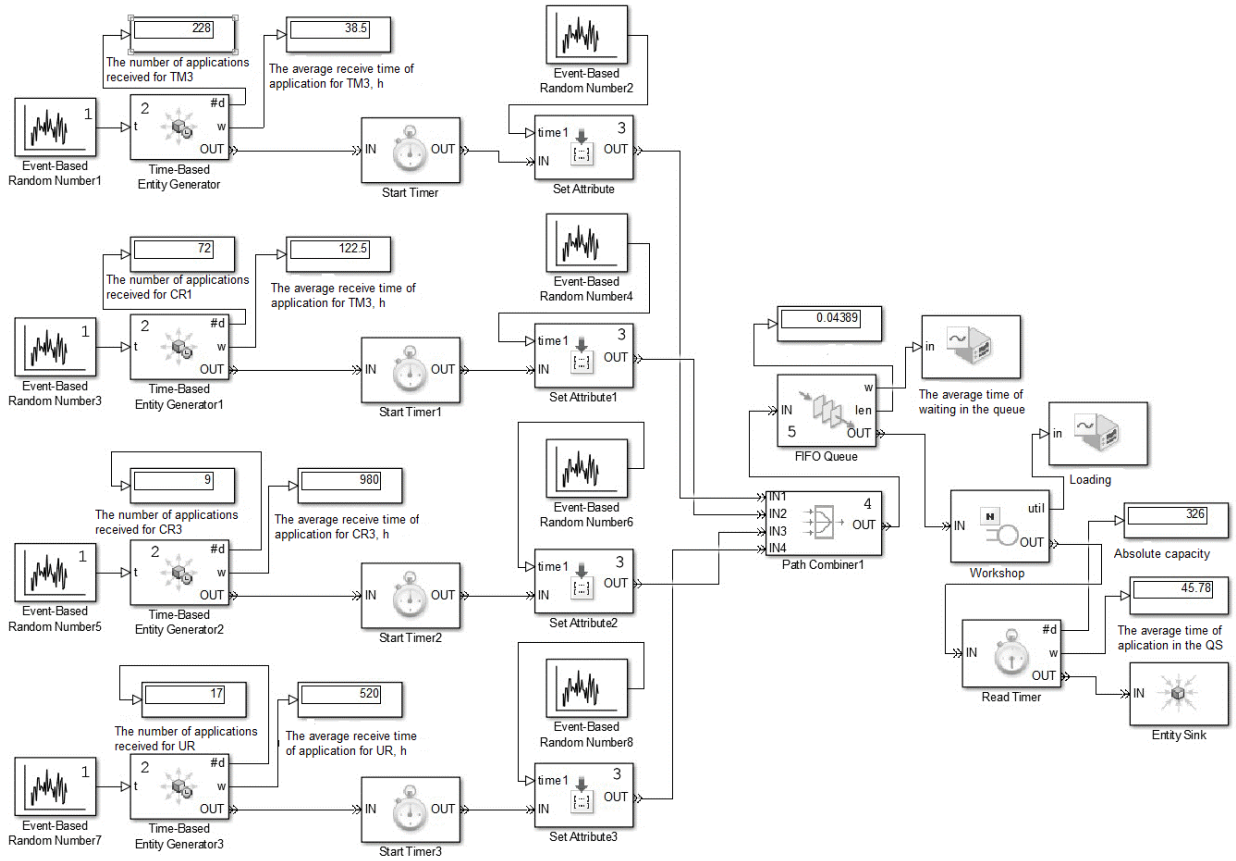


Fig. 2. Repair workshop model of diesel locomotives in the form of QS:
1 – former of the receipt time of locomotives for repair;
2 – block of the former of the application distribution in time;
3 – former of diesel locomotive service time at repair position;
4 – diesel locomotive repair positions; *5* – queue of locomotives waiting for repair

In tab. 1 shows the simulation results with a different number of repair stalls. As can be seen from the obtained results, with the accepted initial data, the use of three repair stalls is the most rational, while the loading of the depot workshop is 0.6%.

The Tab. 1 shows the simulation results with a different number of repair bays. As one can see from the obtained results, with the accepted initial data the use of three repair bays is the most rational, at this the loading of the depot workshop is 0.6%.

Table 1

The simulation results of the repair workshop operation for diesel locomotives on change of the repair bays number

Number of repair bays, pcs.	The average time of waiting in the queue, h.	The average queue length, sect.	Workshop/depot loading, %	The average time of application in the QS, h
2	60	1.439	0.88	83.18
3	1.5	0.044	0.59	45.78
4	0	0	0.45	44.6

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

The Tab. 2 shows the simulation results when using in the depot three repair bays and changing the average daily mileage of diesel locomotives from 400 to 700 km/day. As one can see from the obtained results, increase in the average daily mileage leads to an increase in the repair workshop loading to 0.79%, while the queue length increases by 10 times, and the average waiting time – by 5.6 times. This is explained by the fact that with increase in the average daily mileage, the number of applications for repairs is increasing.

The Tab. 3 shows the simulation results when using in the depot three repair bays and changing the number of unscheduled repairs from 5 to 10%. The results show that increase in the percentage of unscheduled repairs leads to a slight increase in the repair workshop loading, at this, the queue length and average waiting time change slightly as well.

Table 2

The simulation results of the repair workshop when changing the average daily mileage of diesel locomotives

The average daily mileage of locomotive, km	The average time of waiting in the queue, h	The average queue length, locomotives	Workshop/depot loading, %	The average time of application in the QS, h
400	0.8	0.02	0.48	44.94
500	1.5	0.04	0.59	45.78
600	2.1	0.08	0.68	45.58
700	4.5	0.22	0.79	48.22

Table 3

The simulation results of the repair workshop when changing the unscheduled repair percentage

Percentage of unscheduled repairs of locomotives, %	Locomotive average daily mileage, km	The average waiting time in the queue, h	The average queue length, locomotives	Workshop/depot loading, %	The average time of application in the QS, h
5	500	1.4	0.032	0.57	44.3
8	500	1.5	0.044	0.59	45.78
10	500	1.5	0.048	0.6	46.68

Originality and practical value

The work originality lies in the presentation of the locomotive depot as the queue system object. A simulation model of a locomotive repair depot has been developed. It allows analyzing the influence of various factors on the system of organizing the locomotive repair in depot.

The use of the developed model and simulation results allows determining the influence of operation and reliability indicators of locomotives on the work organization of the locomotive repair depots. In further studies, the proposed model can be used to improve the organization of repair on the road network when introducing new series of locomotives and changing their maintenance strategy.

Conclusions

The paper presents the locomotive repair workshop description using the terms and concepts of the queue system. The tasks for modeling the repair work workshop operation are formulated, a list of the initial data and the results of the simulation are given. Based on the simulation results analysis, it is possible to optimize the repair workshop structure and the required number of personnel, based on the transportations volume, locomotive reliability indicators, the locomotive selection rule used, the number of operating repair bays, etc. It is established that the listed parameters influence the main indicators of the locomotive repair depot. The proposed models of the repair workshop make possible the rational planning of the equipment use, human capital, the time for putting the locomotive

doi: 10.15802/stp2018/147740
© B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

into repair, taking into account the uniform loading of the workshop, as well as providing the opportunity to improve the spare parts supply logistics. The model in a simplified form describes the process of the mainline locomotive fleet repair and can be supplemented depending on the repair type performed at the depot.

The problem of accounting the reliability indicators when simulating the locomotive putting into unplanned repair types, determining the probability of locomotive transition from one state to another, as well as taking into account the reliability indicators when determining the repair work amount, requires further development.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Берестовой, А. М. Моделирование системы технического обслуживания и ремонта локомотивов / А. М. Берестовой, А. А. Лямзин // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. Серія: Технічні науки : зб. наук. пр. – Маріуполь, 2003. – Вип. 13. – С. 276–280.
2. Босов, А. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог : монография / А. А. Босов, П. А. Лоза. – Днепропетровск : Дриант, 2015. – 252 с.
3. Гришечкіна, Т. С. Побудова математичної моделі раціональної системи утримання технічних об’єктів залізничного транспорту / Т. С. Гришечкіна // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2017. – Вип. 14. – С. 30–35. doi: 10.15802/tstt2017/123165
4. Гурьева, А. Г. Основы моделирования процессов технического обслуживания локомотивов / А. Г. Гурьева, Н. Б. Чернецкая-Белецкая // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2015. – № 1 (218). – С. 262–265.
5. Зіненко, О. Л. Підвищення ефективності використання локомотивного парку шляхом вдосконалення управління експлуатаційною роботою : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / Зіненко Ольга Леонідівна ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – 200 с.
6. Исследование процесса эксплуатации и ремонта электровозов с использованием инструментов BIG DATA и имитационного моделирования / А. В. Скребков, А. А. Воробьев, А. Г. Ламкин, Д. И. Бодриков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4. – С. 190–198.
7. Кудаяров, М. М. Выбор оптимальной организации ремонта локомотивов на полигоне железной дороги / М. М. Кудаяров // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. – 2012. – № 3 (32). – С. 99–103.
8. Кудаяров, М. М. Оптимизация системы технологического процесса ремонта тягового подвижного состава / М. М. Кудаяров, И. С. Цихалевский // Современные проблемы транспортного комплекса России : межвуз. сб. науч. тр. молодых ученых, магистрантов и аспирантов. – Магнитогорск, 2012. – Вып. 2. – С. 14–22.
9. Лоза, П. А. Оценка качества выполнения системы содержания парка электроподвижного состава / П. А. Лоза, Т. С. Гришечкина // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 9. – С. 87–93.
10. Методика и алгоритм оптимального распределения локомотивов по ремонтным предприятиям / А. В. Горский, А. В. Скребков, Т. О. Чигамбаев, И. С. Цихалевский // Транспорт Урала. – 2008. – № 3 (18). – С. 25–27.
11. Моделювання процесу оперативного планування роботи локомотивного парку і локомотивних бригад / І. В. Жуковицький, В. В. Скалозуб, О. В. Вєтрова, О. Л. Зіненко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 12. – С. 74–78.
12. Моделювання зміни коефіцієнту технічного використання маневрового тепловозу для різних систем утримання / А. П. Фалендиш, А. Л. Сумцов, О. В. Артеменко, О. В. Клецька // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 1/3 (79). – С. 24–31. doi: 10.15587/1729-4061.2016.60640
13. Очкасов, А. Б. Подходы к моделированию системы технического обслуживания локомотивов / О. Б. Очкасов, Т. С. Гришечкина, М. В. Очеретнюк // Актуальні проблеми автоматизації та управління : тези доп. V міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. молодих учених і аспірантів (Луцьк, 28–30 бер. 2017 р.) / Луцьк. нац. техн. ун-т, НУ «Львівська політехніка», Київ. нац. ун-т харчових технологій, Нац. гірн. ун-т, Херсон. нац. техн. ун-т, Люблінська політехніка. – Луцьк, 2017. – № 5. – С. 99–104.
14. Сумцов, А. Л. Удосконалення методів та моделей визначення системи технічної експлуатації модернізованих маневрових тепловозів : дис. … канд. тех. наук : 05.22.07 / Сумцов Андрій Леонідович ; Укр. держ. ун-т залізн. трансп. – Харків, 2017. – 165 с.

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

15. Шантаренко, С. Г. Моделирование процессов технического обслуживания локомотивов / С. Г. Шантаренко // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2005. – Т. 308, № 5. – С. 169–171.
16. Bodnar, B. Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways / B. Bodnar, A. Ochkasov, D. Bobyr // Technologijos ir Menas = Technology and Art. – 2016. – № 7. – P. 109–114.
17. Bodnar, B. System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems / B. Bodnar, O. Ochkasov // Transport Means : Proc. of 21st Intern. Sci. Conf. (Sept. 20–22, 2017) / Kaunas University of Technology, Klaipėda University. – Juodkrante, Kaunas, Lithuania. – 2017. – Pt. I. – P. 43–47.
18. Development of an Integrated Model for the Evaluation and Planning of Railroad Track Maintenance / Alexander H. Lovett, C. Tyler Dick, Conrad Ruppert, M. Rapik Saat, Christopher Barkan // Proc. of the 2013 Joint Rail Conf. (Apr. 15–18, 2013, Knoxville, Tennessee, USA). – Knoxville, 2013. doi: 10.1115/jrc2013-2407
19. Ochkasov, O. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives / O. Ochkasov, O. Shvets, L. Černiauskaitė // Technologijos ir Menas = Technology and Art. – 2017. – № 8. – P. 68–71.
20. Wu, J. Study on Adjustment Evaluation of Locomotive Affair Productivity Layout / Jun Wu, Hua Fei Jia // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 401–403. – P. 2120–2126. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.401-403.2120

Б. Є. БОДНАР[1], О. Б. ОЧКАСОВ[2*], Є. Б. БОДНАР[3], Т. С. ГРИШЕЧКИНА[4], М. В. ОЧЕРЕТНЮК[5]

[1]Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 01, ел. пошта bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

[2*]Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

[3]Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

[4]Каф. «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (0562) 36 26 04, ел. пошта grishechkina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

[5]Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

МОДЕЛЮВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РЕМОНТУ ЛОКОМОТИВІВ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Мета. У науковій роботі необхідно оцінити вплив показників експлуатації та надійності локомотивів на систему організації їх ремонту в депо з використанням методів теорії масового обслуговування. **Методика**. У роботі представлено опис цеху з ремонту локомотивів за допомогою термінів і понять системи масового обслуговування (СМО). Сформульовано завдання, які вирішуються при моделюванні роботи ремонтного цеху, наведено перелік вихідних даних і результатів моделювання. У якості програмного засобу моделювання використане графічне середовище імітаційного моделювання Simulink. **Результати**. Встановлено, що на основні показники роботи локомотивного депо впливає обсяг перевезень, надійність локомотивів, що використовуються, правило відбору локомотивів із черги, кількість працюючих ремонтних стійл. Розроблена модель ремонтного цеху депо дозволяє раціонально планувати використання обладнання, фонду робочої сили, часу постановки локомотивів у ремонт із урахуванням рівномірності завантаження цеху, а також удосконалити логістику поставок запасних частин. Ця модель у спрощеному вигляді описує процес виконання ремонту парку магістральних тепловозів і може бути доповнена в залежності від виду виконуваних у депо ремонтів. **Наукова новизна.** У роботі локомотиворемонтне депо представлене як об’єкт системи масового обслуговування. Розроблено імітаційну модель локомотиворемон-

doi: 10.15802/stp2018/147740 © В. Е. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

тного депо, яка дозволяє проводити аналіз впливу різних чинників на систему організації ремонту локомотивів у депо. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють визначити вплив показників експлуатації та надійності локомотивів на організацію роботи локомотиворемонтного депо. У подальших дослідженнях розроблена модель може бути використана для удосконалення системи організації ремонту на мережі доріг при впровадженні нових серій локомотивів та зміні стратегії їх технічного обслуговування.

Ключові слова: цех ремонту локомотивів; моделювання; система масового обслуговування; організація роботи ремонтного цеху

Б. Е. БОДНАРЬ[1], А. Б. ОЧКАСОВ[2*], Е. Б. БОДНАРЬ[3], Т. С. ГРИШЕЧКИНА[4], М. В. ОЧЕРЕТНЮК[5]

[1]Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 01, эл. почта bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

[2*]Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

[3]Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

[4]Каф. «Высшая математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 36 26 04, эл. почта grishechkina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

[5]Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта ocheretniukmaksym@gmail.com, ORCID 0000-0002-9032-8602

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Цель. В научной работе необходимо оценить влияние показателей эксплуатации и надежности локомотивов на систему организации их ремонта в депо с использованием методов теории массового обслуживания. **Методика.** В работе представлено описание цеха по ремонту локомотивов с помощью терминов и понятий системы массового обслуживания (СМО). Сформулированы задачи, решаемые при моделировании работы ремонтного цеха, приведен перечень исходных данных и результатов моделирования. В качестве программного средства моделирования использована графическая среда имитационного моделирования Simulink. **Результаты.** Установлено, что на основные показатели работы локомотивного депо влияет объем перевозок, надежность локомотивов, используемое правило отбора локомотивов из очереди, количество работающих ремонтных стойл. Разработанная модель ремонтного цеха депо позволяет рационально планировать использование оборудования, фонда рабочей силы, времени постановки локомотивов в ремонт с учетом равномерности загрузки цеха, а также усовершенствовать логистику поставок запасных частей. Эта модель в упрощенном виде описывает процесс выполнения ремонта парка магистральных тепловозов и может быть дополнена в зависимости от вида выполняемых в депо ремонтов. **Научная новизна.** В работе локомотиворемонтное депо представлено как объект системы массового обслуживания. Разработана имитационная модель локомотиворемонтного депо, которая позволяет проводить анализ влияния различных факторов на систему организации ремонта локомотивов в депо. **Практическая значимость**. Полученные результаты позволяют определить влияние показателей эксплуатации и надежности локомотивов на организацию работы локомотиворемонтного депо. В дальнейших исследованиях разработанная модель может быть использована для усовершенствования системы организации ремонта на сети дорог при внедрении новых серий локомотивов и изменении стратегии их технического обслуживания.

Ключевые слова: цех ремонта локомотивов; моделирование; система массового обслуживания; организация работы ремонтного цеха

doi: 10.15802/stp2018/147740 © В. Е. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

REFERENCES

1. Berestovoy, A. M., & Lyamzin, A. A. (2003). Modelirovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lokomotivov. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky, 13,* 276-280. (in Russian)
2. Bosov, A. A., & Loza, P. A. (2015). *Teoreticheskie osnovy ratsionalnogo soderzhaniya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: monografiya*. Dnepropetrovsk: Driant. (in Russian)
3. Hryshechkina, T. S. (2017). Mathematical Model of the Rational Maintenance System of Railway Transport Technical Objects. *Transport Systems and Transportation Technologies. Collection of Scientific Works of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician Lazaryan, 14,* 30-35. doi: 10.15802/tstt2017/123165 (in Ukrainian)
4. Hureva, A. H., & Chernetskaia-Beletskaia, N. B. (2015). Fundamentals of Modeling of Processes of Maintenance of Locomotives. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia, 1(218),* 262-265. (in Russian)
5. Zinenko, O. L. (2010). *Pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannia lokomotyvnoho parku shliakhom vdoskonalennia upravlinnia ekspluatatsiinoiu robotoiu.* (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk. (in Ukranian)
6. Skrebkov, A. V., Vorobiyov, A. A., Lamkyn, A. G., & Bodrikov, D. I. (2017). The Study of Running and Maintenance Process of Electric Locomotives with Big Data and Simulation Modeling Tools. *Byulleten rezultatov nauchnykh issledovaniy, 4,* 190-198. (in Russian)
7. Kudayarov, M. M. (2012). Vybor optimalnoy organizatsii remonta lokomotivov na poligone zheleznoy dorogi *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya, 3(32),* 99-103. (in Russian)
8. Kudayarov, M. M. (2012). Optimizatsiya sistemy tekhnologicheskogo protsessa remonta tyagovogo podvizhnogo sostava. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii, 2,* 14-22. (in Russian)
9. Loza, P. A., & Hryshechkyna, T. S. (2015). Estimation of the quality of implementation electric rolling stock maintenance system. *Elektryfikatsiia transportu, 9,* 87-93. (in Russian)
10. Gorskiy, A. V., Skrebkov, A. V., Chigambaev, T. O., & Tsikhalevskiy, I. S. (2008). Methods and Algorithm of Optimum Sending of Locomotives to Repair Enterprises. *Transport Urala, 3(18),* 25-27. (in Russian)
11. Zhukovytskyi, I. V., Skalozub, V. V., Vietrova, O. V., & Zinenko, O. L. (2006). Modeliuvannia protsesu operatyvnoho planuvannia roboty lokomotyvnoho parku i lokomotyvnykh bryhad. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana, 12,* 74-78. (in Ukrainian)
12. Falendysh, A. P., Sumtsov, A. L., Artemenko, O. V., & Kletska, O. V. (2016). Simulation of changes in the steady state availability factor of shunting locomotives for various maintenance systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/3(79),* 24-21. doi: 10.15587/1729-4061.2016.6064040 (in Ukrainian)
13. Ochkasov, O. B., Hryshechkina, T. S., & Ocheretnyuk, M. V. (2017). Approaches to the system simulation of maintenance operations for locomotives. *Aktualni problemy avtomatyzatsii ta upravlinnia : tezy dopovidei V mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii molodykh uchenykh i aspirantiv (Lutsk, 28–30 bereznia 2017 r.), 5,* 99-104. (in Russian)
14. Sumtsov, A. L. (2017). *Udoskonalennia metodiv ta modelei vyznachennia systemy tekhnichnoi ekspluatatsii modernizovanykh manevrovykh teplovoziv.* (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Ukrainskyi derzhavnyi universytet zaliznychnoho transport, Kharkiv. (in Ukraininan)
15. Shantarenko, S. G. (2005). Modelirovanie protsessov tekhnicheskogo obsluzhivaniya lokomotivov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universitetata. Inzhiniring georesursov, 308(5),* 169-171. (in Russian)
16. Bodnar, B., Ochkasov, A. & Bobyr, D. (2016). Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir Menas = Technology and Art, 7,* 109-114. (in English)
17. Bodnar, B., & Ochkasov, O. (2017). System Choice of the Technical Maintenance of Locomotives Equipped with on-Board Diagnostic Systems. *Transport Means: Proceedings of 21st International Science Conference (Sept. 20–22, 2017).* Juodkrante, Kaunas, Lithuania, Pt. I, 43-47. (in English)
18. Lovett, A. H., Dick, C. T., Ruppert, C., Saat, M. R., & Barkan, C. (2013). Development of an Integrated Model for the Evaluation and Planning of Railroad Track Maintenance. 2013 *Joint Rail Conference*. doi: 10.1115/jrc2013-2407 (in English)
19. Ochkasov, O., Shvets, O., & Černiauskaitė, L. (2017). Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir Menas = Technology and Art, 8,* 68-71. (in English)

doi: 10.15802/stp2018/147740 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

20. Wu, Jun, & Jia, Hua Fei (2013). Study on Adjustment Evaluation of Locomotive Affair Productivity Layout. *Applied Mechanics and Materials, 401-403,* 2120-2126. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.401-403.2120 (in English)

Received: June 20, 2018
Accepted: October 03, 2018

 © B. E. Bodnar, A. V. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

УДК 656.2

Т. В. БУТЬКО[1*], В. М. ПРОХОРОВ[2*], Д. М. ЧЕХУНОВ[3*]

[1*]Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 89, ел. пошта butko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1082-599X

[2*]Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, ел. пошта vicmmx@gmail.com, ORCID 0000-0001-8963-6467

[3*]Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, ел. пошта cdm2017@meta.ua, ORCID 0000-0002-1570-6351

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СОРТУВАЛЬНИМИ СТАНЦІЯМИ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ НА ОСНОВІ БАГАТОЦІЛЬОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Мета. У науковій роботі передбачається формалізувати процес побудови плану оперативної роботи сортувальної станції в умовах обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. Розроблену математичну модель необхідно реалізувати у вигляді системи інтелектуального планування, яка дозволить мінімізувати як експлуатаційні витрати, так і технологічні ризики в процесі роботи сортувальної станції. **Методика.** Проведено аналіз сучасних підходів у моделюванні процесів управління транспортними системами в умовах ризику. Сформовано математичну модель, яка у своєму складі містить цільову функцію технологічних витрат, пов'язаних зі всіма основними технологічними операціями, які виконуються на сортувальній станції: приймання, розформування, формування й відправлення поїздів, накопичення вагонів, обробка поїздів, що містять вагони з небезпечними вантажами, операції з місцевими вагонами. Крім того, модель також містить цільову функцію експозиції ризику, яка також потребує мінімізації з метою максимального зменшення ризиків виникнення аварій та їх наслідків під час оперування вагонами з небезпечними вантажами. Для оптимізації моделі необхідні певні умови, які відповідають технологічним особливостям роботи сортувальної станції та які були формалізовані у вигляді системи обмежень. Оптимізацію моделі запропоновано здійснювати з використанням методів багатоцільової оптимізації на основі генетичного алгоритму спеціального типу. **Результати.** Сформовано математичну модель, яка дозволяє в автоматизованому режимі будувати оперативний план роботи сортувальної станції з одночасним урахуванням двох критеріїв: експлуатаційні витрати й експозиція ризику. Модель було реалізовано у складі створеного програмного продукту, з використанням якого було проведено моделювання. **Наукова новизна.** Розроблена технологія інтелектуального планування, яка використовує методи багатоцільової оптимізації й дозволяє знаходити компромісне рішення, одночасно враховуючи як експлуатаційні витрати, так і експозиції ризику в умовах обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. **Практична значимість.** У ході моделювання було виявлено, що ефективність запропонованої технології інтелектуального планування на основі розробленої моделі порівняно з традиційною технологією планування становить близько 6,5 % за критерієм експлуатаційних витрат і близько 8 % за критерієм експозиції ризику.

Ключові слова: інтелектуальне управління сортувальними станціями; багатоцільова оптимізація; обробка вагонопотоків із небезпечними вантажами

doi: 10.15802/stp2018/145470 © Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

Вступ

Обсяги перевезень небезпечних вантажів (НВ) залізницями країн світу постійно збільшуються, але темпи їх зростання в Україні є ще більшими. Слід зазначити, що понад 70 % від загального часу обігу вантажні вагони, серед яких і вагони з НВ, перебувають на технічних станціях, зокрема на сортувальних станціях (СС).

Крім того, із вагонами з НВ на СС здійснюють технічні операції, під час виконання яких ризик виникнення аварій значно підвищується. Таким чином, СС є об'єктами підвищеної небезпеки, особливо враховуючи й те, що на них можуть одночасно обробляти вагони з різними типами НВ й у значних кількостях.

Підвищений рівень небезпеки під час оперування вагонами з НВ пов'язаний не лише з високим рівнем імовірності виникнення аварій, але й із масштабами їх можливих наслідків. СС зазвичай розташовані поблизу мегаполісів або великих населених і промислових пунктів. Крім того, саме вони є важливими об'єктами залізничної інфраструктури, вихід із ладу яких може значно ускладнити роботу всієї залізничної мережі.

Стан упровадження інформаційних технологій під час організації роботи СС на даному етапі не дозволяє відмовитись від традиційної технології оперативного управління. Етапи вироблення й прийняття управлінських рішень залишаються за керівним персоналом станцій. Такий підхід вимагає наявності значного досвіду під час виконання обов'язків маневрових диспетчерів. Проте він також не виключає ймовірності помилки, пов'язаної з людським фактором, особливо в умовах, коли робоча зміна триває протягом 12 годин.

Таким чином, неякісне оперативне планування може не лише безпосередньо впливати на ймовірність виникнення аварій із вагонами з НВ, але й призводити до збоїв і заторів на станції, наслідком яких може бути збільшення часу перебування вагонів із НВ на СС.

Отже, упровадження сучасних автоматизованих, зокрема інтелектуальних, систем управління надскладними в технологічному плані підсистемами залізничної системи, якими є сортувальні станції (СС), – це нагальна вимога часу.

Одним із головних завдань оперативного управління в системі вантажних залізничних перевезень є оперативне планування роботи СС, суть якого полягає не лише в підготовці виконання планових обсягів робіт із розформування, формування поїздів, обробки місцевих вагонів тощо, але й у забезпеченні виконання всіх цих операцій із мінімальними експлуатаційними витратами й високим рівнем технологічної безпеки. Тобто важливим моментом під час формування інтелектуальної системи є можливість управління ризиками.

Формалізація технологічних процесів сортувальних станцій із метою побудови систем управління є актуальною темою наукових досліджень. Як довів аналіз, основна активність дослідників спрямована на створення моделей на основі теорії масового обслуговування. Так, в [11] описаний програмний продукт, який використовують для симуляції роботи сортувальних станцій. Цей продукт, безумовно, є корисним на стадії проектування СС, однак у питаннях оперативного управління він може бути корисним лише для пошуку стратегій управління, якщо відомий характер вхідного поїздопотоку. Отже, оперативний план роботи СС, який відповідає конкретному набору вихідних даних, за допомогою таких моделей отримати неможливо. У [6] запропоновано математичну модель для вирішення задачі оптимізації процесу сортування вагонів, яка сформульована як задача лінійного програмування великої розмірності, а також зазначено спосіб її оптимізації на основі методу генерації стовпчиків. У [7] задача оптимального сортування вагонів представлена як задача фарбування інтервальних графів. У [9] запропоновані алгоритми багато-стадійного сортування вагонів на СС та оцінена їх обчислювальна складність, доведено, що задача багатостадійного сортування в загальному вигляді може бути зведена до задачі 3-задовільності з не всіма рівними елементами (англ. not all equal 3–satisfiability problem), яка є NP-повною з точки зору теорії обчислювальної складності. Загальним недоліком цих і переважної більшості інших публікацій є те, що вони концентрують увагу на процесі розформування-формування составів, який розглядають ізольовано від інших станційних процесів. Зо-

doi: 10.15802/stp2018/145470
© Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

всім не досліджена місцева робота станцій, яка може становити значну частку від усієї роботи, не розглянуті процеси обробки вагонів із НВ та ризики, що пов'язані з ними.

Мета

Основною метою роботи є розробка математичної моделі, яка дозволить побудувати інтелектуальну систему управління оперативною роботою СС і буде спроможна мінімізувати сумарні експлуатаційні витрати й одночасно забезпечити прийнятний рівень ризику під час розформування-формування поїздів, що включають вагони з НВ, а також під час виконання технологічних операцій з ними на території станції.

Методика

Як було зазначено в [1], для того щоб розроблений план оперативної роботи сортувальної станції під час оперування вагонами з небезпечними вантажами відповідав максимальному рівню безпеки, необхідно мінімізувати цільову функцію експозиції ризику:

$$\mathcal{E}(x)=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{W}\sum_{j=1}^{N_{\Pi}}\sum_{k=1}^{N_B}\left(\xi_{ij}H\left(t-t_{jx}^{\Pi}\right)\times\varsigma_{ik}H\left(t_{kx}^{B}-t\right)\times\gamma Q_i(t)\times L_i\right),$$

де x – вектор керівних змінних, який містить дані про порядок розгляду виконання операцій на СС; W – потужність множини вагонів, яку розглядають протягом планового періоду; N_{Π} – потужність множини поїздів, що прибувають на станцію протягом планового періоду; N_B – потужність множини поїздів, які відправляють зі станції протягом планового періоду; ξ_{ij} – функція, що приймає значення 1, якщо i-й вагон прибув на станцію у складі j-го поїзда, або значення 0 в іншому випадку; ζ_{ik} – функція, що приймає значення 1, якщо i-й вагон був відправлений зі станції у складі k-го поїзда, або значення 0 в іншому випадку; t – поточне значення часу у хвилинах; t_{jx}^{Π} – час прийняття на станцію j-го поїзда; t_{kx}^{B} – час відправлення зі станції k-го поїзда; $Q_i(t)$ – поточне значення функції ймовірності виникнення аварії з i-им вагоном, яке можна отримати за допомогою моделі на основі Баєсової мережі, що також включає нечіткі елементи [1]; γ – коефіцієнт нормалізації ймовірностей; T – часовий горизонт планування; H – функція Гевісайда, яка визначена наступним чином:

$$H(z)=\begin{cases}0 & ,z<0\\ 1 & ,z\geq 0\end{cases}.$$

Поточне значення функції ймовірності виникнення аварії визначають за допомогою Баєсової мережі [1]. Такий підхід дає можливість використовувати не лише статистичні дані, але й актуальну інформацію про безпосередній перебіг технологічних процесів і стан об'єктів на станції.

Однак первинною задачею оперативного планування роботи СС є забезпечення виконання завдань на плановий період у повному обсязі за мінімального рівня експлуатаційних витрат. Ураховуючи те, що досягнення мінімуму експозиції ризику є практично неможливим за одночасного досягнення мінімуму експлуатаційних витрат, тобто наявність певного рівня конфлікту цих двох критеріїв, наступним кроком у вирішенні задачі автоматизації побудови плану оперативної роботи СС є створення математичної моделі, яка б одночасно включала цільову функцію експозиції ризику та цільову функцію експлуатаційних витрат із подальшою їх сумісною мінімізацією засобами векторної оптимізації.

Сортувальна станція – складна система, у технологічний процес якої включені десятки операцій, необхідних для забезпечення виконання планових обсягів робіт із розформування, формування та обробки поїздів. Одними з найважливіших чинників, які впливають на процес планування, є технолого-економічні. Крім того, процес оперативного планування потребує інформації про час прибуття і склад поїздів [9, 5]. Таким чином, цільову функцію, що відповідає критерію експлуатаційних витрат, можна представити в наступному вигляді:

doi: 10.15802/stp2018/145470
© Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

$$C(x)=e_{в\cdot г}\left(\sum_{i=1}^{N_П}\left(T-t_{ix}^{П}\right)m_i^{П}+\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{q_i^{приб}}\left(T-t_{ij}^{приб}\right)m_{ij}-\sum_{i=1}^{N_B}\left(T-t_{ix}^{B}\right)m_i^{B}\right)+$$

$$+e_{л\cdot г}\left(\sum_{i=1}^{N_{ПЛ}}\left(T-t_i^{ПЛ}\right)+\sum_{i=1}^{N_П}\left(T-t_{ix}^{П}\right)-\sum_{i=1}^{N_B}\left(T-t_{ix}^{B}\right)-\sum_{i=1}^{N_{ВЛ}}\left(T-t_i^{ВЛ}\right)\right)+$$

$$+e_{п\cdot г}\sum_{i=1}^{N_П}\left(t_{ix}^{П}-t_i^{n}\right)+e_{л\cdot г}\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{q_i^{под}}\left(2a_i+b_i\cdot\min\left(m_{ijx},m_i^{\max}\right)+\tau_i^{відч}\right)+$$

$$+e_{л\cdot г}\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{q_i^{приб}}\left(2a_i+b_i\cdot m_{ij}+\tau_i^{прич}\right)+e_{п\cdot г}\left(\sum_{i=1}^{N_П}\left(t_{ix}^{пктоП}-t_{ix}^{П}\right)+\sum_{i=1}^{N_B}\left(t_{ix}^{B}-t_{ix}^{пктоВ}\right)\right),$$

де $e_{в\cdot г}$ – вартість однієї вагоно-години; $t_{ix}^{П}$ – момент часу приймання i-го поїзда на станції; $m_i^{П}$ – кількість вагонів в i-му поїзді, що прибуває до станції; t_{ix}^{B} – момент часу відправлення i-го поїзда зі станції; $m_i^{П}$ – кількість вагонів у i-му поїзді з множини поїздів, що прибувають; m_i^{B} – кількість вагонів у i-му поїзді з множини поїздів, які відправляються; $e_{л\cdot г}$ – вартість однієї локомотиво-години; $N_{ПЛ}$ – потужність множини локомотивів, що були спрямовані на сортувальну станцію в порядку виконання регулювальних заходів; $t_i^{ПЛ}$ – момент часу прибуття на станцію i-го локомотива в порядку виконання регулювальних заходів; $N_{ВЛ}$ – потужність множини локомотивів, які були відправлені зі станції у порядку виконання регулювальних заходів; $t_i^{ВЛ}$ – момент часу відправлення зі станції i-го локомотива в порядку виконання регулювальних заходів; $e_{п\cdot г}$ – вартість однієї поїздо-години, t_i^{n} – час прибуття i-го поїзда до вхідного світлофора станції; K – потужність множини під'їзних колій підприємств, які обслуговують маневрові локомотиви станції; $q_i^{под}$ – кількість подавань груп вагонів на вантажний фронт i-го підприємства в межах горизонту планування; a_i – константа формули Фролова, яка відповідає базовій частині часу виконання напіврейсу подавання-прибирання вагонів на вантажний фронт i-го підприємства, що залежить від довжини його під'їзної колії; b_i – константа формули Фролова, яка відповідає частині часу виконання напіврейсу подавання-прибирання вагонів на вантажний фронт i-го підприємства, що залежить від довжини його під'їзної колії та кількості вагонів під час подавання-прибирання; m_{ijx} – загальна кількість вагонів, які накопичені на виділеній колії станції для подавання на вантажний фронт i-го підприємства на момент початку j-ї подачі; $m_i^{\max}$ – максимально можлива кількість вагонів для подавання на вантажний фронт i-го підприємства, що обмежена його місткістю; $\tau_i^{відч}$ – час, який витрачений на відчеплення групи вагонів під час здійснення подавання на вантажний фронт i-го підприємства; $q_i^{приб}$ – кількість прибирань груп вагонів із вантажного фронту i-го підприємства в межах горизонту планування; m_{ij} – чисельність групи вагонів у j-му прибиранні з вантажного фронту i-го підприємства для їх подальшої переробки на станції; $\tau_i^{прич}$ – час, витрачений на причеплення групи вагонів під час здійснення їх прибирання з вантажного фронту i-го підприємства; $t_{ij}^{приб}$ – момент часу закінчення виконання операції j-го прибирання групи вагонів із вантажного фронту i-го підприємства; $t_{ix}^{пктоП}$ – час початку виконання комплексного огляду i-го поїзда в парку прийняття; $t_{ix}^{пктоВ}$ – час початку виконання комплексного огляду i-го поїзда в парку відправлення.

doi: 10.15802/stp2018/145470
© Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

Перший доданок цільової функції представляє витрати, пов'язані із загальним часом перебування вагонів на території СС. Він враховує вагоно-години простою кожного вагона, визначаючи загальний час його перебування на СС як різницю між моментом часу відправлення поїзда, у складі якого цей вагон залишає станцію, і моментом часу прибуття поїзда, у складі якого цей вагон потрапляє на станцію. Перший доданок включає три елементи. Перший елемент зі знаком плюс, він додає до загальної кількості вагоно-годин ті, що відповідають вагонам у складі поїздів у моменти їх прибуття на станцію за принципом мережевого числення. Другий елемент також зі знаком плюс, він додає до загальної кількості вагоно-годин ті, що відповідають вагонам, які накопичуються на колії станції для подальшої переробки після їх прибирання з вантажних фронтів тих підприємств, під'їзні колії яких примикають до станції, у момент завершення операції прибирання. Третій елемент зі знаком мінус, він віднімає від загальної кількості вагоно-годин ті, що відповідають вагонам у складі поїздів, які відправляють зі станції, у моменти їх відправлення за принципом мережевого числення. Таким чином, враховується не лише простій під накопиченням, але й загальний час перебування вагонів на станції, у тому числі й транзитних. Хоча для транзитного вагонопотоку без переробки, враховуючи незначний час простою на станції й невелику кількість відчеплених і причеплених вагонів, параметри вхідного й вихідного потоків є практично однаковими [12]. Але від якості управління залежить величина затримки між цими потоками, що пов'язана з інтенсивністю потоку обслуговування й безпосередньо впливає на величину технологічних витрат. Крім того, для сталого й надійного функціонування сортувальної станції необхідно забезпечити резерв переробної спроможності, який повинен складати 15–30 % [3], і на який позитивно вливає не лише зменшення простою вагонів під накопиченням, але й зменшення простоїв поїздів у приймальному парку й парку відправлення.

Перепростої составів у парку відправлення в очікуванні призначеної для них нитки графіка призводять також до додаткових витрат, що пов'язані із причепленням локомотивів. Навіть якщо час подачі локомотива є добре спланованим, і подачу здійснюють перед самим відправленням поїзда з урахуванням часу на опробування гальм локомотивною бригадою, локомотив може прибути на станцію набагато раніше, тому необхідно враховувати весь час його перебування на станції. Другий доданок представляє локомотиво-години простою, що відповідають загальному часу перебування локомотивів на станції. Це доданок із чотирьох елементів, які містяться в круглих дужках. Перші два елементи зі знаком плюс, вони відповідають за збільшення кількості локомотивів за рахунок тих, які були направлені на станцію в порядку виконання регулювальних заходів і тих, що прибувають до станції у складі поїздів. Третій і четвертий елементи зі знаком мінус, вони відповідають за зменшення кількості локомотивів за рахунок відправлених на інші станції за потреби виконання регулювальних заходів, а також тих, що залишають станцію у складі відправлених поїздів.

У ході реалізації певних варіантів плану оперативної роботи СС можливим є виникнення таких ситуацій, коли в момент підходу поїзда не буде вільних колій у приймальному парку. Випадки затримки поїздів на підходах до сортувальних станцій і біля вхідних сигналів можуть спричинити серйозні наслідки – затримку доставки вантажів. Порушення термінів доставки у свою чергу може стати підставою для стягнення із залізниці штрафних виплат на користь вантажовласника. Тому третій доданок, який представляє витрати на простій поїзда перед закритим сигналом вхідного світлофора, призначений для запобігання виникнення таких ситуацій.

До кожної сортувальної станції, розташованої поблизу великих міст, примикає декілька десятків під'їзних колій. Місцева робота становить значну частку від загального обсягу добової роботи СС. Основна частка витрат під час організації місцевої роботи на СС припадає на маневрові операції подавання-забирання вагонів на вантажні фронти підприємств. Ці операції потребують великих обсягів маневрових локомотиво-годин, що обумовлено не лише кількістю під'їзних колій, але й значними відстанями між підприємствами й сортувальними станціями. Відповідно четвертий і п'ятий доданки відображають витрати маневрових локомотиво-годин на виконання операцій подавання й забирання вагонів на вантажні фронти підприємств. За основу визначення часу виконання

doi: 10.15802/stp2018/145470
© Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

цих операцій взята формула Фролова, яка призначена для розрахунків нормативного часу напіврейсів під час здійснення маневрових переміщень груп вагонів.

Крім того, на керівні змінні, які входять до складу цільових функцій моделі, накладаються певні обмеження, обумовлені технологічними особливостями процесу обробки поїздів. У ході комплексного огляду поїзда, що перебуває у парку відправлення, працівник вагонної служби, який входить до складу комплексної бригади, разом із членами локомотивної бригади здійснює повне опробування пневматичних гальм. За результатами цієї операції видають довідку за формою ВУ-45. Простій такого поїзда в очікуванні нитки графіка після здійснення цієї операції не повинен перевищувати 30 хвилин. Цій умові відповідає наступне обмеження:

$$t_{ix}^{пктоВ} + \tau_{ix}^{пктоВ} \le t_{ix}^{В} - 30, \quad i = 1..N_B,$$

де $t_{ix}^{пктоВ}$ – час початку виконання комплексного огляду i-го поїзда в парку відправлення; $\tau_{ix}^{пктоВ}$ – тривалість огляду i-го поїзда.

План повинен бути коректним із точки зору збереження балансу локомотивів. Швидкість відправлення поїздів не повинна перевищувати швидкість прибуття локомотивів на станцію. Тобто для кожного моменту часу повинно виконуватись обмеження: кількість локомотивів, яка дорівнює кількості поїздів даного напрямку, що пройшли техогляд й очікують на відправлення, не повинна перевищувати кількості всіх наявних локомотивів для обслуговування цього напрямку. Цю наявну кількість можна обчислити як суму локомотивів, що прибули з поїздами даного напрямку до поточного моменту часу, і локомотивів, що прибули в порядку регулювальних заходів для обслуговування цього напрямку до поточного моменту часу, віднявши від неї кількість локомотивів, які на поточний момент часу були відправлені зі станції у складі поїздів цього напрямку. Це обмеження має наступний вигляд:

$$n_t^{kOB} \le \sum_{i=1}^{N_П^k} H\left(t - t_{ix}^{П}\right) + \sum_{i=1}^{N_{ПЛ}^k} H\left(t - t_i^{ПЛ}\right) - \sum_{i=1}^{N_B^k} H\left(t - t_{ix}^{B}\right), \quad \forall k, t,$$

де n_t^{kOB} – кількість локомотивів у складі поїздів k-го напрямку, які очікують нитки графіка в парку відправлення на момент часу t; $N_П^k$ – множина поїздів, що прибувають на станцію з k-го напрямку; $N_{ПЛ}^k$ – множина локомотивів, що прибувають на станцію в порядку виконання регулювальних заходів для обслуговування поїздів k-го напрямку; N_B^k – множина поїздів, що прибувають на станцію з k-го напрямку; t – поточний момент часу.

Оперативний план роботи СС повинен також дозволяти реалізувати таку послідовність і терміни виконання операцій, які забезпечать найшвидше відправлення вагонів, що містять вантажі з терміном доставки, який спливає; або вагонів із НВ. Ця вимога може бути виражена у вигляді наступного обмеження:

$$t_{wjx}^{B} - t_{wix}^{П} \le \tau_{\max}^{сп},$$

$$w = 1..P, \; j = 1..n_B, \; i = 1..n_П \quad ,$$

де t_{wjx}^{B} – момент часу відправлення w-го вагона, що належить до множини вагонів із терміном доставки, який спливає; або з НВ, у складі j-го поїзда зі станції; $t_{wix}^{П}$ – момент часу прибуття w-го вагона, що належить до множини вагонів із терміном доставки, який спливає, у складі i-го поїзда до сортувальної станції; $\tau_{\max}^{сп}$ – нормативний максимальний час перебування вагонів із терміном доставки, який спливає, або з НВ на даній сортувальній станції; P – потужність множини вагонів із терміном доставки, який спливає, або з НВ, що прибувають до сортувальної станції; n_B – потужність множини поїздів, які відправляють зі станції; $n_П$ – потужність множини поїздів, що прибувають до станції.

Під час здійснення подач вагонів на вантажні фронти підприємств, що з'єднані з сортувальною станцією під'їзними коліями, кількість вагонів у подачі визначається економічною доцільністю і може варіюватись, але вона не повинна перевищувати довжину вантажних фронтів:

$$m_{ij}^{под} \le l_j^{ВФ}, \quad \forall i, j, \quad i = 1..k_j^{под}, \quad j = 1..n^{ВФ} \quad ,$$

doi: 10.15802/stp2018/145470
© Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

де $m_{ij}^{под}$ – кількість вагонів у i-му подаванні до j-го вантажного фронту; $l_j^{ВФ}$ – довжина j-го вантажного фронту у вагонах; $k_j^{под}$ – кількість подавань до j-го вантажного фронту протягом планового періоду; $n^{ВФ}$ – кількість вантажних фронтів.

Оперативний план роботи СС повинен містити такий порядок здійснення операцій із прибуття, формування й відправлення поїздів, який забезпечить наявність вільного місця на коліях накопичення на момент початку кожного розформування. Тобто сумарна місткість колій, які виділені під накопичення составів будь якого напрямку, не повинна бути меншою ніж кількість вагонів, які на ній уже знаходяться, та кількості вагонів цього напрямку, які знаходяться в поїзді, на момент початку його розформування, що можна сформулювати у вигляді наступного обмеження:

$$m_{ij} + \sum_{k=1}^{q_j} m_k^{\tau_i} \le \sum_{k=1}^{q_j} l_{kj},$$

$$\forall i, j, \quad i = 1..N^{П}, \quad j = 1..n^{НФ},$$

де m_{ij} – кількість вагонів j-го напрямку в i-му поїзді, що надійшов у розформування; q_j – кількість колій у сортувальному парку, які виділені для накопичення вагонів j-го напрямку; $m_k^{\tau_i}$ – кількість вагонів j-го напрямку, що знаходяться на виділених коліях сортувального парку на момент початку розформування i-го поїзда; τ_i – момент початку розформування i-го поїзда; l_{kj} – довжина k-ої колії, що виділена для накопичення вагонів j-го напрямку; $n^{НФ}$ – кількість напрямків, на які здійснюють формування составів.

Це обмеження є необхідним для забезпечення утримання вектора керівних змінних у межах області, що відповідає множині варіантів плану, реалізація яких є можливою на практиці. Виникнення ситуацій із переповненням колій сортувального парку пов'язане не лише з помилковими діями оперативного персоналу станцій. Такі ситуації можуть бути наслідком різких коливань вагонопотоків унаслідок збурень, що пов'язані з перервами руху поїздів на дільницях в періоди дії технологічних «вікон» [2].

Обов'язковим також є виконання вимог, що їх висувають до складу сформованих поїздів Правила перевезень небезпечних вантажів. Наступне обмеження запобігає одночасній постановці до складу поїзда вагонів із вибуховими матеріалами та вагонів із вантажами, що належать до будь-якої із зазначених груп: небезпечні вантажі I класу, сильнодіючі отруйні речовини, скраплені, стиснуті або розчинені під тиском гази чи пристрої, що їх містять:

$$H\left(\sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij}^{BM}\right) + H\left(\sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij}^{K1} + \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij}^{CO} + \sum_{j=1}^{n_i} \omega_{ij}^{CГ}\right) \le 1,$$

$$\forall i, \; i \in N_B,$$

де n_i – кількість вагонів i-го поїзда; ω_{ij}^{BM} – ознака j-го вагона у складі i-го поїзда, яка приймає значення 1, якщо вантаж вагона становлять вибухові матеріали, або 0 в іншому випадку; ω_{ij}^{K1} – ознака j-го вагона у складі i-го поїзда, яка приймає значення 1, якщо у вагоні перевозять небезпечні вантажі I класу, в іншому випадку приймає значення 0; ω_{ij}^{CO} – ознака j-го вагона у складі i-го поїзда, яка приймає значення 1, якщо у вагоні перевозять небезпечні вантажі у вигляді сильнодіючих отруйних речовин, в іншому випадку приймає значення 0; $\omega_{ij}^{CГ}$ – ознака j-го вагона у складі i-го поїзда, який приймає значення 1, якщо у вагоні перевозять небезпечні вантажі у вигляді скраплених, стиснутих або розчинених під тиском газів і пристроїв, що їх містять, в іншому випадку приймає значення 0.

З огляду на те, що побудова раціонального оперативного плану роботи СС є складною комбінаторною задачею й цільові функції моделі не є гладкими, як механізм оптимізації запропоновано використання генетичних алгоритмів. Із метою формування процедури оптимізації доцільно використати спеціалізовані генетичні алгоритми, які розроблені спеціально для

doi: 10.15802/stp2018/145470
© Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

відшукання векторів множини Парето. До таких спеціалізованих алгоритмів, які демонструють найкращі результати, у першу чергу можна віднести генетичний алгоритм недомінованого ранжування з використанням механізму елітизму NSGA-II (англ. Fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm) [10]. Для звуження множини Парето й визначення єдиного оптимального компромісного рішення було використано метод граничної корисності [8].

Результати

Сформована математична модель та запропонований метод її оптимізації становлять основу технології інтелектуального планування для побудови оперативного плану роботи СС. На її основі було створено програмний продукт мовою Matlab, із використанням якого було проведено моделювання. На рис. 1 наведений фронт парето-оптимальних рішень, із яких за допомогою методу граничної корисності було виділене єдине компромісне рішення.

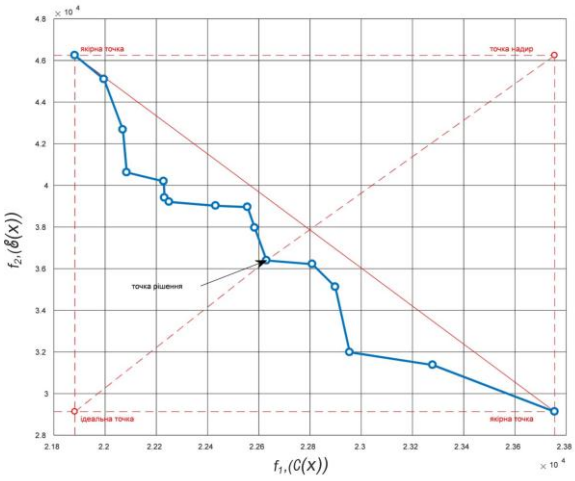


Рис. 1. Точка компромісного рішення, точки недомінованих рішень парето-фронту, ідеальна точка, точка надир та якірні точки

Fig. 1. The point of a compromise solution, the point of non-dominant decisions of the Pareto-front, the ideal point, nadir point and the anchor points

На рис. 2 наведений графічний вигляд оперативного плану роботи СС, який відповідає знайденому оптимальному вектору і який був побудований за допомогою створеного програмного продукту.

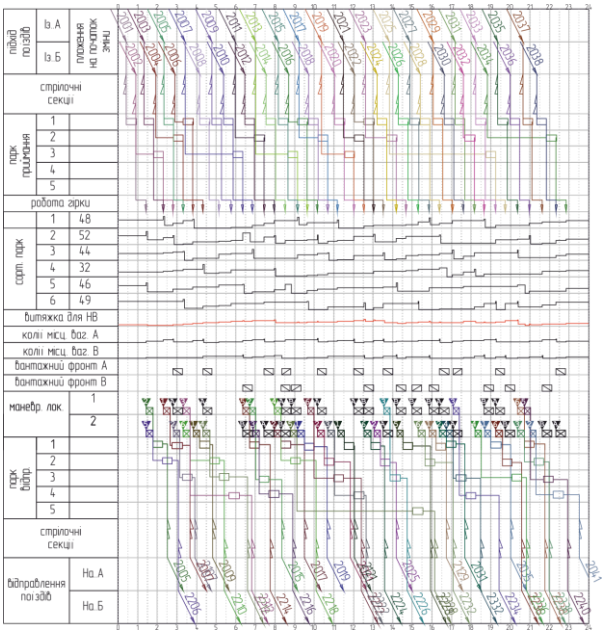


Рис. 2. План-графік оперативної роботи СС на 24-годинний період, отриманий в результаті оптимізації моделі

Fig. 2. Plan-chart of SS operational work for a 24-hour period, obtained as a result of the model optimization

За допомогою створеного програмного забезпечення був побудований також оперативний план на основі традиційної технології планування. Моделювання довело, що використання запропонованої оптимізаційної моделі дозволяє знизити експлуатаційні витрати на величину близько 6,5 % і величини експозиції ризику на 8 %.

Наукова новизна та практична значимість

У запропонованій технології інтелектуального планування вперше були застосовані принципи багатоцільової оптимізації під час управління оперативною роботою сортувальних станцій в умовах обробки вагонопотоків із небезпечними вантажами. У рамках цієї технології були інтегровані методи пошуку множини парето-оптимальних рішень, її звуження для визначення єдиного компромісного рішення й представлення цього рішення у вигляді плану-графіка роботи, який є зручним для оперативних керівників сортувальних станцій. Використання ефективного механізму оптимізації у вигляді багатоцільового генетичного алгоритму

doi: 10.15802/stp2018/145470
© Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

дозволяє одночасно оптимізувати всі станційні процеси, що у свою чергу дає можливість зменшити експлуатаційні витрати й підвищити рівень безпеки, пов'язаної з обробкою вагонів із небезпечними вантажами.

Висновки

Запропонована технологія інтелектуального планування, яка використовує методи моделювання на основі Баєсових мереж, методи багатоцільової оптимізації на основі генетичних алгоритмів, метод граничної корисності для звуження множини Парето й інші, дозволяють комплексно вирішувати задачу оперативного планування роботи сортувальної станції в умовах обробки вагонопотоків із НВ. Ця технологія на основі компромісного рішення дає можливість не лише знизити експлуатаційні витрати, пов'язані з технологічними процесами СС і вантажних залізничних перевезень, але й дозволяє зменшити величину експозиції, яка є інтегральним показником ризику, тобто кількісним параметром, який описує можливість виникнення аварій і настання негативних наслідків, пов'язаних з обробкою вагонів із НВ. Проведене моделювання довело доцільність упровадження інтелектуальної технології оперативного планування роботи СС із метою зниження експлуатаційних витрат і підвищення рівня безпеки протікання технологічних процесів на СС в умовах обробки вагонопотоків із НВ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бутько, Т. В. Формалізація технології переробки вагонопотоків із небезпечними вантажами на сортувальній станції на основі експозиції ризику / Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2018. – № 2. – С. 18–22.
2. Музикін, М. І. Вплив «вікон» на пропускну спроможність залізничного напрямку / М. І. Музикін, Г. І. Нестеренко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 3 (51). – С. 24–33. doi: 10.15802/stp2014/25797
3. Музикіна, С. І. Дослідження пропускної спроможності сортувальної станції / С. І. Музикіна, М. І. Музикін, Г. І. Нестеренко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 47–60. doi: 10.15802/stp2016/67289
4. Чехунов, Д. М. Формування моделі оцінки ризиків на сортувальній станції при оперуванні вагонами з небезпечними вантажами із використанням математичних апаратів нечіткої логіки та Байєсових мереж / Д. М. Чехунов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2018. – № 1. – С. 35–41.
5. Course Match: A Large-Scale Implementation of Approximate Competitive Equilibrium from Equal Incomes for Combinatorial Allocation / Eric B. Budish, Gerard Cachon, Judd B. Kessler, Abraham Othman // Operations research. – 2017. – Vol. 65. – Iss. 2. – P. 314–336. doi: 10.1287/opre.2016.1544
6. Khishtandar, S. Comparisons of some improving strategies on NSGA-II for multi-objective inventory system / S. Khishtandar, M. Zandieh // Journal of Industrial and Production Engineering. – 2017. – Vol. 34. – Iss. 1. – P. 61–69. doi: 10.1080/21681015.2016.1210681
7. Lin, E. YardSim: A rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the U.S. / E. Lin, C. Cheng // Proc. of the Winter Simulation Conference (WSC). – Austin, TX, USA, 2009. – P. 2532–2541. doi: 10.1109/wsc.2009.5429654
8. Multistage methods for freight train classification / R. Jacob, P. Márton, J. Maue, M. Nunkesser // Networks. – 2010. – Vol. 57. – Iss. 1. – P. 87–105. doi: 10.1002/net.20385
9. Optimal freight train classification using column generation / M. Bohlin, H. W. Dahms, M. H. Flier, S. Gestrelius // Proc. of the 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems. – Ljubljana, 2012. – P. 10–22.
10. Rail-road trans-shipment yards: layouts and rail operation [Електронний ресурс] / I. Belošević, M. Ivić, M. Kosijer, N. Pavlović, S. Aćimović // Horizons Series B. – 2016. – Vol. 3. – P. 559–569. – Режим доступу: https://goo.gl/jLUPw3 – Назва з екрана. – Перевірено : 16.10.2018.
11. Track Allocation in Freight-Train Classification with Mixed Tracks / M. Bohlin, H. Flier, J. Maue, M. Mihalák // Proc. of the 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems. – Saarbrücken, 2011. – P. 38–51.
12. Study of car traffic flow structure on arrival and departure at the marshalling yard X / G. I. Nesterenko, M. I. Muzykin, V. L. Horobets, S. I. Muzykina // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 85–99. doi: 10.15802/stp2016/60986

doi: 10.15802/stp2018/145470 © Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

Т. В. БУТЬКО[1*], В. Н. ПРОХОРОВ[2*], Д. Н. ЧЕХУНОВ[3*]

[1*]Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 89, эл. почта butko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1082-599X
[2*]Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, эл. почта vicmmx@gmail.com, ORCID 0000-0001-8963-6467
[3*]Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 88, эл. почта cdm2017@meta.ua, ORCID 0000-0002-1570-6351

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОРТИРОВОЧНЫМИ СТАНЦИЯМИ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Цель. В научной работе предполагается формализовать процесс построения плана оперативной работы сортировочной станции в условиях обработки вагонопотоков с опасными грузами. Разработанную математическую модель необходимо реализовать в виде системы интеллектуального планирования, которая позволит минимизировать как эксплуатационные затраты, так и технологические риски в процессе работы сортировочной станции. **Методика**. Проведен анализ современных подходов в моделировании процессов управления транспортными системами в условиях риска. Сформирована математическую модель, которая в своем составе содержит целевую функцию технологических расходов, связанных со всеми основными технологическими операциями, которые выполняются на сортировочной станции: прием, расформирование, формирование и отправление поездов, накопления вагонов, обработка поездов, содержащих вагоны с опасными грузами, операции с местными вагонами. Кроме того, модель также содержит целевую функцию экспозиции риска, которая также требует минимизации с целью максимального уменьшения рисков возникновения аварий и их последствий при оперировании вагонами с опасными грузами. Для оптимизации модели необходимы определенные условия, которые соответствуют технологическим особенностям работы сортировочной станции и которые были формализованы в виде системы ограничений. Оптимизацию модели предложено осуществлять с использованием методов многоцелевой оптимизации на основе генетического алгоритма специального типа. **Результаты.** Сформирована математическая модель, которая позволяет в автоматизированном режиме создать оперативный план работы сортировочной станции с одновременным учетом двух критериев: эксплуатационные расходы и экспозиция риска. Модель была реализована в составе созданного программного продукта, с использованием которого было проведено моделирование. **Научная новизна**. Разработана технология интеллектуального планирования, которая использует методы многоцелевой оптимизации и позволяет находить компромиссное решение, одновременно учитывая как эксплуатационные расходы, так и экспозиции риска в условиях обработки вагонопотоков с опасными грузами. **Практическая значимость.** В ходе моделирования было выявлено, что эффективность предложенной технологии интеллектуального планирования на основе разработанной модели по сравнению с традиционной технологией планирования составляет около 6,5 % по критерию эксплуатационных расходов и около 8 % по критерию экспозиции риска.

Ключевые слова: интеллектуальное управление сортировочными станциями; многоцелевая оптимизация; обработка вагонопотоков с опасными грузами

T. V. BUTKO[1*], V. M. PROKHOROV[2*], D. M. CHEKHUNOV[3*]

[1*]Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 89, e-mail butko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-1082-599X
[2*]Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, , 61050, tel. +38 (057) 730 10 88, e-mail vicmmx@gmail.com, ORCID 0000-0001-8963-6467
[3*]Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 88, e-mail cdm2017@meta.ua, ORCID 0000-0002-1570-6351

doi: 10.15802/stp2018/145470 © Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, №5 (77)

INTELLIGENT CONTROL OF MARSHALLING YARDS AT TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS BASED ON MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION

Purpose. The scientific paper involves formalizing the process of building a plan for the operational work of the marshalling yard in the conditions of processing carloads with dangerous goods. The developed mathematical model is implemented in the form of an intelligent planning system that will minimize both operational costs and technological risks during the work of the marshalling yard. **Methodology.** Based on the analysis of modern approaches to the management of transport systems under risk conditions, a mathematical model has been formed that includes the objective function of technological costs associated with all the main technological operations that are performed at the marshalling yard: reception, disbanding, form and departure of trains, accumulation of cars, processing of trains containing cars with dangerous goods, operations with local cars. In addition, the model also contains an objective function of the risk exposure, which also requires minimization in order to minimize the risk of accidents and their consequences when operating cars with dangerous goods. The model should be optimized under certain conditions that correspond to the technological features of the marshalling yard and which were formalized as a system of constraints. Optimization of the model is proposed to be carried out using methods of multiobjective optimization based on a genetic algorithm of a special type. **Findings.** A mathematical model is created that allows in an automated mode to build an operational plan for a marshalling yard operation with simultaneous consideration of two criteria: operational costs and risk exposure. The model was implemented as part of the created software product with the use of which the simulation was carried out. **Originality.** An intelligent planning technology has been developed that uses multiobjective optimization methods and allows finding a compromise solution while taking into account both the criterion of operational expenses and the risk exposure one in the conditions of handling carloads with dangerous goods. **Practical value.** During the simulation it was revealed that the effectiveness of the proposed technology of intelligent planning based on the developed model in comparison with the traditional planning technology is about 6.5% by the criterion of operating costs and about 8% by the criterion of the risk exposure.

Keywords: marshalling yards intelligent control; multiobjective optimization; processing of cars flows with dangerous goods

REFERENCES

1. Butko, T. V., Prokhorov, V. M., & Chekhunov, D. M. (2018). Formalizatsiia tekhnolohii pererobky vahonopotokiv iz nebezpechnymy vantazhamy na sortuvalnii stantsii na osnovi ekspozytsii ryzyku *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti, (2)*, 18-22. (in Ukranian)
2. Muzykin, M. I., & Nesterenko, G. I. (2014). Influence of maintenance windows on the working capacity of railway route. *Science and Transport Progress, 3(51),* 24-33. doi: 10.15802/stp2014/25797 (in Ukranian)
3. Muzykina, S. I., Muzykin, M. I., & Nesterenko, G. I. (2016). Study of working capacity of the marshalling yard. *Science and Transport Progress, 2(62),* 47-60. doi: 10.15802/stp2016/67289 (in Ukranian)
4. Chekhunov, D. M. (2018). Formuvannia modeli otsinky ryzykiv na sortuvalnii stantsii pry operuvanni vahonamy z nebezpechnymy vantazhamy iz vykorystanniam matematychnykh aparativ nechitkoi lohiky ta Baiiesovykh merezh. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti, (1),* 35-41. (in Ukranian)
5. Budish, E. B., Cachon, G., Kessler, J. B., & Othman, A. (2017). Course Match: A Large-Scale Implementation of Approximate Competitive Equilibrium from Equal Incomes for Combinatorial Allocation. *Operations Research, 65(2),* 314-336. doi: 10.1287/opre.2016.1544 (in English)
6. Khishtandar, S., & Zandieh, M. (2017). Comparisons of some improving strategies on NSGA-II for multiobjective inventory system. *Journal of Industrial and Production Engineering, 34(1),* 61-69. doi: 10.1080/21681015.2016.1210681 (in English)
7. Lin, E., & Cheng, C. (2009). YardSim: A rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the U.S. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 2532-2541). Austin. doi: 10.1109/wsc.2009.5429654 (in English)
8. Jacob, R., Márton, P., Maue, J., & Nunkesser, M. (2010). Multistage methods for freight train classifi-cation. *Networks, 57(1),* 87-105. doi: 10.1002/net.20385 (in English)
9. Bohlin, M., Dahms, H. W., Flier, M. H., & Gestrelius, S. (2012). Optimal freight train classification using column generation. *Proc. of the 12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems* (pp. 10-22). Ljubljana. (in English)

doi: 10.15802/stp2018/145470 © Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

10. Belošević, I., Ivić, M., Kosijer, M., Pavlović, N., & Aćimović, S. (2016). Railroad transshipment yards: lay-outs and rail operation. *Horizons Series B. 3,* 559-569. Retrived from https://goo.gl/jLUPw3 (in English)
11. Bohlin, M., Flier, H., Maue, J., & Mihalák, M. (2011). Track allocation in freight-train classification with mixed tracks. *Proc. of the 11th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Mo-delling, Optimization, and Systems* (pp. 38-51). Saarbrücken. (in English)
12. Nesterenko, G. I., Muzykin, M. I., Horobets, V. L., & Muzykina, S. I. (2016). Study of car traffic flow structure on arrival and departure at the marshalling yard x. *Science and Transport Progress, 1(61),* 85-99. doi: 10.15802/stp2016/60986 (in English)

Надійшла до редколегії: 21.06.2018
Прийнята до друку: 05.10.2018

doi: 10.15802/stp2018/145470 © Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

УДК 656. 222. 3

В. Я. НЕГРЕЙ[1*], К. М. ШКУРИН[2*]

[1*]Каф. «Транспортные узлы», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246022, тел. +37 (529) 625 75 87, эл. почта vjanegrey@gmail.com, ORCID 0000-0002-1857-4980
[2*]УП «Минское отделение Белорусской железной дороги», ул. Свердлова, 28, Минск, Республика Беларусь, 220030, тел. +37 (529) 238 88 87, эл. почта nodntiv1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2800-433X

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГРУППНЫХ ПОЕЗДОВ

Цель. В данной работе исследуется возможность использования критерия, позволяющего учитывать расходы, связанные с нахождением локомотивов и вагонов в движении, при разработке плана формирования одногруппных поездов. **Методика.** Проанализированы существующие методы разработки плана формирования поездов и основные направления его оптимизации на современном этапе. Разработаны формулы для расчета критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах. **Результаты.** На примере ряда железнодорожных участков Белорусской железной дороги было исследовано наличие зависимости между участковой скоростью поезда и его категорией. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что в общем случае участковая скорость сквозных поездов выше, чем у участковых поездов. При этом интенсивность движения и пропускная способность участка оказывают влияние на разницу между участковыми скоростями поездов различных категорий. На примере железнодорожного направления, на котором расположены четыре сортировочные станции, выполнена разработка плана формирования одногруппных поездов с использованием традиционных методов и с применением предлагаемого критерия. Показано, что использование предлагаемой методики разработки плана формирования поездов может обеспечить значительную экономию эксплуатационных затрат за счет ускорения пропуска вагонопотоков по железнодорожным участкам. **Научная новизна.** В работе предложено использовать при разработке плана формирования поездов новый дополнительный параметр – критерий экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах. Показано, что применение указанного критерия позволяет обосновать выделение в самостоятельные назначения отдельных струй вагонопотоков, которые при использовании традиционных методов расчета плана формирования были бы признаны экономически невыгодными. Авторы выполнили анализ влияния таких факторов, как состав поезда, длина участка и мощность струи вагонопотока на экономию затрат при использовании предлагаемого параметра. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при разработке плана формирования поездов, что обеспечит экономию эксплуатационных затрат, связанных с нахождением вагонов и локомотивов в движении.

Ключевые слова: план формирования поездов; струя вагонопотока; участковая скорость; экономия затрат; участковые поезда; сквозные поезда

Введение

На протяжении всей истории развития железнодорожного транспорта одной из важнейших задач, стоящих перед железнодорожниками, было сокращение эксплуатационных расходов путем повышения эффективности использования транспортной инфраструктуры и подвижного состава [6, 10, 15].

Совершенствование плана формирования поездов (далее – ПФП) является направлением решения данной задачи, способным обеспечить достижение значительных результатов при минимальных капитальных вложениях [3, 4, 7]. Так, оптимизация ПФП способна обеспечить ускорение оборота вагонов и сокращение времени их нахождения на технических станциях, повысить производительность локомотивов и грузовых вагонов за счет правильного распределения сортировочной работы между станциями [11, 13].

Основные методы расчета оптимального ПФП, принципы которых применяются для решения данной задачи и в настоящее время, были разработаны еще в 40-е–60-е годы XX века [1, 12].

Так, в 1940-е годы проф. А. П. Петров предложил применение при разработке ПФП *метода абсолютного расчета*. Использование данного

doi: 10.15802/stp2018/147718
© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

метода предусматривает выполнение расчетов для всех потенциально реализуемых вариантов плана формирования и оценку затрат вагоно-часов на накопление и переработку вагонов для каждого из них. В то же время недостатком метода абсолютного расчета является необходимость выполнения большого объема вычислений при разработке плана формирования для направлений, на которых расположено более чем 5–6 сортировочных станций.

Альтернативный подход к разработке ПФП применяют в аналитических методах, предусматривающих постепенное нахождение плана формирования, близкого к оптимальному, путем выполнения расчетов в несколько итераций. Наибольшее распространение среди таких методов получил *метод совмещенных аналитических сопоставлений*, автором которого является проф. К. А. Бернгард, усовершенствовавший разработанный ранее метод аналитических сопоставлений проф. И. И. Васильева. Метод совмещенных аналитических сопоставлений основывается на построении графика назначений струй вагонопотоков и его последующей поэтапной корректировке путем выделения в оптимальный план формирования назначений, обеспечивающих максимальную экономию вагоно-часов, затрачиваемых на накопление и переработку вагонов.

Разработанный к. т. н. А. И. Поповым *метод направленного перебора вариантов* позволяет сократить объем вычислений при выборе оптимального варианта ПФП. При использовании данного метода множество вариантов плана формирования представляют в виде графа. На его осях помещают вершины, номера которых соответствуют номерам сквозных струй. Вершины на соседних осях графа соединяют дугами, указывающими на их принадлежность к одному варианту ПФП. Расчет производят последовательно, начиная с верхней ветви графа и слева направо; при этом затраты вагоно-часов при переходе от вершины к вершине по дуге графа увеличиваются с учетом затрат на накопление и уменьшаются с учетом экономии от проследования попутных станций без переработки. Если при переходе от одной вершины к другой происходит рост затрат приведенных вагоно-часов, дальнейшие расчеты по данной ветви прекращают, что позволяет исключить заведомо неконкурентные варианты ПФП.

Расчет сетевого плана формирования производят на ЭВМ по алгоритму *метода улучшения плана*, разработанного проф. С. В. Дуваляном. Суть этого метода заключается в постепенном улучшении ПФП путем перехода от одного множества назначений к другому за счет дополнения его другими назначениями. Этот процесс начинается с множества обязательных назначений и заканчивается тогда, когда в ПФП оказываются включенными все назначения, которые уменьшают суммарные приведенные затраты на накопление и переработку транзитных вагонов.

Анализ современных исследований в области совершенствования системы организации вагонопотоков показывает, что особое внимание на текущем этапе уделяют двум направлениям: развитие математических моделей функционирования транспортных систем [2, 9, 14, 17, 20, 21] и оптимизация процесса формирования (расформирования) составов на технических станциях [18, 19, 23].

Так, работы М. Болнна и С. Гестрелиус посвящены разработке математической модели оптимизации сортировочного процесса, позволяющей увеличить горизонт планирования работы технических станций за счет автоматизированной обработки данных о вагонопотоках, поступающих на близлежащие сортировочные станции [20]. Исследования Chongshuang Chen и других ученых Шанхайского университета транспорта направлены на решение проблемы алгоритмизации формирования групповых поездов [18].

Еще одним важным направлением исследований в области организации перевозочного процесса, осуществляемых учеными КНР, является сокращение эксплуатационных затрат, связанных с нахождением подвижного состава на сортировочных станциях (работы Jie Xiao о минимизации затрат, связанных с формированием многогруппных поездов [22]).

Таким образом, можно утверждать, что в традиционных методах разработки оптимального ПФП в качестве критерия оценки целесообразности установления назначений грузовых поездов используют критерий минимизации вагоно-часов, затрачиваемых на накопление и переработку вагонов [1, 5, 12]. В то же время применяемые методики не учитывают расходы, связанные с нахождением вагонов и локомоти-

doi: 10.15802/stp2018/147718
© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

вов в движении [8]. При этом в исследованиях, посвященных совершенствованию процесса разработки ПФП, основное внимание уделяют сокращению времени нахождения вагонов на технических станциях.

Анализ отечественного и зарубежного опыта подтверждает актуальность дальнейших исследований, направленных на совершенствование системы организации вагонопотоков и минимизацию эксплуатационных затрат на основе применения дополнительных критериев при выборе оптимального варианта плана формирования поездов.

Цель

Основными целями данной статьи являются разработка метода, позволяющего при расчете плана формирования одногруппных поездов учитывать расходы, связанные с нахождением локомотивов и вагонов в движении, а также исследование факторов, оказывающих влияние на экономию затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах.

Методика

Для оценки целесообразности использования при разработке ПФП критерия минимизации затрат, связанных с нахождением вагонов и локомотивов в движении, рассмотрим направление A–D, на котором расположены 4 сортировочные станции. В рассматриваемом примере расстояния между станциями равны и составляют 120 км; экономия при проследовании сортировочной станции без переработки $T_{эк}$ (или затраты на переработку $T_{пер}$) составляет 5,0 ваг.ч; затраты, связанные с накоплением состава поезда *cm* – 600 ваг.ч.

Рассмотрим случай, когда мощность всех струй вагонопотока равна и составляет 50 вагонов. Сведения о направлении A–D приведены на рис. 1.

Для определения оптимального ПФП используем метод абсолютного расчета, предусматривающий выполнение вычислений для всех практически осуществимых вариантов плана формирования. В рассматриваемом примере является возможным выделение трех сквозных струй (A–D, A–C, B–D) вагонопотока в самостоятельные назначения, что означает необходимость расчета затрат для восьми вариантов плана формирования. На рис. 2 приведен граф, на котором отмечены возможные варианты плана формирования поездов.

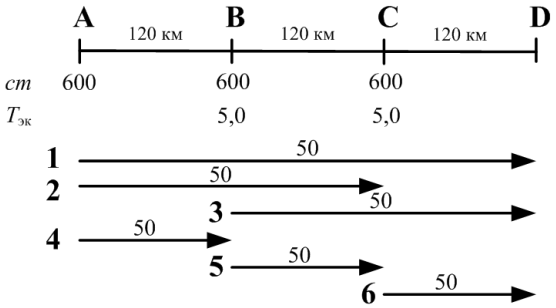


Рис. 1. Характеристика направления A–D

Fig. 1. Characteristics of the direction A–D

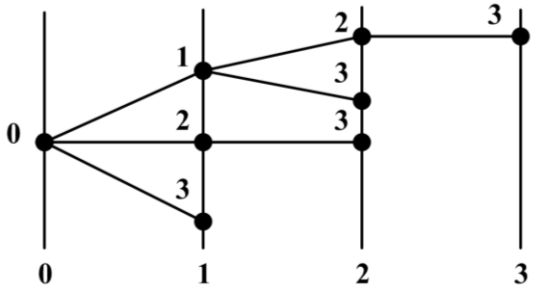


Рис. 2. Граф вариантов ПФП для направления A–D

Fig. 2. Options graph of TFP (train formation plan) for the direction A–D

Рассмотрим каждый из показанных выше вариантов и сравним затраты, связанные с накоплением составов поездов *cm* и с переработкой вагонов на сортировочных станциях $nT_{пер}$.

Так, при реализации варианта ПФП, предусматривающего следование всех вагонов в участковых поездах (вариант «0»), затраты на накопление составов поездов на участки A–B, B–C, C–D составят

$$\sum cm = 3 \cdot 600 = 1800 \text{ ваг.ч},$$

затраты, связанные с переработкой вагонов на сортировочных станциях:

$$\sum nT_{пер} = (50 + 50 + 50 + 50) \cdot 5{,}0 = 1000 \text{ ваг.ч},$$

общие затраты:

$$B_{общ} = 1800 + 1000 = 2800 \text{ ваг.ч}.$$

Результаты аналогичных расчетов для всех возможных вариантов плана формирования сведены в табл. 1.

doi: 10.15802/stp2018/147718
© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Таблица 1

Сравнение вариантов ПФП для направления A–D

Table 1

Option comparison of the TFP for the direction A–D

Вариант ПФП	$\sum cm$, ваг.ч	$\sum nT_{пер}$, ваг.ч	$B_{общ}$, ваг.ч
0	1 800	1 000	2 800
0–1	2 400	500	2 900
0–1–2	3 000	250	3 250
0–1–2–3	3 600	0	3 600
0–1–3	3 000	250	3 250
0–2	2 400	750	3 150
0–2–3	3 000	500	3 500
0–3	2 400	750	3 150

Таким образом, согласно расчетам, выполненным с использованием традиционных методов, наименьшие затраты можно обеспечить при доставке всех вагонов на станции назначения участковыми поездами.

Результаты исследования, выполненного на Белорусской железной дороге в 2015–2017 гг., показали, что даже в пределах одного железнодорожного направления участковые скорости грузовых поездов могут значительно отличаться в зависимости от их категории [16].

В табл. 2 представлены сведения об участковой скорости грузовых поездов различных категорий на двух направлениях Белорусской железной дороги (однопутном и двухпутном).

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что средняя скорость участковых поездов на рассмотренных направлениях значительно уступает средней скорости движения сквозных поездов. На однопутном направлении Кричев–Слуцк разница между участковыми скоростями поездов указанных категорий в зависимости от направления следования составляет 2–3 %, на двухпутном направлении Минск–Орша – 11–18 %.

Графическое сравнение участковых скоростей поездов различных категорий показано на рис. 3.

Таблица 2

Сравнение участковых скоростей различных категорий грузовых поездов

Table 2

Comparison of service speeds of various categories of freight trains

Категория поездов	$v_{уч}$, км/ч			
	Направление Кричев–Слуцк (однопутное)		Направление Минск–Орша (двухпутное)	
	Четн.	Не-четн.	Четн.	Не-четн.
Сквозные	49,3	47,1	53,2	54,7
Участковые	48,0	45,7	45,0	49,2
Вывозные	41,9	41,7	27,9	24,5
Сборные	-	-	26,5	36,3
ВСЕГО	45,6	45,2	51,1	51,0

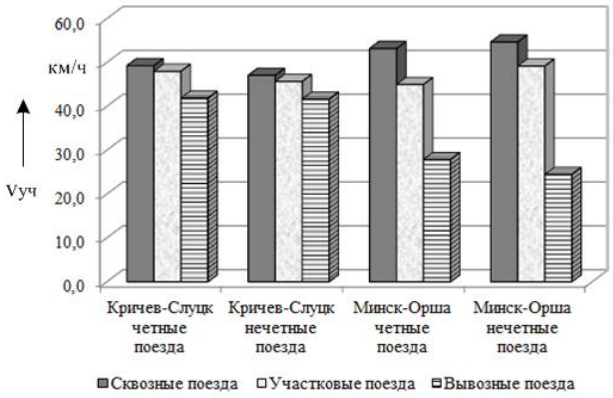


Рис. 3. Сравнение участковых скоростей различных категорий грузовых поездов

Fig. 3. Comparison of service speeds of various categories of freight trains

Тот факт, что разница между скоростями сквозных и участковых поездов на направлении Минск–Орша существенно превышает аналогичный показатель на направлении Кричев–Слуцк, объясняется значительно большими размерами движения на двухпутном направлении. Так, ежесуточные размеры движения на участках направления Кричев–Слуцк составляют 17–20 пар поездов, направления Минск–Орша – 70–100 пар поездов.

Влияние размеров движения на разницу между скоростями сквозных и участковых по-

doi: 10.15802/stp2018/147718

© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

ездов подтверждается и при анализе участковых скоростей на отдельных участках одного направления. Например, на участке Осиповичи–Слуцк, имеющем наибольшие размеры движения на направлении Кричев–Слуцк, разница между скоростями сквозных и участковых поездов достигает 8 %, тогда как на участке Осиповичи–Могилев она составляет менее 1 %.

Таким образом, проведенные исследования доказали наличие взаимосвязи между категорией поезда и его участковой скоростью. В связи с вышеизложенным, при разработке плана формирования целесообразным является применение дополнительного параметра – *критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах*. В этом случае оптимальный план формирования может отличаться от плана формирования, разработанного с использованием традиционных методов.

Используя данные о длине участков направления A–D, рассчитаем среднее время прослеживания каждого из участков участковым поездом $t_{уч}$ и сквозным поездом $t_{скв}$. Экономию времени при следовании вагонов и локомотивов в составе сквозных поездов $\Delta t_{скв}$ будем определять по формуле:

$$\Delta t_{скв} = t_{уч} - t_{скв} = \frac{L_{уч}}{v_{уч}} - \frac{L_{уч}}{v_{скв}}. \qquad (1)$$

Приходящуюся на один вагон экономию затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах R в приведенных вагоно-часах (далее – пр. ваг.ч) можно вычислить при помощи формулы:

$$R = \Delta t_{скв} \cdot k_{лок} \cdot \frac{1}{m} + \Delta t_{скв} = \Delta t_{скв} \cdot (\frac{k_{лок}}{m} + 1), \quad (2)$$

где $k_{лок}$ – коэффициент приведения локомотиво-часов к вагоно-часам; m – средний состав следующего по участку поезда, вагонов.

Определим значение параметра R при пропуске вагонов и локомотивов в сквозных поездах по различным участкам направления A–D.

Для расчетов принимаем, что средняя скорость участковых поездов $v_{уч}$ составляет 45,0 км/ч, а скорость сквозных поездов $v_{скв}$ превышает её на 5,0 % и составляет 47,25 км/ч. Средний состав поезда, следующего по направлению A–D, принимаем равным 60 вагонам.

Необходимо отметить, что эксплуатационные расходы, связанные с нахождением подвижного состава в движении, могут значительно превышать затраты на накопление вагонов [8]. Так, в соответствии с действующими на Белорусской железной дороге Методическими рекомендациями по расчету экономических параметров, позволяющих оценить эксплуатационные расходы по технологическим операциям услуг железнодорожного транспорта общего пользования, стоимость 1 часа движения локомотива в тепловозной тяге эквивалентна стоимости 375 вагоно-часов (далее – ваг.ч), в электровозной – 336 ваг.ч.

Для того, чтобы привести локомотиво-часы экономии к вагоно-часам, учитываем, что на рассматриваемом направлении применяют тепловозную тягу. Коэффициент приведения $k_{лок}$ в этом случае составит 375.

Результаты расчета параметра R сведены в табл. 3.

Таблица 3

Определение параметра *R* для различных участков направления A–D

Table 3

Determination of the *R* parameter for different sections of the direction A–D

Показатель	Участок		
	A–C	B–D	A–D
Длина участка, км	240	240	360
$t_{уч}$, ч	5,33	5,33	8,00
$t_{скв}$, ч	5,08	5,08	7,62
$\Delta t_{скв}$, ч	0,25	0,25	0,38
R, пр. ваг.ч	1,84	1,84	2,76

Для струи вагонопотока мощностью n экономия затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах Rn составит:

$$Rn = \Delta t_{скв} \cdot (\frac{k_{лок}}{m} + 1) \cdot n. \qquad (3)$$

Анализ формулы (3) показывает, что значение параметра Rn возрастает при увеличении мощности струи вагонопотока, а также при увеличении длины участка, по которому следует поезд. В то же время значение параметра

doi: 10.15802/stp2018/147718

© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

снижается при увеличении среднего состава обращающихся поездов, поскольку в этом случае для организации пропуска вагонопотока по участку потребуется меньшее число локомотивов.

Проиллюстрируем эти выводы на примере струи вагонопотока A–D.

Данные о влиянии изменения среднего состава поезда *m* на значение параметра *Rn* сведены в табл. 4, и по ним построен рис. 4.

Таблица 4

Определение влияния изменения среднего состава поезда *m* на значение параметра *Rn*

Table 4

Determination of the influence of changing the average train composition *m* on the value of the parameter *Rn*

m, ваг.	*R*, пр. ваг.ч	*Rn*, пр. ваг.ч
40	3,95	198
48	3,36	168
56	2,93	147
64	2,61	131
72	2,37	118
80	2,17	108

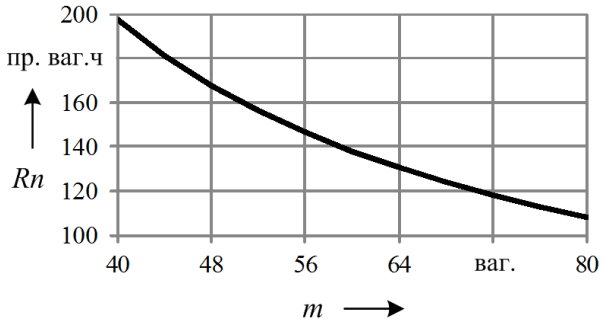


Рис. 4. Влияние изменения среднего состава поезда *m* на значение параметра *Rn*

Fig. 4 The influence of changing the average train composition *m* on the value of the parameter *Rn*

Рис. 4 показывает, что значение параметра *Rn* обратно пропорционально среднему составу грузового поезда, следующего по рассматриваемому участку.

В табл. 5 приведены результаты расчета влияния изменения мощности струи вагонопотока *n* на величину параметра *Rn*, и по ним построен график, приведенный на рис. 5.

Таблица 5

Определение влияния изменения мощности струи вагонопотока n на значение параметра *Rn*

Table 5

Determination of the influence of changing the car-stream power *n* on the value of the parameter *Rn*

n, ваг.	*R*, пр. ваг.ч	*Rn*, пр. ваг.ч
50	2,76	138
70		193
90		249
110		304
130		359
150		414

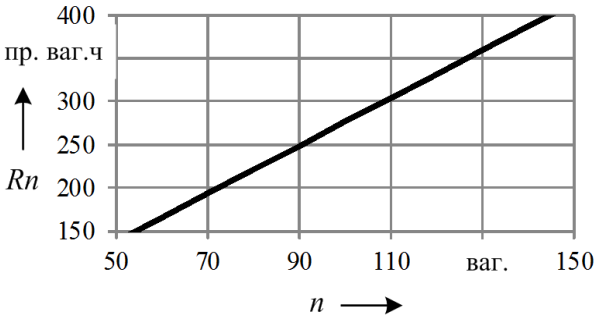


Рис. 5. Влияние изменения мощности струи вагонопотока *n* на значение параметра *Rn*

Fig. 5. The influence of changing the car-stream power *n* for the value of the parameter *Rn*

Из рис. 5 следует, что при увеличении мощности струи вагонопотока экономия затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах возрастает линейно.

Результаты расчета влияния длины участка $l_{уч}$ на величину параметра *Rn* приведены в табл. 6, и по ним построен рис. 6.

doi: 10.15802/stp2018/147718

© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Таблица 6

Определение влияния длины участка $l_{уч}$ на значение параметра *Rn*

Table 6

Determination of the influence of the section length l_{sec} on the value of the parameter *Rn*

$l_{уч}$, км	$\Delta t_{скв}$, ч	*R*, пр. ваг.ч	*Rn*, пр. ваг.ч
60	0,06	0,46	23
120	0,13	0,92	46
180	0,19	1,38	69
240	0,25	1,84	92
300	0,32	2,30	115
360	0,38	2,76	138

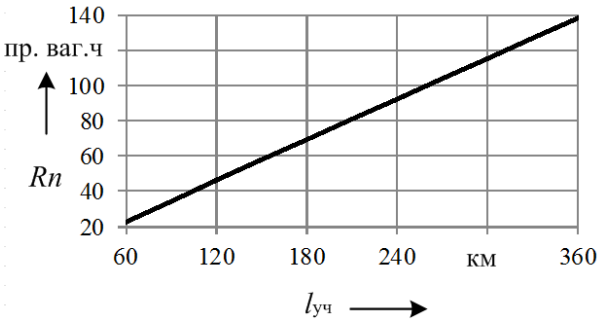


Рис. 6. Влияние длины участка $l_{уч}$ на величину параметра *Rn*

Fig. 6. The influence of the section length l_{sec} on the value of the parameter *Rn*

Рис. 6 показывает, что при увеличении длины участка экономия затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах *Rn* возрастает.

Результаты

Используем параметр *Rn* при расчете оптимального плана формирования поездов для направления A–D.

Для варианта ПФП «0–1» параметр *Rn* будет равен

$$Rn = \left(\frac{360}{45} - \frac{360}{47,25}\right) \cdot \left(\frac{375}{60} + 1\right) \cdot 50 = 138 \text{ пр. ваг.ч.}$$

Результаты расчетов параметра *Rn*, а также общих затрат $B_{общ}$ для всех вариантов плана формирования сведены в табл. 7.

Таблица 7

Сравнение вариантов ПФП для направления A–D

Table 7

Comparison of the options of TFP for the direction A–D

Вариант	При исп. традиционного метода расчета	При исп. параметра *Rn*	
	$B_{общ}$, ваг.ч	*Rn*, пр. ваг.ч	$B_{общ}$, пр. ваг.ч
0	2 800	0	2 800
0–1	2 900	138	2 762
0–1–2	3 250	230	3 020
0–1–2–3	3 600	322	3 278
0–1–3	3 250	230	3 020
0–2	3 150	92	3 058
0–2–3	3 500	184	3 316
0–3	3 150	92	3 058

Данные, приведенные в табл. 7, показывают, что, в то время как при использовании традиционного метода расчета оптимальным должен быть признан вариант ПФП «0», при котором доставку всех вагонов на станции назначения осуществляют участковые поезда, применение предлагаемой методики позволяет доказать, что выделение в самостоятельное назначение струи вагонопотока № 1 позволит снизить эксплуатационные затраты.

Для оценки эффекта от использования при разработке ПФП критерия экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах выполним аналогичные расчеты в случаях, если струи вагонопотока имеют большую мощность *n*, а также при большей разнице между скоростями участковых и сквозных поездов Δv. В табл. 8 и 9 приведена оценка эксплуатационных затрат при реализации оптимальных вариантов ПФП, рассчитанных с использованием традиционного и предлагаемого методов соответственно. В табл. 9 также показана экономия приведенных вагоно-часов $\Delta B_{общ}$, получаемая при использовании предлагаемого метода расчёта.

doi: 10.15802/stp2018/147718

© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Таблица 8

Эксплуатационные затраты $B_{общ}$ при выборе оптимального ПФП с использованием традиционного метода

Table 8

Operating costs B_{gen} when choosing the optimal TFP using the traditional method

Δv, %	n, ваг.	Оптимальный вариант	$B_{общ}$, пр. ваг.ч
	50	0	2 800
5	75	0–1	2 943
	100	0–1	3 124
	50	0	2 800
10	75	0–1	2 755
	100	0–1	2 873
	50	0	2 800
15	75	0–1	2 583
	100	0–1	2 643

Таблица 9

Эксплуатационные затраты Вобщ при выборе оптимального ПФП с использованием предлагаемого метода

Table 9

Operating costs B_{gen} when choosing the optimal TFP using the proposed method

Δv, %	n, ваг.	Оптимальный вариант	$B_{общ}$, пр. ваг.ч	$\Delta B_{общ}$, пр. ваг.ч
	50	0–1	2 762	38
5	75	0–1	2 943	0
	100	0–1–2–3	2 956	168
	50	0–1	2 636	164
10	75	0–1–2–3	2 677	78
	100	0–1–2–3	2 370	503
	50	0–1	2 522	278
15	75	0–1–2–3	2 276	307
	100	0–1–2–3	1 835	808

Из табл. 8 и 9 видно, что при разнице между скоростями участковых и сквозных поездов в 5 % и мощности струй вагонопотока, равной 100 вагонам, при использовании предлагаемого метода подтверждается целесообразность выделения в самостоятельные назначения струй вагонопотока № 1, 2, 3 (A–D, A–C, B–D), тогда как при использовании традиционного метода обосновывается только целесообразность выделения струи вагонопотока № 1 (A–D). При этом расчет оптимального варианта ПФП с учетом параметра *Rn* обеспечивает экономию $\Delta B_{общ} = 168$ пр. ваг.ч.

При увеличении мощности струй вагонопотока и разницы между скоростями участковых и сквозных поездов эффект от использования предлагаемого метода возрастает. Так, при мощности струй вагонопотока, равной 100 вагонам, и $\Delta v = 15$ % он достигает 808 пр. ваг.ч.

Научная новизна и практическая значимость

В работе предложено использовать при разработке плана формирования поездов новый дополнительный параметр – критерий экономии затрат при следовании вагонов и локомотивов в сквозных поездах. Показано, что применение указанного критерия позволяет обосновать выделение в самостоятельные назначения отдельных струй вагонопотока, которые при использовании традиционных методов расчета плана формирования были бы признаны экономически невыгодными.

Авторы выполнили анализ влияния таких факторов, как состав поезда, длина участка и мощность струи вагонопотока на экономию затрат при использовании предлагаемого параметра.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке плана формирования поездов, что обеспечит экономию эксплуатационных затрат, связанных с нахождением вагонов и локомотивов в движении.

Выводы

После разработки плана формирования поездов традиционным методом для участков, на которых имеются маломощные сквозные струи, не выделенные в самостоятельные назначения, следует осуществлять проверку целесообразности их выделения с использованием *критерия экономии затрат при следовании вагонов и ло-*

doi: 10.15802/stp2018/147718

© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

комотивов в сквозных поездах. Использование указанного критерия может подтвердить целесообразность выделения в самостоятельные назначения дополнительных струй вагонопотоков, что, в свою очередь, обеспечит значительное сокращение эксплуатационных расходов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамов, А. А. Управление эксплуатационной работой : в 3 ч. / А. А. Абрамов. – Москва : Рос. гос. откр. техн. ун-т путей сообщения, 2001. – Ч. 1. – 144 с.
2. Бодюл, В. И. Концепция рационального управления вагонными парками операторов железнодорожного подвижного состава и информационная технология её реализации / В. И. Бодюл, А. Н. Феофилов // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 2016. – Т. 75, № 1. – С. 46–52.
3. Сайбаталов, Р. Ф. Вагонный парк, инфраструктуру и управление движением – к общему знаменателю / Р. Ф. Сайбаталов, А. Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 11. – С. 26–34.
4. Дорошко, С. В. Адаптивная система организации вагонопотоков / С. В. Дорошко. – Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 34. – С. 39–45.
5. Ковалев, В. И. Организация вагонопотоков на сети железных дорог России в условиях реформирования отрасли / В. И. Ковалев. – Санкт-Петербург : Выбор, 2002. – 144 с.
6. Левин, Д. Ю. Организация вагонопотоков в рыночных условиях / Д. Ю. Левин // Мир транспорта. – 2017. – № 4 (71). – С. 178–192.
7. Негрей, В. Я. Развитие методов анализа перевозочного процесса / В. Я. Негрей, К. М. Шкурин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2016. – № 2 (33). – С. 23–25.
8. Некрашевич, В. И. Управление эксплуатацией локомотивов / В. И. Некрашевич, В. И. Апатцев. – Москва : Рос. гос. откр. техн. ун-т путей сообщения, 2004. – 257 с.
9. Осьминин, А. Т. Рациональная организация вагонопотоков на основе методов многокритериальной оптимизации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.08 / Осьминин Александр Трофимович ; Самар. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Самара, 2000. – 260 с.
10. Правдин, Н. В. Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – Москва : Транспорт, 1987. – 247 с.
11. Пулатов, П. Н. Координация технологии эксплуатационной работы железной дороги Республики Таджикистан и организации вагонопотоков в международном сообщении / П. Н. Пулатов // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 2018. – Т. 77, № 4. – С. 211–217.
12. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учебник для вузов / П. С. Грунтов, Ю. В. Дьяков, А. М. Макарочкин [и др.] ; под ред. П. С. Грунтова. – Москва : Транспорт, 1994. – 543 с.
13. Федоров, Е. А. Методологические основы реализации планов формирования поездов перевозчиков в графике движения поездов на полигоне инфраструктуры / Е. А. Федоров // Вестн. науч.-исслед. ин-та ж.-д. трансп. – 2018. – Т. 77, № 2. – С. 92–97.
14. Шапкин, И. Н. На основе имитационного моделирования / И. Н. Шапкин, А. Н. Вдовин // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 3. – С. 37–41.
15. Шапкин, И. Н. Нормирование и прогнозирование на железных дорогах (методы, алгоритмы, технологии, расчеты) / И. Н. Шапкин, Р. А. Юсипов, Е. М. Кожанов. – Москва : Ин-т соц.-полит. исслед. Рос. акад. наук, 2007. – 255 с.
16. Шкурин, К. М. Системный подход к оптимизации плана формирования поездов / К. М. Шкурин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2017. – № 1 (34). – С. 61–64.
17. Butko, T. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms / T. Butko, V. Prokhorov, D. Chekhunov // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 1 (3). – С. 55–61.
18. Chen, Ch. Model and Algorithm of the Car-to-Block Assignment Plan on Railway Network / Chongshuang Chen, Hui Fang, Feng Xue // ICLEM 2012: Logistics for Sustained Economic Development – Technology and Management for Efficiency (Chengdu, China, Oct. 8-10, 2012). – Chengdu, 2012. – P. 54–60. doi: 10.1061/9780784412602.0009
19. Multistage methods for freight train classification / Riko Jacob, Peter Marton, Jens Maue, Marc Nunkesser // Networks. – 2011. – Vol. 57. – Iss. 1. – P. 87–105. doi: 10.1002/net.20385

doi: 10.15802/stp2018/147718
© В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

20. Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation / Markus Bohlin, Sara Gestrelius, Florian Dahms, Matúš Mihalák, Holger Flier // Transportation science. – 2016. – Vol. 50. – Iss. 3. – P. 823–840. doi: 10.1287/trsc.2014.0580
21. RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight / G. Michal, N. Huynh, N. Shukla, A. Munoz, J. Barthelemy // Transportation Research Procedia. – 2017. – Vol. 25. – P. 461–473. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.426
22. Xiao, J. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan / Jie Xiao, Boliang Lin // Journal of Rail Transportation Planning & Management. – 2016. – Vol. 6. – Iss. 3. – P. 218–236. doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.09.002
23. Yaghini, M. A hybrid solution method for fuzzy train formation planning / Masoud Yaghini, Mohsen Momeni, Mohammadreza Sarmadi // Applied Soft Computing. – 2015. – Vol. 31. – P. 257–265. doi: 10.1016/j.asoc.2015.02.039

В. Я. НЕГРЕЙ[1*], К. М. ШКУРІН[2*]

[1*]Каф. «Транспортні вузли», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246022, тел. +37 (529) 625 75 87, ел. пошта vjanegrey@gmail.com, ORCID 0000-0002-1857-4980
[2*]УП «Мінське відділення Білоруської залізниці», вул. Свердлова, 28, Мінськ, Республіка Білорусь, 220030, тел. +37 (529) 238 88 87, ел. пошта nodntiv1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2800-433X

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ ОДНОГРУПОВИХ ПОЇЗДІВ

Мета. У даній роботі досліджується можливість використання критерію, що дозволяє враховувати витрати, пов'язані з перебуванням локомотивів і вагонів у русі, під час розробки плану формування одногрупових поїздів. **Методика.** Проаналізовані наявні методи розробки плану формування поїздів й основні напрямки його оптимізації на сучасному етапі. Розроблені формули для розрахунку критерію економії витрат під час прямування вагонів і локомотивів у наскрізних поїздах. **Результати.** На прикладі ряду залізничних ділянок Білоруської залізниці була досліджена наявність залежності між дільничною швидкістю поїзда і його категорією. Отримані результати дозволили зробити висновок про те, що в загальному випадку дільнична швидкість наскрізних поїздів вища, ніж у дільничних поїздів. При цьому інтенсивність руху і пропускна здатність ділянки впливають на різницю між дільничними швидкостями поїздів різних категорій.. На прикладі залізничного напрямку, на якому розташовані чотири сортувальні станції, виконано розробку плану формування одногрупових поїздів із використанням традиційних методів та застосуванням запропонованого критерію. Відзначено, що використання запропонованої методики розробки плану формування поїздів може забезпечити значну економію експлуатаційних витрат за рахунок прискорення пропуску вагонопотоків по залізничних ділянках. **Наукова новизна**. У роботі запропоновано використовувати під час розробки плану формування поїздів новий додатковий параметр – критерій економії витрат у випадку прямування вагонів і локомотивів у наскрізних поїздах. Указано, що застосування зазначеного критерію дозволяє обґрунтувати виділення в самостійні призначення окремих струменів вагонопотоків, які в разі використання традиційних методів розрахунку плану формування були б визнані економічно невигідними. Автори виконали аналіз впливу таких чинників, як склад поїзда, довжина ділянки і потужність струменя вагонопотоку на економію витрат у випадку використання пропонованого параметра. **Практична значимість**. Отримані результати можуть бути використані під час розробки плану формування поїздів, що забезпечить економію експлуатаційних витрат, пов'язаних із перебуванням вагонів і локомотивів у русі.

Ключові слова: план формування поїздів; струмінь вагонопотоків; дільнична швидкість; економія витрат; дільничні поїзди; наскрізні поїзди

doi: 10.15802/stp2018/147718 © В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

V. Y. NEGREY[1*], K. M. SHKURYN[2*]

[1*]Dep. «Transport Nodes», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246022, tel. +37 (529) 625 75 87, e-mail vjanegrey@gmail.com, ORCID 0000-0002-1857-4980
[2*]Minsk Division of the Belarusian Railway, Sverdlov St., 28, Minsk, Republic of Belarus, 220030, tel. +37 (529) 238 88 87, e-mail nodntiv1@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2800-433X

SYNERGETIC APPROACH TO THE CALCULATION OF ONE-GROUP TRAIN FORMATION PLAN

Purpose. The research aims at the analysis of the possibility of using in the development of one-group train formation plan the criterion, which allows to consider the costs associated with the movement of cars and locomotives. **Methodology.** The existing methods for development of train formation plan and current directions of its optimization are analyzed. The formulas for calculating the cost-saving criterion for running cars and locomotives in through-trains have been developed. **Findings.** The dependence between the service speed and the category of train was analyzed on the examples of railway sections of the Belarusian Railways. The obtained results allowed to conclude that, in general, the service speed of through-trains is higher than that of local trains. At the same time, the traffic intensity and section capacity affect the difference between the service speeds of trains belonging to the different categories. The one-group train formation plan was developed using the traditional methods and the proposed criterion on the example of the railway direction, where four marshalling yards are located. The use of the proposed methodology for the development of train formation plan can provide significant savings in operating costs due to the acceleration of the passing of the car through the railway sections. **Originality.** The use of the additional parameter in the development of train formation plan – «the criterion of cost saving when running of rolling stock in through-trains» – is proposed. It is shown that the application of this criterion makes it possible to substantiate the creation of separate assignments of some car-streams, while these car-streams would be considered as unprofitable, when using traditional methods of the calculation of train formation plan. The authors analyzed the influence of such factors as the train composition, the length of the railway section and the car traffic volume on the cost savings by using the proposed criterion. **Practical value.** The obtained results can be used in the development of the train formation plan, which will save the operating costs connected with the movement of cars and locomotives.

Key words: train formation plan; cat stream; service speed; cost saving; local trains; through-trains

REFERENCES

1. Abramov, A. A. (2001). *Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy* (Vol. 1-3). Moscow: Rossiyskiy gosudarstvennyy otkrytyy tekhnicheskiy universitet putey soobshcheniya. (in Russian)
2. Bodyul, V. I., & Feofilov, A. N. (2016). Concept of rational management of car fleet of rolling stock operators and information technology for its implementation. *Vestnik nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta, 75(1),* 46-52. (in Russian)
3. Saybatalov, R. F., & Borodin, A. F. (2014). Vagonnyy park, infrastrukturu i upravlenie dvizheniem – k obshchemu znamenatelyu. *Zheleznodorozhnyy transport, 11,* 26-34. (in Russian)
4. Doroshko, S. V. (2010). Adaptivnaya sistema organizatsii vagonopotokov. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 34,* 39-45. (in Russian)
5. Kovalev, V. I. (2002). *Organizatsiya vagonopotokov na seti zheleznykh dorog Rossii v usloviyakh reformirovaniya otrasli*. St. Petersburg: Vybor. (in Russian)
6. Levin, D. Y. (2017). Organization of Car Flows in Market Conditions. *World Transport, 4(71*), 178-192. (in Russian)
7. Negrey, V. Y., & Shkuryn, K. M. (2016). Razvitie metodov analiza perevozochnogo protsessa. *Vestnik BelGUTa: Nauka i transport, 2(33),* 23-25. (in Russian)
8. Nekrashevich, V. I., & Apattsev, V. I. (2004). *Upravlenie ekspluatatsiey lokomotivov*. Moscow: Rossiyskiy gosudarstvennyy otkrytyy tekhnicheskiy universitet putey soobshcheniya. (in Russian)
9. Osminin, A. T. (2000). *Ratsionalnaya organizatsiya vagonopotokov na osnove metodov mnogokriterialnoy optimizatsii.* (Dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk). Samara State Transport University, Samara. (in Russian)
10. Pravdin, N. V., Dykanyuk, N. L., & Negrey, V. Y. (1987). *Prognozirovanie gruzovykh potokov*. Moscow: Transport. (in Russian)

doi: 10.15802/stp2018/147718 © В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

11. Pulatov, P. N. (2018). Koordinatsiya tekhnologii ekspluatatsionnoy raboty zheleznoy dorogi Respubliki Tadzhikistan i organizatsii vagonopotokov v mezhdunarodnom soobshchenii. *Vestnik nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta, 4 (77)*, 211-217. (in Russian)
12. Gruntov, P. S., Dyakov, Y. V., Makarochkin, A. M., & Gruntov, P. S. (Ed). (1994). *Upravlenie ekspluatatsionnoy rabotoy i kachestvom perevozok na zheleznodorozhnom transporte: Uchebnik dlya vuzov.* Moscow: Transport. (in Russian)
13. Fedorov, Y. A. (2018). Metodologicheskie osnovy realizatsii planov formirovaniya poezdov perevozchikov v grafike dvizheniya poezdov na poligone infrastruktury. *Vestnik nauchno-issledovatelskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta, 2 (7*7), 92-97. (in Russian)
14. Shapkin, I. N., & Vdovin, A. N. (2013). Na osnove imitatsionnogo modelirovaniya. *Zheleznodorozhnyiy transport, 3*, 37-41. (in Russian)
15. Shapkin, I. N., Yusipov, R. A., & Kozhanov, Y. M. (2007). *Normirovanie i prognozirovanie na zheleznykh dorogakh (metody, algoritmy, tekhnologii, raschety)*. Moscow: Institute of Social and Political Studies of the Russian Academy of Sciences (ISPR RAS). (in Russian)
16. Shkuryn, K. M. (2017). Sistemnyy podkhod k optimizatsii plana formirovaniya poezdov. *Vestnik BelGUTa: Nauka i transport, 1(34*), 61-64. (in Russian)
17. Butko, T., Prokhorov, V., & Chekhunov, D. (2017). Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(3(85)*, 55-61. doi: 10.15587/1729-4061.2017.93276 (in English)
18. Chen, C., Fang, H., & Xue, F. (2012). Model and Algorithm of the Car-to-Block Assignment Plan on Railway Network. *ICLEM 2012*. doi: 10.1061/9780784412602.0009 (in English)
19. Jacob, R., Márton, P., Maue, J., & Nunkesser, M. (2010). Multistage methods for freight train classification. *Networks, 57(1)*, 87-105. doi: 10.1002/net.20385 (in English)
20. Bohlin, M., Gestrelius, S., Dahms, F., Mihalák, M., & Flier, H. (2016). Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation. *Transportation Science, 50(3)*, 823-840. doi: 10.1287/trsc.2014.0580 (in English)
21. Michal, G., Huynh, N., Shukla, N., Munoz, A., & Barthelemy, J. (2017). RailNet: A simulation model for operational planning of rail freight. *Transportation Research Procedia, 25*, 461-473. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.426 (in English)
22. Xiao, J., & Lin, B. (2016). Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. *Journal of Rail Transport Planning & Management, 6(3)*, 218-236. doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.09.002 (in English)
23. Yaghini, M., Momeni, M., & Sarmadi, M. (2015). A hybrid solution method for fuzzy train formation planning. *Applied Soft Computing, 31*, 257-265. doi: 10.1016/j.asoc.2015.02.039 (in English)

Поступила в редколлегию: 12.06.2018
Принята к печати: 02.10.2018

doi: 10.15802/stp2018/147718 © В. Я. Негрей, К. М. Шкурин, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

UDC 621.774.6.06

S. S. ZDANEVICH[1*], R. P. POGREBNYAK[2*], S. V. ZDANEVICH[3*]

[1*]Dep. «Metallurgical Production Machines and Units», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49005, e-mail zdanevichss@gmail.com, tel. +38 (066) 044 89 35, ORCID 0000-0003-3034-4165
[2*]Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 743 32 76, e-mail pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818
[3*]Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 452 79 52, e-mail sergzd@i.ua, ORCID 0000-0001-8594-3806

STRUCTURAL ANALYSIS AND RATIONAL DESIGN OF MECHANISMS OF CROSS-ROLL TUBE STRAIGHTENING MACHINES

Purpose. The article is aimed to perform a structural analysis of the main and auxiliary mechanisms of tube straightening machines, to identify structural and local redundant links in the mechanism schemes, and to offer recommendations on their rational design. **Methodology.** The solution is realized by means of the theory of mechanisms and machines using structural analysis of the mechanisms of tube straightening machines based on the universal structural theory of O.G. Ozol. **Findings.** The extended principle of the machine's mechanism formation, which provides inclusion to the mechanism not only невільних solid bodies, but also the deformed bodies, allows us to consider the structure of machines for pressure processing of metals, taking into account the plastically deformed workpiece. Therefore, such machines include in their composition a deformed workpiece as an integral part of the machine mechanism, whose deformation and addition of certain geometric parameters to it is the reason the tube straightener was created for. Defects in the machine structure are determined by the local and structural redundant links included in the kinematic chains of the mechanisms, which transform the mechanism into a statically undetermined system. Movement of the mechanism with defects in the structure is possible in the presence of gaps or due to deformation of the links. The main mechanism of the tube straightening machine is a mechanism of variable structure, therefore, an analysis for its two states is carried out: before the tube is caught by the rollers and during its straightening. For calculation of the number of mobilities of the outer «roll – tube» pair, it was taken into consideration that most of the coordinates are overlaid with non-retentive links, which contain a fractional number of constraints. Fifteen redundant links were identified in the main mechanism and their amount in the auxiliary mechanisms of the tube straightening machine was established. **Originality.** The structural analysis of tube straightening machines with the search for redundant links was never performed. A structural analysis of the mechanisms of cross roll tube straightening machine was performed for the first time, taking into account the presence of external fractional links that are superimposed in the «roll-tube» pairs. **Practical value.** The practical recommendations for eliminating the harmful redundant links that were found in the structural analysis of the main and auxiliary mechanisms of the tube straightening machine were developed.

Keywords: tube straightening machine; structural analysis; redundant links; external fractional links

Introduction

Modern hot rolling mills use cross-roll tube straightening machines (TSM) for the strengthening of pipes [2, 3, 9, 12] of different designs, which differ in the number of rollers, the design of the main drives, the bearing structure, the adjustment mechanisms.

As a rule, TSM operate in the technological line of the mill in the absence of redundancy, which imposes high reliability requirements on these aggregates. In many cases, insufficient reliability of the adjustage machines of pipe-rolling

doi: 10.15802/stp2018/147630
© S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

shops, along with high technological loads, is due to defects in the structure of their mechanisms. It is known [6, 11] that defects in the structure are determined by mechanisms embedded in the kinematic chains of mechanisms by local and structural redundant links (RL), transform the mechanism into a statically undetermined system. Movement of the mechanism with defects in the structure is possible in the presence of gaps or due to deformation of the links. In the latter case, there are additional static and dynamic loads, not related to the implementation of technological operations, which depend on the errors of manufacturing and installation, rigidity of body parts and units.

In transient and non-stationary modes of mechanisms with redundant links and gaps in kinematic pairs there are significant dynamic, including shock loads, which cause increased wear of elements of kinematic pairs and progressive increase of gaps, resulting in increased intensity of shock impulses and noise [3].

Machines consisting of mechanisms without redundant links, thus statically determined mechanisms do not have the deficiencies mentioned above. Therefore, while designing and modernizing machines, it is necessary to include in their design mainly statically determined mechanisms, because under all other equal conditions, they guarantee the receipt of machines with higher technical and operational parameters.

The analysis of the mechanisms` structure is a qualitative method, which allows to establish the possibility of additional loads, which are not connected with the technological process, arising in the closed kinematic chains of the mechanisms during deformations of the links and the body, assembly, etc., as well as to verify the correctness of structural formation of the mechanisms.

In the process of analysis, all the TPM mechanisms were considered as spatial ones, the links were considered as absolutely rigid ones, and the kinematic pairs and connections in the first approximation – ideal (without gaps). Analysis of the TSM structure was performed on the basis of the O.G. Ozol's universal structural theory [5].

Six-roll TSM OVV 900x3 (Fig. 1) of the construction of the Starokramatorsk Machine-Building Plant (SKMP), with all the cross, hyperbolic rolls of identical length, is installed at the strengthening tube section of the continuous tube-rolling mill (TRM-140). TSM is designed to work in the technological line of the TRM-140 in the absence of reservation on the rational layout of rolls, according to the type of Kieserling tube straightener [4, 7, 8, 10]. It consists of the bearing structure, individual drive of rollers and adjustment mechanisms.

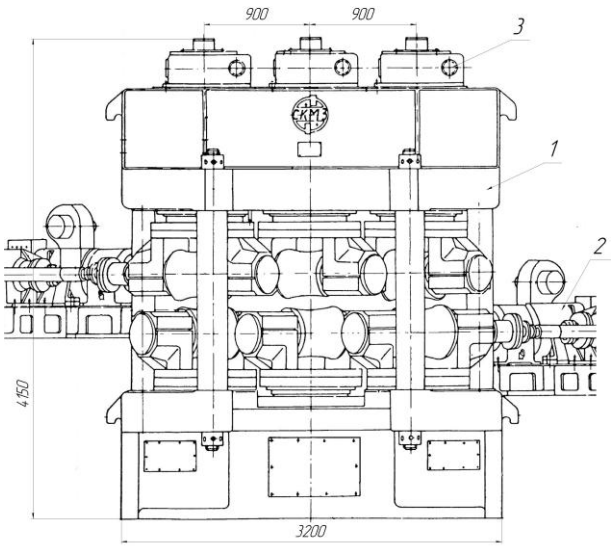


Fig.1. Six-rolls TSM OVV 900x3 (designed by SKMP):
1 – bearing structure; *2* – individual drive of rolls;
3 – adjusting mechanism

There are no studies of structural schemes of the cross-roll TSM in the literature, as well as recommendations on the rational choice of kinematic and structural schemes of TSM mechanisms.

Problem statement

Previously completed TSM studies [3, 4] allowed identifying dynamic and structural imperfections: low vibrational stability of the bearing structure, drives overload, wear and limited life of some major parts and units. Some equipment failures can be caused by structural defects in the kinematic schemes of the mechanisms.

Purpose

The article is aimed to a structural analysis of the basic mechanisms of tube straightening machines, identify structural and local redundant links in the circuits, and prepare recommendations for the rational design of the TSM units.

doi: 10.15802/stp2018/147630
© S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Methodology

The given task is solved by the means of the theory of mechanisms and machines using the structural analysis of the main mechanisms of the tube straightening machines based on the universal structural theory of O.G. Ozol.

Findings

Extended principle of the machine mechanisms formation, providing inclusion to the machine mechanism not only immovable solid bodies, but also the deformed bodies [2], allows us to consider the structure of machines for pressure processing of metals (PPM) taking into account the plastically deformed workpiece. The deformed bodies mean such bodies the deformation of which is necessary to perform the required functions of the machine. Therefore, PPM machines should include in their structure a deformed workpiece as an integral part of the machine mechanism, whose deformation (change of geometry) and the addition of certain geometric parameters is the reason the TSM was created for.

Determination of redundant links (RL) for the TSM mechanisms containing internal kinematic connections of any class was performed in the following order: according to the kinematic scheme of the given mechanism with the numbered links, a schematic diagram for Ozol [5] with the designation of class of each kinematic pair is formed. According to the structural scheme are calculated: the number of links (*n*), the total number of kinematic connections (*p*), the number of the mechanism contours k, $k = p - n + 1$; the total number of links (S) and moves (f) of all connections was calculated,

$$f = 5p_1 + 4p_2 + 3p_3 + 2p_4 + p_5 \qquad (1)$$

where p_i is the number of kinematic compounds of the i-th genus, $i = 1...5$; the number of degrees of freedom of the mechanism (W);

$$W = b + c + d, \qquad (2)$$

where c – the number of main mobilities (according to the number of moving forces); b – the number of additional mobilities (including the local ones); d – the number of dynamic links.

The total number of internal redundant links was determined by the formula:

$$\sigma_i = W + 6k - f. \qquad (3)$$

The main drive of TSM rollers (Fig. 2). At idle, all TSM mechanisms are independent in their movements and form a system when interacting with the external working body (pipe). The working body combines the TSM mechanisms not only with the kinematic interaction of the links, but also with dynamic phenomena in the plant.

It is known that compounds of working bodies and links of the mechanism impose external connections. Since the TSM mechanism always has external connections, then according to the universal structural theory, it is necessary to consider it from two positions. Firstly, in isolation from external bodies, with which it has external connections (isolated from the treated pipe). The number of freedom degrees in the absence of external links is called the real mobility of the mechanism (W_r). Secondly, in working condition, when external links are acting (the tube is in the deformation cells). Mobility under existing external links is the operational mobility of the mechanism (W_o). In this case, W_o is less than W_r on the number of external connections spent on its reduction. The TSM mechanism is a mechanism of variable structure, so we will analyze it step by step.

The first stage – before the pipe capture by the rolls (idle), thus, before imposure of external links (Fig. 2, *a*). Group main drive includes six identical transmissions, consisting of electric motor with a brake pulley, couplings and drive shaft. The kinematic scheme of the main drive (Fig. 2, *a*) of the investigated tube strengthener is a 49-link branching symmetrical 24 contour mechanism, and a structural diagram (Fig. 2, *b*) is its topological reflection. Mobility of the mechanism of the main drive rollers $W = 12$, includes 6 main mobilities and 6 local (axial) mobilities of the body of the gear clutches. The general mobility of all kinematic pairs is defined as the sum of the mobility of all kinematic connections (1): $f = 6(4 \cdot 2 + 3 \cdot 2 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 6) = 144$.

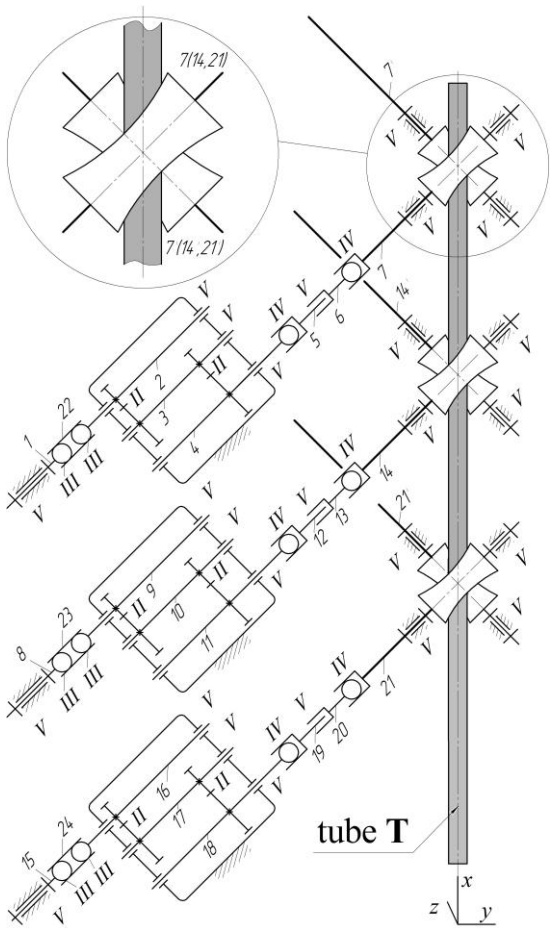
Then the total number of internal redundant links will be (3) $\sigma_i = 12 + 6 \cdot 24 - 144 = 12$.

doi: 10.15802/stp2018/147630
© S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

a



b

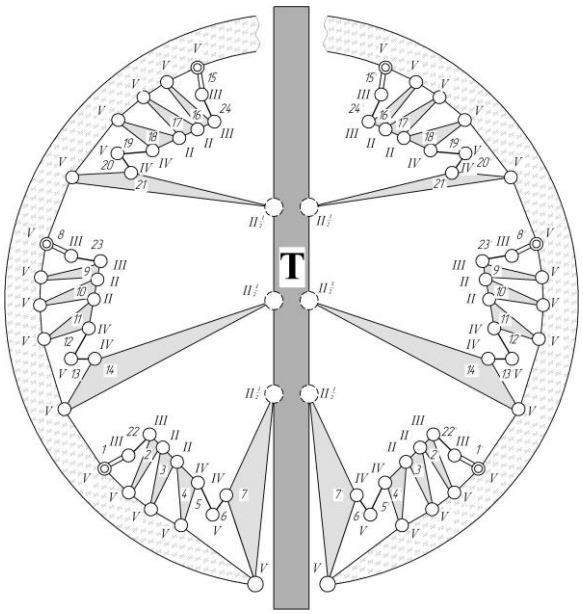


Fig.2. Main drive of TSM: kinematic (a) and structural (b) scheme

One RL in each contour with gear-tooth systems in gears, the effect of which is manifested in uneven load on the tooth length at linear contact.

It is known [11] that in machines the resistance to self-alignment of the mechanism links is determined by the value of the frictional forces that arise on the elements of the kinematic pairs during the self-alignment movement.

At continuous self-alignment, frictional forces worsen the distribution of forces in the kinematic pairs, which must be taken into consideration. In transient processes, the spline connection of the drive cardan joints of the TSM, in some cases, may not be able to perform the axial self-alignment mobility, which leads to the transmission of the axial load of the takeoff shaft of the gear unit, and possibly to the destruction of the covers of output shafts. It is more expedient to apply static determined ball spindles, where axial mobility is carried out with a small friction or an unloaded cardan joint, which has a length of the barrel-shaped toothed ring, in comparison with the diameter, assigns it to a third-class pair (including axial mobility with small friction).

The second stage – strengthening, the pipe is in rolls. After the pipe capture five more independent contour are formed in the scheme, there are, and the drive keeps its mobilities. The presence in the mechanism of external links, in addition to the internal ones, also requires application of generalized structural formula, which allows determining the number of internal, as well as external RL in the mechanism. The number of external RL is determined by the formula [5]

$$\sigma_a = S_a - \left[\left(W_r - W_o \right) + W_l \right], \qquad (4)$$

where S_a – the number of external links; W_r – actual mobility of the mechanism (with removed external links); W_o – operating mobility (with acting external links), can be calculated according to the dependence (2); W_l – the number of lost mobilities of external bodies from the action of external links. Formula (4) shows how many external links are spent on reducing the mobility of the link mechanisms (expression in round brackets) and the external processed body.

When calculating the number of mobilities of the outer «roll – tube» pair, it was taken into consideration that most of the coordinates are

doi: 10.15802/stp2018/147630
© S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

overlaid with non-retentive links, which impose a fractional number of constraints [5, 6].

Geometric unilateral links: pipe turn around the vertical axis (½φ_z), the pipe movement along the vertical axis (½z), turn around the axis perpendicular to the strengthening axis (½φ_y). A geometric two-way connection is taken along the axis perpendicular to the strengthening axis (y). By friction each external connection imposes two another fractional holonomic friction links, capable of transmitting the rotation moment around the longitudinal axis of strengthening (½φ_x) and force along the strengthening axis (½x). Then the number of external links of pairs will be $S_a = 5\cdot½ + 1 = 3½$, and the total number of external links $S_a = 6\cdot3½ = 21$. The mechanism mobility has not changed after the external links application, therefore $W_o = W_r = 12$, $W_l = 6$ – the pipe can not move independently of the rolls. After substitution, the number of external RL is: $\sigma_a = 21 - \left[(12-12)+6\right] = 15$.

Most of the 15 redundant links in the five external contours are due to the need for elastic-plastic deformation of the pipe, therefore, in the strengthening scheme with three pairs of rolls, the duplication of each of them (pair) of constraints at the corresponding coordinates causes the technological deformation of the pipe. In this quantity of external RL there are also the harmful ones. Kinematically, it would be enough to make only the first pair of rollers driven; the other two driven pairs introduce one torsional (around the strengthening axis) and axial (along the correcting axis) tension. Since the links on these coordinates are frictional, these tensions cause the rolls to wear out, and in the tube arise torsional and stretching (compression) tensions that are not needed for strengthening. In addition, there may be frictional self-oscillations. Some are compensated by elastic deformation of the pipe.

Mechanisms of setting relate to the mechanisms of episodic action, the regulation is not performed during the technological process and the size of the links is large as compared to the size of the kinematic pairs, so it is advisable to perform a statically determined mechanism, using increased gaps in the link connections.

Roller angle setting mechanism. It is a simple triangular spatial mechanism (Fig. 3, *a*) with one structural and one local internal independent contours (Fig. 3, *b*). Mobility of the mechanism $W = 1$, total mobility of all kinematic pairs $f = 2\cdot1+1\cdot2+1\cdot4 = 8$. Then the number of RL $\sigma_i = 1+6\cdot2-8 = 5$, where 4 RL in the local contour $0-1$ and 1 RL in the structural contour $0-1-2$.

In this case, it is necessary to ensure coherence of the support nodes of the worm 1 during their manufacturing. The RL in the structural contour is harmless because it is compensated by breaking-in of the worm pair $1-2$.

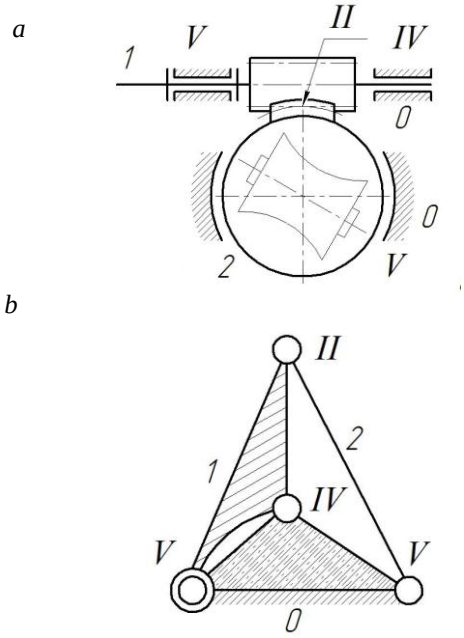


Fig.3. Mechanism of angle setting of the rolls: kinematic (*a*) and structural (*b*) scheme

The mechanism of axial roll setting of the top bed. Kinematic (Fig. 4, *a*) and structural (Fig. 4, *b*) schemes are presented without accounting the device of static balance of weight and selection of axial gaps of the upper roller node. Structural parameters of the mechanism: mobility $W = 1$, number of independent contours $k = 2$, general mobility of kinematic pairs $f = 4\cdot1+1\cdot3 = 7$; number of RL $\sigma_i = 1+6\cdot2-7 = 6$. The contours $0-1-2$ and $0-2-3$ are symmetric, so each of them has three RL. If you provide the required gaps in the slot pair $1-2$ and the guides of the prismatic slider $0-3$ (or in the combination screw-slider $2-3$), then in the scheme for 4 RL will be less.

doi: 10.15802/stp2018/147630
© S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

a *b*

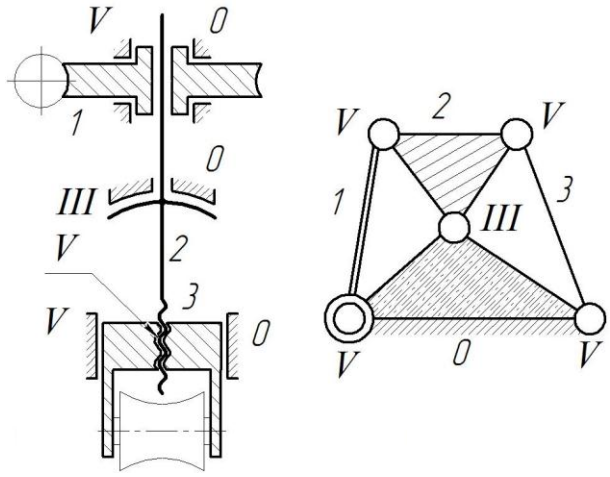


Fig.4. Mechanism of axial setting of the rolls of the top bed: kinematic (*a*) and structural (*b*) scheme

Mechanism of angle setting of rollers of the bottom bed (Fig. 5, *a*). The block diagram has (Fig. 5, *b*): the number of independent contours $k=2$, general mobility of kinematic pairs $f=4\cdot1+1\cdot3=7$. Mobility of the mechanism $W=1$, and the number of RL is $\sigma_i=1+6\cdot2-7=6$.

a *b*

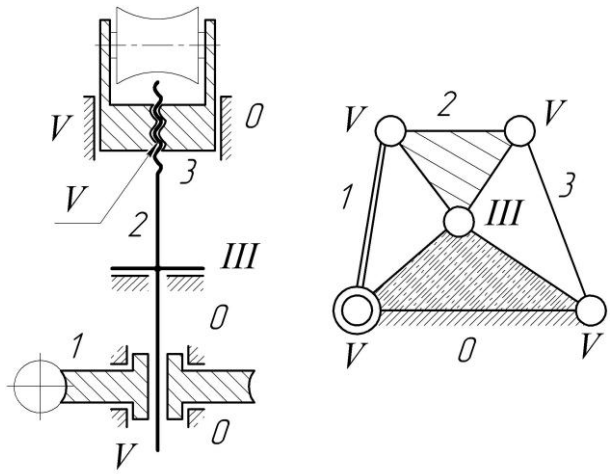


Fig.5. Mechanism of angle setting of the rolls of the bottom bed: kinematic (*a*) and structural (*b*) scheme

The contours $0-1-2$ and $0-2-3$, as in the previously considered mechanism, are symmetric, so each of them has three RL. The presence of mobility in a pair of $0-2$ in the horizontal plane does not allow to increase the gap in the slip pair $1-2$ to get rid of tensions in the connections of the vertical shaft 2.

The mechanism of the axial setting of the middle roll of the bottom bed (Fig. 6). Hydraulic axial setting mechanism consists of 2 movable links, one structural and one local contour, it has a general mobility in accordance with the formula (2) $W=2$ (basis $c=1$ and local $b=1$ – piston rotation around the vertical axis).

a *b*

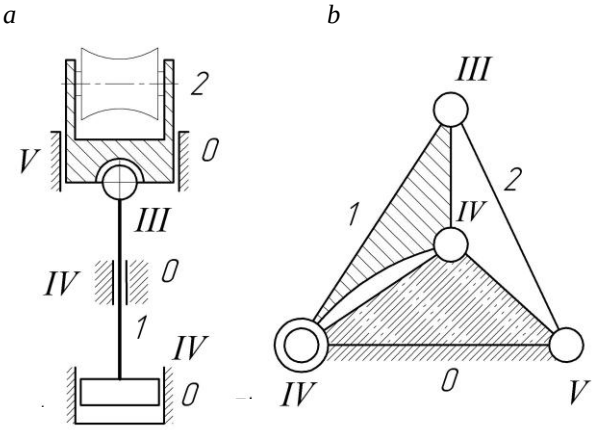


Fig.6. Mechanism of axial setting of the middle roll of the bottom bed: kinematic (*a*) and structural (*b*) scheme

The number of local RL in the contour $0-1$ was determined by the formula [5]: $\sigma_l=\sum S_i-S$, where $\sum S_i$ – the sum of all links imposed by each of the two joints of the body-piston and body-stem $\sum S_i=4+4=8$, S – class of kinematic pair $0-1$ $S=4$, that is, 4 RL are formed. In the circuit $0-1-2$ the number of RL $\sigma_i=2+6\cdot1-(1\cdot1+1\cdot2+1\cdot3)=2$.

One can eliminate all RL, if in the movable connection of the stem and the piston a ball-and-socket hinge will be applied, and the pilot of the stem-body will be made so short that it would be possible to attribute the modified kinematic pair to four-movable one . Then the improved mechanism will not have RL: $W=3$, $k=2$, $f=1\cdot1+2\cdot3+2\cdot4=15$, $\sigma_i=3+6\cdot2-15=0$.

Originality and practical value

For the first time a structural analysis of the mechanisms of a cross-roll tube straightening machine was performed taking into consideration

doi: 10.15802/stp2018/147630
© S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

the presence of external fractional links, which are superimposed on the pipe-roller pairs.

Practical recommendations for the elimination of harmful redundant links that were found during the structural analysis of the main and auxiliary mechanisms of TSM have been developed.

Conclusions

The main drive of the rollers of the tube straightening machine is a mechanism of a variable structure with non-stationary links. The pipe for the mechanisms of the main drive is an external working body, which imposes non-retentive fractional links. The scheme of the main drive mechanism contains fifteen redundant links, which are mostly determined by the needs for elastic-plastic deformation of the pipe; some of them are harmful and cause tension in contours and deformation and wear of the drive parts.

In the auxiliary mechanisms of roll setting also revealed local and structural redundant links. The ways to reduce them were proposed.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Добров, И. В. Структурный анализ схем машин обработки металлов давлением / И. В. Добров, Р. П. Погребняк // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Проблеми механічного приводу. – Харків, 2017. – № 25 (1247). – С. 43–47.
2. Завгородний, А. В. Совершенствование технологий и оборудования процессов правки труб на косовалковых трубоправильных машинах / А. В. Завгородний, Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск, 2016. – № 2 (43). С. 148–155.
3. Зданевич, С. В. Системная динамика приводов шестивалковых трубоправильных машин / С. В. Зданевич, В. А. Ермократьев, С. С. Зданевич // Металургійна і горнорудна промисловість. – 2015. – № 7. – С. 137–142.
4. Максилейсон, А. М. Трубоправильные машины / А. М. Максилейсон, В. И. Сапир, Ю. С. Комисарчук. – Москва : Машиностроение, 1971. – 208 с.
5. Озол, О. Г. Основы конструирования и расчета механизмов / О. Г. Озол. – Рига : Звайгзне, 1979. – 360 с.
6. Погребняк, Р. П. Повторювані зв’язки у схемах стрижньового повзунно-шатунного механізму захоплювального пристрою / Р. П. Погребняк // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 4 (76). – С. 81–88. doi: 10.15802/stp2018/140547
7. Ротов, И. С. Машины для правки труб. Конструкции, расчеты, исследования / И. С. Ротов. – Москва : Изд-во Моск. гос. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2013. – 269 с.
8. Семененко, Ю. Л. Отделка профилей и труб давлением / Ю. Л. Семененко. – Москва : Металлургия, 1972. – 232 с.
9. Deflection detection and curve fitting in three-roll continuous straightening process for LSAW pipes / Chunge Wang, Gaochao Yu, Wei Wang, Jun Zhao // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 255. – P. 150–160. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.060
10. Modification of straightening machine / V. B. Sarode, D. R. Prashant, D. R. Hiraman, V. Chavan Kalyan, R. Pawar Amol // International Journal of Modern Trends in Engineering and Research. – 2017. – Vol. 4. – Iss. 4. – P. 22–29. doi: 10.21884/ijmter.2017.4112.cruei
11. Reshetov, L. Self-Aligning Mechanisms : Reference book // Transl. from Russian by L. Sachs. – Moscow : Mir, 1986. – 528 p.
12. Zhang, Z. Q. A simplified model of maximum cross-section flattening in continuous rotary straightening process of thin-walled circular steel tubes / Z. Q. Zhang, Y. H. Yan, H. L. Yang // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 238. – P. 305–314. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.034

doi: 10.15802/stp2018/147630 © S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

С. С. ЗДАНЕВИЧ[1*], Р. П. ПОГРЕБНЯК[2*], С. В. ЗДАНЕВИЧ[3*]

[1*]Каф. «Машини та агрегати металургійного виробництва», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (066) 044 89 35, ел. пошта zdanevichss@gmail.com, ORCID 0000-0003-3034-4165
[2*]Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +038 (056) 743 32 76, ел. пошта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818
[3*]Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 452 79 52, ел. пошта sergzd@i.ua, ORCID 0000-0001-8594-3806

СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ І РАЦІОНАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ КОСОВАЛКОВИХ ТРУБОПРАВИЛЬНИХ МАШИН

Мета. В роботі передбачається виконати структурний аналіз основних і допоміжних механізмів трубоправильних машин, визначити структурні й локальні надлишкові зв'язки в схемах механізмів та запропонувати рекомендації щодо їх раціонального проектування. **Методика.** Рішення здійснюється засобами теорії механізмів і машин за допомогою структурного аналізу механізмів трубоправильних машин на основі універсальної структурної теорії О. Г. Озола. **Результати.** Розширений принцип утворення механізмів машини, що передбачає, окрім твердих невільних тіл, включати до складу механізму і тіла, що деформуються, дозволяє розглядати будову машин обробки металів тиском із урахуванням пластично деформованої заготовки. Тому такі машини включають до свого складу деформовану заготовку як складову ланку механізму машини, заради деформації якої й надання їй певних геометричних параметрів і створюють трубоправильний агрегат. Дефекти структури машин визначають закладені в кінематичних ланцюгах механізмів локальні та структурні надлишкові зв'язки, які перетворюють механізм у статично невизначену систему. Рух механізму з дефектами структури можливий за наявності зазорів або за рахунок деформації ланок. Основний механізм трубоправильної машини є механізмом змінної структури, тому проведен аналіз для двох його станів: до захоплення труби валками і під час виправлення. Для підрахунку числа рухомостей зовнішньої пари «валок–труба» було враховано, що за більшістю координат накладаються неутримувальні зв'язки, які містять дробове число обмежень. Виявлено п'ятнадцять надлишкових зв'язків у схемі основного механізму. З'ясована кількість надлишкових зв'язків у допоміжних механізмах трубоправильної машини. **Наукова новизна.** Структурного аналізу трубоправильних машин із пошуком надлишкових зв'язків раніше не виконували. У роботі проведено структурний аналіз механізмів косовалкової трубоправильної машини вперше з урахуванням наявності зовнішніх дробових зв'язків, що накладаються в парах «валок–труба». **Практична значимість.** Розроблені практичні рекомендації щодо усунення шкідливих надлишкових зв'язків, знайдених під час структурного аналізу основних і допоміжних механізмів трубоправильної машини.

Ключові слова: трубоправильна машина; структурний аналіз; надлишкові зв'язки; зовнішні дробові зв'язки

С. С. ЗДАНЕВИЧ[1*], Р. П. ПОГРЕБНЯК[2*], С. В. ЗДАНЕВИЧ[3*]

[1*]Каф. «Машини и агрегаты металлургического производства», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (066) 044 89 35, эл. почта zdanevichss@gmail.com, ORCID 0000-0003-3034-4165
[2*]Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днипро, Украина, 49005, тел. +038 (056) 743 32 76, эл. почта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818
[3*]Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (050) 452 79 52, эл. почта sergzd@i.ua, ORCID 0000-0001-8594-3806

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОСОВАЛКОВЫХ ТРУБОПРАВИЛЬНЫХ МАШИН

Цель. В работе предполагается выполнить структурный анализ основных и вспомогательных механизмов трубоправильных машин, определить структурные и локальные избыточные связи в схемах механизмов и предложить рекомендации относительно их рационального проектирования. **Методика.** Решение осуществляется средствами теории механизмов и машин с помощью структурного

doi: 10.15802/stp2018/147630 © S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

анализа механизмов трубоправильных машин на основе универсальной структурной теории О. Г. Озола. **Результаты.** Расширенный принцип создания механизмов машин, который предусматривает включать в состав механизма, кроме твердых несвободных тел, и деформирующиеся тела, позволяет рассматривать строение машин обработки металлов давлением с учетом пластически деформированной заготовки. Поэтому такие машины включают в свой состав деформированную заготовку как составляющее звено механизма машины, ради деформации которой и придания ей определенных геометрических параметров и создают трубоправильный агрегат. Дефекты структуры машин определяют заложенные в кинематических звеньях механизмов локальные и структурные избыточные связи, превращающие механизм в статически неопределенную систему. Движение механизма с дефектами структуры возможно при наличии зазоров или за счет деформации звеньев. Основной механизм трубоправильной машины является механизмом переменной структуры, поэтому проведен анализ для двух его состояний: до захвата трубы валками и при ее правке. При подсчете числа подвижностей внешней пары «валок–труба» было учтено, что за большинством координат, которые содержат дробное число ограничений. Выявлено пятнадцать избыточных связей в схеме основного механизма. Определено количество избыточных связей во вспомогательных механизмах трубоправильной машины. **Научная новизна.** Структурный анализ трубоправильных машин с поиском избыточных связей раньше не проводили. В работе выполнен структурный анализ косовалковой трубоправильной машины впервые с учетом наличия внешних дробных связей, которые накладываются в парах «валок-труба». **Практическая значимость.** Разработаны практические рекомендации относительно устранения вредных избыточных связей, которые были найдены при структурном анализе основных и вспомогательных механизмах трубоправильной машины.

Ключевые слова: трубоправильная машина; структурный анализ; избыточные связи; внешние дробные связи

REFERENCES

1. Dobrov, I. V., & Pogrebnyak, R. P. (2017). Strukturnyy analiz skhem mashin obrabotki metallov davleniem. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Problemy mekhanichnoho pryvodu, 25(1247)*, 43-47. (in Russian)
2. Zavgorodniy, A. V., & Gribkov, E. P. (2016). Sovershenstvovanie tekhnologiy i oborudovaniya protsessov pravki trub na kosovalkovykh trubopravilnykh mashinakh. *Obrabotka materialov davleniem. 2(43)*, 148-155. (in Russian)
3. Zdanevich, S. V., Yermokratev, V. A., & Zdanevich, S. S. (2015). Sistemnaya dinamika privodov shestivalkovykh trubopravilnykh mashin. *Metallurgical and Mining Industry, 7*, 137-142. (in Russian)
4. Maksileyson, A. M., Sapir, V. I., & Komisarchuk, Y. S. (1971). *Trubopravilnye mashiny*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
5. Ozol, O. G. (1979). *Osnovy konstruirovaniya i rascheta mekhanizmov*. Riga: Zvaygzne. (in Russian)
6. Pogrebnyak, R. P. (2018). Repeated connections in the schemes of link slider-crank mechanism of gripping device. *Science and Transport Progress, 4(76)*, 81-88. doi: 10.15802/stp2018/140547 (in Ukranian)
7. Rotov, I. S. (2013). *Mashiny dlya pravki trub. Konstruktsii, raschety, issledovaniya*. Moscow: Publisher Bauman Moscow State Technical University. (in Russian)
8. Semenenko, Y. L. (1972). *Otdelka profiley i trub davleniem*. Moscow: Metallurgiya. (in Russian)
9. Wang, C., Yu, G., Wang, W., & Zhao, J. (2018). Deflection detection and curve fitting in three-roll continuous straightening process for LSAW pipes. *Journal of Materials Processing Technology, 255*, 150-160. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.060 (in English)
10. Sarode, V. B., Prashant, D. R., Hiraman, D. R., Chavan Kalyan, V., & Pawar Amol, R. (2017). Modification of straightning machine. *International Journal of Modern Trends in Engineering & Research, 4(4)*, 22-29. doi: 10.21884/ijmter.2017.4112.cruei (in English)
11. Reshetov, L. (1986). Self-Aligning Mechanisms: Reference book. Moscow: Mir. (in English)
12. Zhang, Z. Q., Yan, Y. H., & Yang, H. L. (2016). A simplified model of maximum cross-section flattening in continuous rotary straightening process of thin-walled circular steel tubes. *Journal of Materials Processing Technology, 238*, 305-314. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.034 (in English)

Received: June 05, 2018
Accessed: Sep. 28, 2018

doi: 10.15802/stp2018/147630 © S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

УДК 629.5.035.5

О. Н. КОРНЕЛЮК[1*]

[1*]Каф. «Информационные технологии и физико-математические дисциплины», Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Херсонский филиал, пр. Ушакова, 44, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (050) 503 42 30, эл. почта OlgaNikKornelyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2444-1340

СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ И ГЕОМЕТРИИ ГРЕБНОГО ВИНТА В FLOW VISION

Цель. В исследовании необходимо: сгенерировать 3D–модели исследуемых гребных винтов, а также расчетного бокса; провести ряд численных экспериментов для верификации полученных результатов с соответствующими результатами модельных экспериментов; исследовать возможные способы постановки проекта для моделирования работы гребного винта в свободной воде; оценить эффективность способов постановки проекта. **Методика.** Проведен анализ возможностей и особенностей CFD–моделирования на примере изучения работы гребного винта в свободной воде. В результате выявлены способы задания граничных условий и геометрии винта в расчетном проекте и проанализированы на предмет достоверности получаемых результатов расчета. Сформулированы рекомендации по использованию способов постановки проекта для моделирования работы гребного винта в свободной воде. **Результаты.** На примере решения практической задачи по исследованию влияния геометрии гребного винта на его гидродинамическую эффективность обоснована целесообразность внедрения CFD–технологий в проектирование гребных винтов. Об этом свидетельствуют как численные результаты, так и визуализация распределений скоростей и давления в потоке при обтекании гребного винта потоком воды. Для исследований использовались гребные винты с различной профилировкой. Наиболее неэффективным способом постановки проекта для моделирования работы гребного винта является способ с использованием секторной модели гребного винта. **Научная новизна.** Результаты работы являются частью методики постановки проекта в среде Flow Vision для проведения численных экспериментов по моделированию работы гребного винта в свободной воде. **Практическая значимость.** Установлено, что способ постановки проекта для моделирования работы гребного винта в свободной воде с использованием граничного условия «скользящая» сетка наиболее практичный. Обоснованность такого вывода подтверждена результатами, полученными в ходе проведения огромного количества численных экспериментов по обтеканию вращающегося с заданной скоростью гребного винта. Универсальность такого способа заключается в возможности его применения при расчетах движительно-рулевого комплекса, работающего за корпусом судна.

Ключевые слова: CFD–пакет; численный эксперимент; 3D–модель гребного винта; модельный эксперимент; эффективность гребного винта

Введение

Одним из научно-технических направлений совершенствования характеристик современных судов является разработка эффективных гребных винтов. Проектирование гребного винта в общем виде представляет собой решение двух основных задач – разработка формы гребного винта в соответствии с заданными геометрическими характеристиками и оценка эффективности спроектированного гребного винта. КПД гребных винтов, работающих в составе пропульсивного комплекса, даже на расчетном режиме, как правило, не превышает 60–65 %. Следует учитывать также влияние корпуса судна на работу движительно-рулевого комплекса, которое так или иначе уменьшает конечное значение КПД. Поэтому задача повышения эффективности современных гребных винтов является актуальной.

До определённого времени эффективность гребного винта оценивали на основании результатов модельных испытаний в опытных бассейнах и аэродинамических трубах. Основным требованием к моделям гребных винтов является точность и соответствие изготовленной модели винта спроектированной. Это очень трудоёмкий процесс. Изготовление моделей гребных винтов достаточно дорогое. А если необходимо внести изменения в форму лопастей модели с учётом полученных результатов испытаний, то затраты возрастают.

doi: 10.15802/stp2018/147713 © О. Н. Корнелюк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Последние годы характеризуются эффективным внедрением методов вычислительной гидродинамики (CFD–пакетов) в область судостроения. На сегодняшний день огромное количество публикаций посвящено вопросам применения CFD–пакетов в области проектирования судов и гребных винтов, в частности. CFD–пакет Flow Vision успешно конкурирует с аналогичными пакетами, такими как STAR–CD, Ansys CFX, Fluent. В источниках [2, 4, 6, 8, 11] опубликованы результаты многочисленных экспериментов по исследованию гидродинамики судов, работы гребных винтов в свободной воде, проведённых в среде Flow Vision как разработчиками, так и пользователями программы. Но чаще всего результаты расчётов представлены посредством цветных рисунков, на которых визуализировано распределение давления и скорости потока при моделировании поставленных задач. Гораздо меньше работ, в которых представлены результаты численного моделирования гидродинамических задач. Установлено, что на достоверность результатов численных экспериментов влияет правильность постановки проекта в CFD–пакете: выбор множества параметров и модели расчета, а также способа загрузки геометрии исследуемых объектов в расчетный бокс для моделирования конкретной задачи. Поэтому изучение возможностей CFD–пакета Flow Vision является актуальной задачей.

Цель

Данная статья предполагает исследование способов постановки проекта в среде Flow Vision для моделирования работы гребного винта в свободной воде, а также оценку эффективности их использования на основе полученных результатов. Для достижения цели в исследовании предусмотрено выявить и рассмотреть все возможные варианты постановки проекта, провести ряд численных экспериментов, выполнить верификацию полученных результатов и оценить их.

Методика

Технологические возможности Flow Vision позволяют задавать различные модели движения жидкости (турбулентность), параметры метода численного моделирования, параметры расчётной сетки и др. Таким образом можно создать множество вариантов проектов для моделирования обтекания объектов в среде данного CFD–пакета программ. Однако речь идёт о том, чтобы проект моделирования работы гребного винта в свободной воде обеспечивал получение достоверных результатов расчёта. Основные этапы постановки проекта в среде Flow Vision описаны в [1–3]. Поэтому была поставлена задача исследовать возможные варианты задания параметров расчётного проекта в среде данного CFD–пакета с целью разработки методики постановки проекта моделирования работы гребного винта в свободной воде в Flow Vision. В результате исследований выяснилось, что проект по обтеканию гребного винта потоком жидкости может быть поставлен разными способами.

Результаты расчёта серийного винта в CFD–пакете есть возможность сравнить с результатами модельного эксперимента. В случае моделирования работы несерийного гребного винта такой возможности нет. К тому же опытным путём установлено влияние заданной модели турбулентности, размеров расчётной области (бокса), уровня адаптации расчётной сетки, модели расчёта, шага интегрирования на результаты численного эксперимента [1–3]. Таким образом, актуальность исследования способов постановки проекта в среде Flow Vision для конкретных винтов очевидна. 3D–модель гребного винта помещают в расчётную область при помощи Фильтра подвижного тела. На входе в расчётную область задают скорость набегающего потока воды.

Результаты

Существует четыре способа постановки проекта в среде Flow Vision для расчёта гребного винта.

Способ 1. Моделирование вращения гребного винта в свободной воде с заданием параметров движущегося тела. При такой постановке проекта задаются координаты расположения модели винта относительно границ расчётной области, массу винта, момент инерции, параметры вращения объекта (угловая скорость вращения, момент произвольной внешней силы, равный гидродинамическому моменту). Расчётная область может представлять собой параллелепипед, тогда задают следующие граничные условия: вход, «свободный» выход, стенка, симметрия. Либо

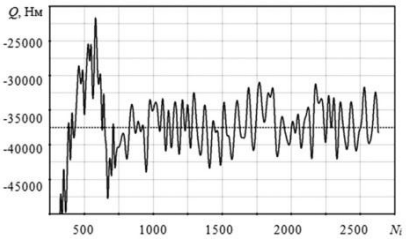
doi: 10.15802/stp2018/147713
© О. Н. Корнелюк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

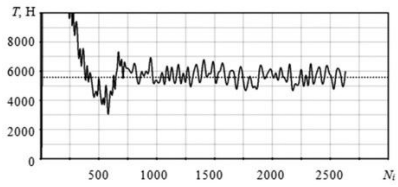
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

расчётная область может иметь форму удлинённого цилиндра, – тогда задают такие граничные условия, как вход, «свободный» выход, стенка. Для модели гребного винта В3–35 с шаговым отношением 1,1 и диаметром 1,0 м в цилиндрическом боксе диаметром 2,5 м и длиной 7,0 м при 200 тыс. ячеек локально измельченной сетки выполнены исследования влияния параметров моделирования на результаты расчетов. По физическому модельному эксперименту упор T = 37 520 Н, момент M = 5 592 Нм при угловой скорости ω = 62,8 с-1. На рис. 1 в качестве примера изображены зависимости гидродинамического момента Q, упора T и ω от количества итераций Ni. Пунктирными линиями обозначены контрольные значения указанных величин, рассчитанные для этого винта по кривым действия этой серии – результаты модельного эксперимента, синусоидальные кривые – это результаты численного эксперимента.

а – a



б –b



в – c

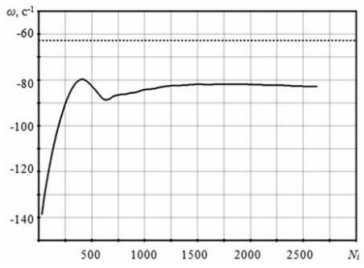


Рис. 1. Результаты численного эксперимента:
а – зависимость $Q(N_i)$; *б* – зависимость $T(N_i)$;
в – зависимость $\omega\ (N_i)$

Fig. 1. Results of numerical experiment:
a – dependence *Q(Ni);* *b* – dependence *T(Ni);*
c – dependence ω *(Ni)*

В табл. 1 представлены результаты сравнения гидродинамических характеристик гребного винта, полученных при модельном и численном экспериментах.

Таблица 1

Сравнение результатов гидродинамических характеристик гребного винта, полученных при модельном и численном экспериментах

Table 1

Comparison of the results of hydrodynamic characteristics of the screw-propeller obtained during the model and numerical experiments

T, Н (модельный эксперимент)	*M*, Нм (модельный эксперимент)	*T*, Н (Flow Vision)	*M*, Нм (Flow Vision)
37 520	5 592	36 981,05	5 800,9

Способ 2. Моделирование вращения гребного винта в свободной воде с использованием принципа обратимости движения. При этом способе вращение гребного винта с постоянной скоростью в воде заменяют обтеканием неподвижного винта потоком, скорость которого по значению равна, а по направлению противоположна скорости вращения гребного винта. Винт находится в состоянии покоя, а вращается подобласть со скоростью вращения винта. При такой постановке проекта задают координаты расположения модели винта относительно границ расчётной области, тип движения подобласти – вращение, угловую скорость вращения, соответствующую скорости вращения винта. Результаты исследования проекта в такой постановке описаны в [2]. На рис. 2 представлена визуализация проекта расчёта гребного винта в свободной воде.

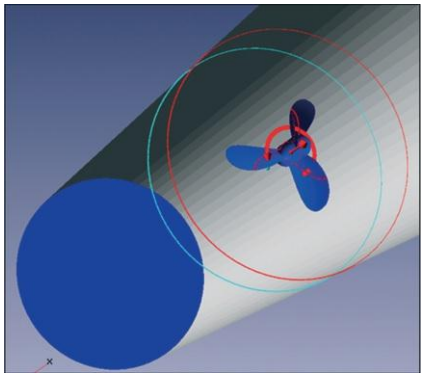
Способ 3. Моделирование вращения гребного винта в свободной воде с использованием его секторной модели. В этом случае исследуют сектор гребного винта, получаемый при сечении его плоскостями, расположенными вдоль и поперёк ступицы и пересекающимися при этом в центре ступицы. Такой способ постановки проекта не актуальный, поскольку вблизи работающего гребного винта возникает неоднородный поток, влияющий как на другие лопасти гребного винта, так и на корпус, и на руль судна.

doi: 10.15802/stp2018/147713
© О. Н. Корнелюк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

а – a



б – b

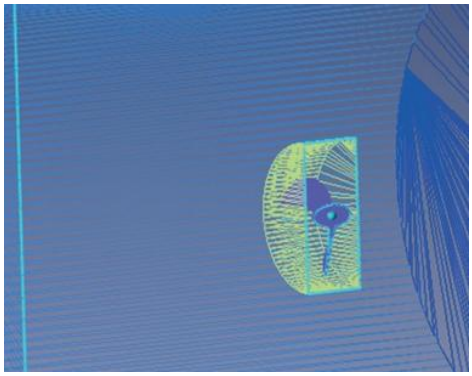


Рис. 2. Способы постановки моделирования работы гребного винта в свободной воде в среде Flow Vision:
а – способ 2; *б* – способ 4

Fig. 2. Methods of setting the operation simulation of screw-propeller in free water in Flow Vision environment:
a – method 2; *b* – method 4

Способ 4. Моделирование вращения гребного винта в свободной воде с использованием граничного условия «скользящая» сетка. Особенность состоит в том, что при подготовке 3D–модели расчётной области в форме короткого цилиндра в соответствующем месте в ней делается вырез (рис. 2). При открытии расчётной области в программе Flow Vision гребной винт вставляют в вырез (размеры выреза должны быть максимально приближены к размерам гребного винта). В этом случае используют, помимо описанных выше, граничное условие «скользящая» сетка. При такой постановке проекта задают вращение подобласти цилиндра, соответствующее угловой скорости вращения гребного винта. Таким образом, в препроцессоре (панель задания параметров расчёта) определено две подобласти – одна в форме удлинённого цилиндра, имитирующего опытный бассейн, вторая в форме короткого цилиндра. Для модели гребного винта В3–35 с шаговым отношением 0,997 и диаметром 7,9 м при 1 055 506 ячейках локально измельченной сетки выполнены исследования влияния параметров моделирования на результаты расчетов. Эксперименты проведены для трёх значений поступи *J*. На рис. 3 приведены результаты сравнения гидродинамических кривых, полученных в результате модельного и численного экспериментов. Сплошными линиями обозначены результаты модельного эксперимента, точками – результаты численного эксперимента.

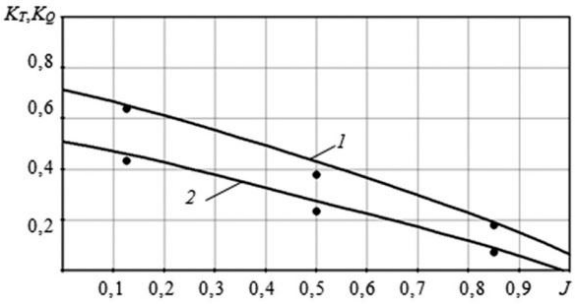


Рис. 3. Гидродинамические характеристики гребного винта:
1 – кривая зависимости *10 K_q (J)*;
2 – кривая зависимости *K_t (J)*

Fig. 3. Hydrodynamic characteristics of the screw-propeller:
1 – dependence curve 10 Kq (J);
2 – dependence curve Kt (J)

В табл. 2 представлены результаты сравнения коэффициентов упора *Kt* и момента *Kq* гребного винта, полученных при модельном и численном экспериментах.

Расчёты были проведены в CFD–пакете Flow Vision 2.05.05. На рис. 4 представлено распределение давления по нагнетающей и засасывающей поверхности гребного винта, а также вблизи винта при его работе в свободной воде.

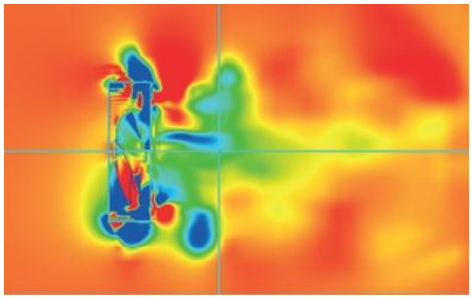
Проведённые исследования способов задания проекта во Flow Vision обоснованы и аргументированы результатами решения конкретных задач расчёта гидродинамических характеристик гребных винтов на примере винтов серий В, КР–508 с целью оценки их эффективности.

doi: 10.15802/stp2018/147713
© О. Н. Корнелюк, 2018

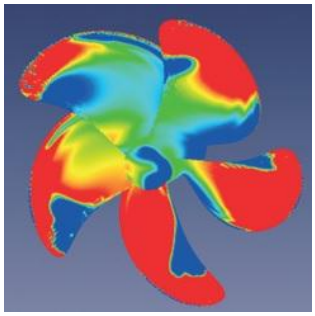
ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

а – a



б – b



в – c

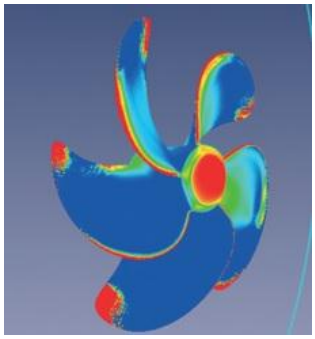


Рис. 4. Визуализация распределения давления для гребного винта (серия КР–508):
а – вблизи работающего гребного винта;
б, в – на поверхности гребного винта

Fig. 4. Visualization of the pressure distribution for the screw-propeller (series KR – 508):
a – near the operating screw-propeller;
b, c – on the screw-propeller surface

В результате проведенных исследований было установлено, что в CFD–пакете Flow Vision существует несколько способов постановки проекта для моделирования работы гребного винта в свободной воде. Речь идет о вариантах задания граничных условий и геометрии 3–D модели гребного винта для обеспечения процесса расчета. Три способа из четырех (за исключением использования секторной модели гребного винта) дают непротиворечивые достоверные результаты расчета, о чем свидетельствует табл. 2.

Таблица 2

Сравнение коэффициентов упора и момента гребного винта, полученных при численном и модельном экспериментах

Table 2

Comparison of the thrust and thrust of the screw-propeller obtained during numerical and model experiments

J	*Kt* (модельный эксперимент)	*Kq* (модельный эксперимент)	*Kt* (Flow Vision)	*Kq* (Flow Vision)
0,13	0,45	0,64	0,433	0,64
0,5	0,276	0,43	0,233	0,38
0,85	0,089	0,191	0,072	0,18

В ней отслеживается сходимость результатов численных и модельных экспериментов для гребного винта серии КР–508.

Однако если говорить о таком критерии качества расчета, как скорость, то следует применять способ моделирования вращения гребного винта в свободной воде с использованием граничного условия «скользящая» сетка. Также установлено и доказано, что при необходимости решения однотипных задач гидродинамики в CFD–пакете необходимо разрабатывать методику задания параметров проекта для расчета с целью обеспечения верификации полученных результатов, что особенно актуально в случае проектирования несерийных гребных винтов при отсутствии результатов модельных экспериментов. Постановка проектов в CFD–пакете для решения задач моделирования работы гребных винтов в свободной воде требует высокой квалификации пользователя, которая заключается как в компьютерной, так и гидродинамической грамотности.

Научная новизна и практическая значимость

Внедрение методов вычислительной гидродинамики (CFD–пакета) для исследования влияния геометрии гребного винта на его гидроди-

doi: 10.15802/stp2018/147713
© О. Н. Корнелюк, 2018

намические характеристики привело к необходимости поиска решений по созданию расчетного проекта, с учётом, в том числе, руководства разработчиков CFD–пакета. Таким образом выявлено четыре способа моделирования работы гребного винта в свободной воде: с заданием параметров движущегося тела; с использованием принципа обратимости движения, когда вращение гребного винта с постоянной скоростью в воде заменяют обтеканием неподвижного винта потоком; с использованием секторной модели гребного винта; с использованием граничного условия «скользящая» сетка. Практическая ценность и оригинальность работы заключается в установлении такого способа из представленных, который дает возможность впоследствии рассчитывать движительно-рулевой комплекс судна отдельно, а также при работе его за корпусом судна. Это способ с использованием граничного условия «скользящая» сетка.

Выводы

Современное проектирование гребного винта не обходится без использования 3D–модели движителя [2, 3, 8, 11]. Это экономия финансовых средств, поскольку такой подход позволяет в дуэте с CFD–пакетом сократить или свести на нет количество проводимых модельных экспериментов. Одной из важных задач проектировщика при моделировании работы гребного винта в свободной воде с использованием CFD–пакета Flow Vision является правильное задание расчетного проекта, чтобы получить достоверные результаты расчёта гидродинамики винта и оценить его эффективность.

Результаты исследований, проведенных в рамках данной работы, говорят об истинности расчетных значений гидродинамических характеристик гребных винтов при использовании рекомендуемых способов задания граничных условий и геометрии 3–D модели гребного винта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Король, Ю. М. Автоматизированная генерация данных для построения твердотельных моделей гребных винтов / Ю. М. Король, О. Н. Рудько // Зб. наук. пр. нац. ун-ту кораблебудування. – Миколаїв, 2008. – № 1. – С. 56–61.
2. Король, Ю. М. Влияние лопастных и профильных характеристик на гидродинамическую эффективность гребных винтов / Ю. М. Король, О. Н. Корнелюк // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 4 (70). – С. 80–85. doi: 10.15802/stp2017/109589
3. Корнелюк, О. Н. Выбор оптимальных расчётных параметров при моделировании работы гребного винта в свободной воде в среде Flow Vision / О. Н. Корнелюк // Зб. наук. пр. Нац. ун-ту кораблебудування. – Миколаїв, 2014. – № 5. – С. 17–21.
4. Application of Dynamic Mesh in Analysis of Propeller Hydrodynamic Characteristics / F. L. Wu, Y. L. Peng, Z. G. Zhang, G. D. Wang // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – Vol. 212-213. – P. 1112–1118. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.212-213.1112
5. Bulten, N. Optimum propeller design leads to higher ship efficiency [Электронный ресурс] / N. Bulten // Wärtsilä Technical Journal. – 2014. – Режим доступа: https://www.wartsila.com/twentyfour7/in-detail/optimum-propeller-design-leads-to-higher-ship-efficiency – Загл. с экрана. – Проверено: 26.10.2018.
6. CFD Analysis of a Propeller Flow and Cavitation / S. Ramakrishna, V. Ramakrishna, A. Ramakrishna, K. Ramji // Intern. Journal of Computer Applications. – 2012. – Vol. 55. – Iss. 16. – P. 26–23. doi: 10.5120/8841-3125
7. Experimental and numerical analyses of the hydrodynamic performance of propeller boss cap fins in a propeller–rudder system /Yu Sun, Yumin Su, Xiaoxiang Wang, Haizhou Hu // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2016. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 145–159. doi: 10.1080/19942060.2015.1121838
8. Majdfar, S. Hydrodynamic Effects of the Length and Angle of the Ducted Propeller / S. Majdfar, H. Ghassemi, H. Forouzan // Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace–Science and Engineering. – 2015. – Vol. 25. – P. 19–25.
9. Moonesun, M. CFD analysis on the equations of submarine stern shape / M. Moonesun, Y. M. Korol, A. Brazhko // Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers. – 2015. – Vol. 34, No. 1. – P. 21–32.
10. Ou, L. J. Influence Analysis of Blade Fracture on Hydrodynamic Performance of Ducted Propellers Based on CFD / L. J. Ou, D. Y. Li, W. Zhang // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 300-301. – P. 1071–1076. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.300-301.1071

doi: 10.15802/stp2018/147713 © О. Н. Корнелюк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

11. Shi, Y. Rotor wake and flow analysis using a coupled Eulerian–Lagrangian method / Y. Shi, G. Xu, P. Wei // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2016. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 384–402. doi: 10.1080/19942060.2016.1174887

О. М. КОРНЕЛЮК[1*]

[1*]Каф. «Інформаційні технології та фізико-математичні дисципліни», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсонська філія, пр. Ушакова, 44, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (050) 503 42 30 ,
ел. пошта OlgaNikKornelyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2444-1340

СПОСОБИ ЗАВДАННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ І ГЕОМЕТРІЇ ГРЕБНОГО ГВИНТА У FLOW VISION

Мета. У дослідженні необхідно: згенерувати 3D–моделі досліджуваних гребних гвинтів, а також розрахункового боксу; провести ряд чисельних експериментів для верифікації отриманих результатів із відповідними результатами модельних експериментів; дослідіти можливі способи постановки проекту для моделювання роботи гребного гвинта у вільній воді; оцінити ефективність способів постановки проекту. **Методика.** Проведено аналіз можливостей та особливостей CFD–моделювання на прикладі вивчення роботи гребного гвинта у вільній воді. В результаті виявлено способи завдання граничних умов і геометрії гвинта в розрахунковому проекті та проаналізовані на предмет достовірності отриманих результатів розрахунку. Сформульовано рекомендації щодо використання способів постановки проекту для моделювання роботи гребного гвинта у вільній воді. **Результати.** На прикладі вирішення практичного завдання по дослідженню впливу геометрії гребного гвинта на його гідродинамічну ефективність обґрунтовано доцільність впровадження CFD–технологій у проектування гребних гвинтів. Про це свідчать як чисельні результати, так і візуалізація розподілів швидкостей і тиску в потоці при обтіканні гребного гвинта потоком води. Для досліджень використовувалися гребні гвинти з різними профілями лопатей. Найбільш неефективним способом постановки проекту для моделювання роботи гребного гвинта є спосіб із використанням секторної моделі гребного гвинта. **Наукова новизна.** Результати роботи є частиною методики постановки проекту в середовищі Flow Vision для проведення чисельних експериментів по моделюванню роботи гребного гвинта у вільній воді. **Практична значимість.** Встановлено, що спосіб постановки проекту для моделювання роботи гребного гвинта у вільній воді з використанням граничної умови «змінна» сітка найбільш практичний. Обґрунтованість такого висновку підтверджена результатами, отриманими в ході проведення величезної кількості чисельних експериментів по обтіканню гребного гвинта, що обертається з заданою швидкістю. Універсальність такого способу полягає в можливості застосування його при розрахунках рушійно-рульового комплексу судна, що працює за корпусом судна.

Ключові слова: CFD–пакет; чисельний експеримент; 3D–модель гребного гвинта; модельний експеримент; ефективність гребного гвинта

O. N. KORNELYUK[1*]

[1*]Dep. «Information Technologies and Physico-Mathematical Disciplines», Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson Branch, Ushakov Av., 44, Kherson, Ukraine, 7300, tel. +38 (050) 503 42 30,
e-mail OlgaNikKornelyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2444-1340

METHODS OF PRESETING BOUNDARY CONDITIONS AND GEOMETRY OF THE SCREW-PROPELLER IN THE FLOW VISION

Purpose. The article is aimed to: generate 3D models of the screw-propellers under study, as well as the calculation box; carry out a series of numerical experiments to verify the obtained results with the corresponding results of the model experiments; study possible ways of setting a project to simulate the screw-propeller operation in free water; to evaluate the efficiency of the ways of project setting. **Methodology.** The analysis of possibilities and features of CFD-modeling using the example of studying the screw-propeller operation in free water is carried out. As a result, the ways of defining the boundary conditions and the geometry of the screw-propeller in the calculating project are revealed and

doi: 10.15802/stp2018/147713 © О. Н. Корнелюк, 2018

analyzed for the reliability of the obtained calculation results. Recommendations on the use of the methods for setting the project for simulation of the screw-propeller operation in free water are formulated. **Findings.** Using the example of solving a practical problem on studying the influence of the screw-propeller geometry on its hydrodynamic efficiency, the expediency of CFD-technologies introduction into the design of screw-propellers is substantiated. This is evidenced both by numerical results and by visualization of the velocity and pressure distributions during the water stream flow around the screw-propeller. For the research, the screw-propellers with different profiling were used. The method using the sector model of the screw-propeller is the most inefficient way of setting the project for simulation of the screw-propeller operation. **Originality**. The results of the work are the part of the methodology for setting the project in the Flow Vision environment for conducting numerical experiments to simulate the screw-propeller operation in free water**. Practical value.** It is established that the way of setting the project for simulating the screw-propeller operation in free water using the «sliding» grid boundary condition is the most practical one. The validity of this conclusion is confirmed by the results obtained during large number of numerical experiments on flow around the rotating screw-propeller at a given speed. The universality of such method lies in the possibility of its application during calculation of the propulsion/steering unit, which operates behind the ship hull.

Keywords: CFD-package; numerical experiment; 3D–model of the screw-propeller; model experiment; screw-propeller efficiency

REFERENCES

1. Korol, Y. M. & Rudko, O. N. (2008). Avtomatizirovannaya generatsiya dannykh dlya postroeniya tverdotelnykh modeley grebnykh vintov. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia, 1,* 56-61. (in Russian)
2. Korol, Y. M., & Kornelyuk, O. M. (2017). Influence of Blade and Profile Characteristics on Hydrodynamic Efficiency of Marine Propellers. *Science and Transport Progress, 4(70),* 80-88. doi: 10.15802/stp2017/109589 (in Russian)
3. Kornelyuk, O. N. (2014). Vybor optimalnykh raschetnykh parametrov pri modelirovanii raboty grebnogo vinta v svobodnoy vode v srede Flow Vision. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia, 5,* 17-21. (in Russian)
4. Wu, F. L., Peng, Y. L., Zhang, Z. G., & Wang, G. D. (2012). Application of Dynamic Mesh in Analysis of Propeller Hydrodynamic Characteristics. *Applied Mechanics and Materials, 212-213,* 1112-1118. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.212-213.1112 (in English)
5. Bulten, N. (2014). Optimum propeller design leads to higher ship efficiency. *Wärtsilä Technical Journal*. Retrived from https://www.wartsila.com/twentyfour7/in-detail/optimum-propeller-design-leads-to-higher-ship-efficiency (in English)
6. Ramakrishna, S., Ramakrishna, V., Ramakrishna, A., & Ramji, K. (2012). CFD Analysis of a Propeller Flow and Cavitation. *International Journal of Computer Applications, 55(16),* 26-33. doi: 10.5120/8841-3125 (in English)
7. Sun, Y., Su, Y., Wang, X., & Hu, H. (2016). Experimental and numerical analyses of the hydrodynamic performance of propeller boss cap fins in a propeller-rudder system. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 10(1*), 145-159. doi: 10.1080/19942060.2015.1121838 (in English)
8. Majdfar, S., Ghassemi, H., & Forouzan, H. (2015). Hydrodynamic Effects of the Length and Angle of the Ducted Propeller. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace–Science and Engineering, 25*, 19-25. (in English)
9. Moonesun, M., Korol, Y. M., & Brazhko, A. (2015). CFD analysis on the equations of submarine stern shape. *Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers, 34(1),* 21-32. (in English)
10. Ou, L. J., Li, D. Y., & Zhang, W. (2013). Influence Analysis of Blade Fracture on Hydrodynamic Performance of Ducted Propellers Based on CFD. *Applied Mechanics and Materials, 300-301,* 1071-1076. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.300-301.1071 (in English)
11. Shi, Y., Xu, G., & Wei, P. (2016). Rotor wake and flow analysis using a coupled Eulerian–Lagrangian method. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 10(1),* 384-402. doi: 10.1080/19942060.2016.1174887 (in English)

Поступила в редколлегию: 01.06.2018
Принята к печати: 27.09.2018

doi: 10.15802/stp2018/147713 © О. Н. Корнелюк, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

UDC 004.942:316.454.54

P. S. NOSOV[1*], I. V. PALAMARCHUK[2*], M. S. SAFONOV[3*], V. I. NOVIKOV[4*].

[1*]Dep. «Navigation and Electronic Navigation Systems», Kherson State Maritime Academy, Ushakov Av., 20, Kherson, Ukraine, 73000, tel. +38 (050) 909 06 08, e-mail pason@ukr.net, ORCID 0000-0002-5067-9766
[2*]Dep. «Navigation and Electronic Navigation Systems», Kherson State Maritime Academy, Ushakov Av., 20, Kherson, Ukraine, 73000, tel. +38 (050) 909 06 08, e-mail pason@ukr.net, ORCID 0000-0001-9161-1592
[3*]Dep. «Computer Engineering and Software Engineering», Odessa National Polytechnic University, Kherson Polytechnic College, Nebesna Sotnia St., 23, Kherson, Ukraine, 73000, tel. +38 (066) 245 81 85, e-mail nemko85@gmail.com, ORCID 0000-0001-9742-8270
[4*]Dep. «Shipbuilding and Power Engineering», Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson Branch, Ushakov Av., 44, Kherson, Ukraine, 73022, tel. +38 (095) 365 67 08, e-mail vertigogo@i.ua, ORCID 0000-0002-1823-4919

MODELING THE MANIFESTATIONS OF THE HUMAN FACTOR OF THE MARITIME CREW

Purpose. The article investigates the trajectories of the watch team members in maritime transport that lead to a decrease in the level of security. A formal apparatus is proposed, as well as software and hardware to identify the location of members of the watch team during the execution of complex maneuvers. **Methodology.** In the course of constructing the mathematical model, the most common schemes of interaction of watch members at the time of performing complex maneuvers were considered. The general problem was considered as a series of watchkeeping interactions that solve micro-tasks of ship control at a certain moment. As a result of simulation it is determined that a key role is played by the first mate, who is the most likely to deviate from the instructions, because of excessive activity or passivity in actions. Also, interaction models of members of the watchkeeping service within the framework of a multi-day ship passage are considered. **Findings.** Research shows that the formation of established interactions depends on the level of experience and qualifications of the members of the watchkeeping service. Overly active relocation of the mate, as well as function duplication of individual members of the watchkeeping service adversely affects the safety level in ship management. Software and hardware tools are proposed that allow identifying the location and movements of the watch team members, indicating deviations from the watchkeeping instructions for maritime transport. **Originality.** The authors for the first time developed software and hardware for analyzing the movements of the watchkeeping service members, allowing identifying violations of official instructions. **Practical value.** Based on the developed software and hardware identification of positions and movements of the members of the watchkeeping service, it becomes possible to more effectively manage the process of training navigators during simulator practice on the basis of the navigation simulator NTPRO 5000 at the Kherson State Maritime Academy, Ukraine. These studies can also be useful in studying the discipline «Organization of the crew actions in extreme conditions».

Key words: human factor; behavioral model; teammate interaction; abnormal situations

Introduction

One of the important stages in the organization of work on maritime transport is the crew formation, taking into account behavioral characteristics at the time of taking managerial decisions. This approach is conditioned by security measures in accordance with international standards and regulations.

During the control of the vessel, both in real conditions and during practice simulations, a number of difficulties arise. They are related to the negative manifestation of the human factor [1, 2, 10, 14]. Such manifestations are directly reflected in the result of passage of locations and other maneuvers [11, 12] at the time of crew control on the captain's bridge. The situation is complicated by the fact that in addition to the factors directly affecting each specialist [3, 8, 13], factors of influence from the team members exist [16, 4]. The more complex the task and the features of the location [15], the larger is the amount of information signals that the navigator faces [9, 17]. At the time of decision-making, the number of such information signals may exceed the perception threshold, which leads to the concentration loss and, as a

doi: 10.15802/stp2018/147937 © P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

consequence, raises the subjective entropy of the navigator [4]. World practice shows that the human factor remains the most common cause of catastrophes in maritime transport in present day [5].

Purpose

Thus, the purpose of this article is to analyze the movements of crew members resulting in the safety level decrease during the maritime transport control.

The main purpose of the article is to determine the interactions of navigators leading to a decrease in the safety level during the performance of the watchkeeping service. It should be noted that for a more visual representation of the situations under study, it is necessary to build a mathematical model for the interaction of team members in terms of set theory, group theory, game theory and the theory of formal systems [6, 7].

Methodology

In the conditions of watchkeeping, especially when practicing maneuvers in relation to locations, several members of the watchkeeping duty influence the decision concerning ship control. In some cases, when it is required by the changes in the situation, the captain gives the command to immediately strengthen the watch on the bridge (Figure 1). Typically, this decision is affected by: visibility, weather and sea conditions, the intensity of navigation and other features of the navigation situation. At the same time, the number of members of the watchkeeping duty is increasing, which also contributes a factor capable of adversely affecting the decision of the navigator. To construct a formal model, consider the following scheme for the interaction of watch members. During the maneuvers, the naval officer requests the watch personnel to specify the indications of navigational instruments and other parameters necessary for steering the vessel.

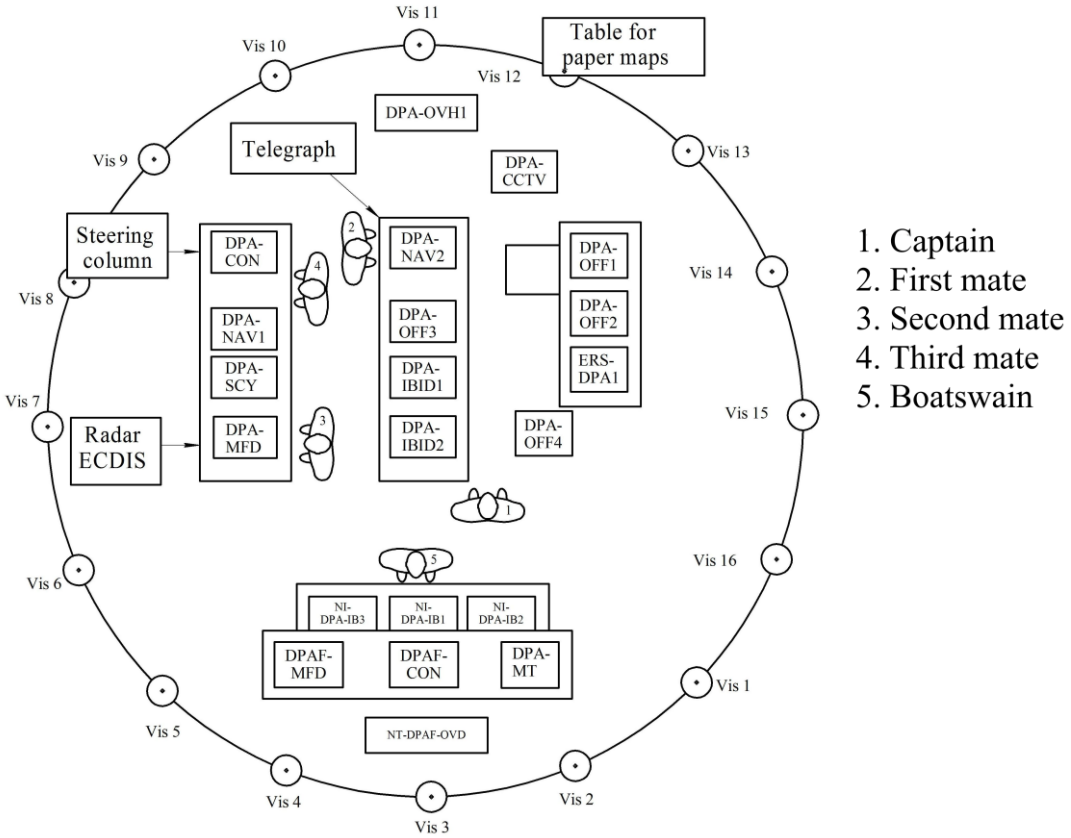


Fig. 1. The layout of the watchkeeping service's posts

doi: 10.15802/stp2018/147937
© P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

In this case, local short-time interactions between the members of the watch and the deck officer (captain) occur.

We will assume that two subjects are involved in the interaction: *W* is the deck officer or captain and *M* is a member of the watch crew. In this example, the captain instructs before the start of the location passage, and immediately at the time of passage the first mate takes control (Figure 2). Thus, the participant 1 (the captain) does not participate in team interaction, but can prompt the first mate.

Each watch interaction solves the micro-task of steering the vessel at the current moment.

During the passage, the command performs a different kinds of tasks *n* consisting of a finite sequence of operations depending on the complexity $u_i, i = 1,...,n$.

Members of the watchkeeping duty *W* and *M* are divided into interacting groups $W_1,...,W_{\bar{Q}}$ and $M_1,...,M_{\bar{S}}$ depending on the level of qualification and experience (Figure 3).

This leads to the formation of groups W_R, M_S for completing the tasks *n* and producing results C_i^R, $\bar{C}_i^S$.

Creating the model.

To describe the model, let us set: the set of *I* different groups of interaction between the watchkeeping members; the numbers $N^Q, Q \in I$ of these groups; the set $H = \{\psi\}$ of possible interaction types, where $\psi = \langle Q(1,\psi),...,Q(m(\psi),\psi)\rangle$, $m(\psi)$ – the number of interactions participants ψ, $Q(i,\psi) \in I$ is the group to which the participant with the number *i* belongs; function $\vartheta(\psi)$, indicating for $\psi \in H$, the performance value of the micro-tasks, united into interaction ψ.

Let us denote the type of interaction corresponding to the individual member of the watch Q, who is not united with anyone using $\langle Q \rangle$ (Figure 4).

At the same time he can be a deck officer with high experience, who ignores the watchkeeping members or an unclaimed watchkeeping member due to low qualification, then $\forall Q \in I \langle Q \rangle \in H$, $\vartheta(\langle Q \rangle) = 0$.

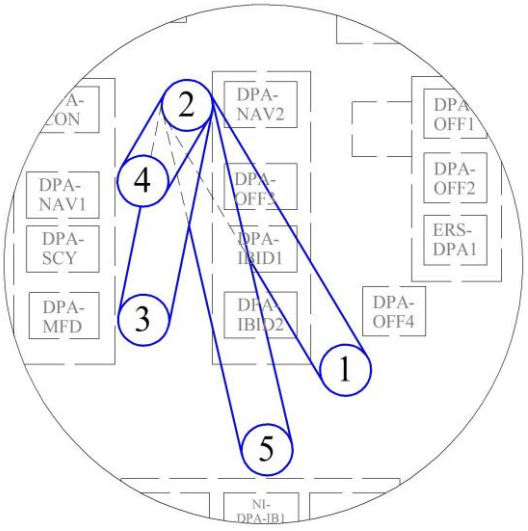


Fig. 2. Planned interaction of the navigators

In this situation the following condition will be true:

$$H = \{\langle Q \rangle, Q \in I\} \cup \cup \{\langle W_R, M_S \rangle, R = 1,...,\bar{Q}, S = 1,...,\bar{S}\}$$

when $I = \{W_1,...,W_{\bar{Q}}, M_1,...,M_{\bar{S}}\}$. Proceeding from the desire of watch members to maximize the vessel controllability, it is natural to assume that when the participants from the groups W_R, M_S unite, they will give the following result:

$$i \to \max_{j=1,...,n} \left(u_j - C_j^R - \bar{C}_j^S\right) \text{ i.e. } \vartheta(\langle W_R, M_S \rangle).$$

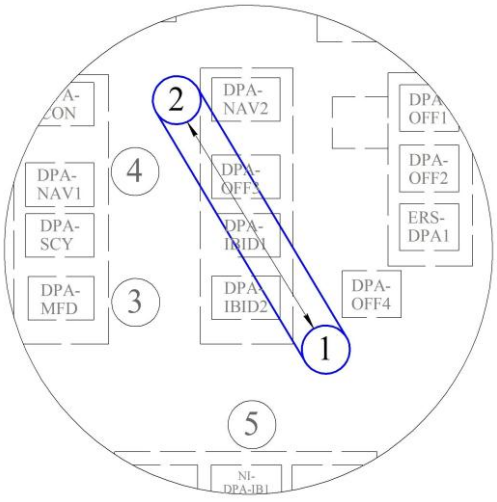


Fig. 3. Interaction of the captain and the first mate

doi: 10.15802/stp2018/147937
© P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

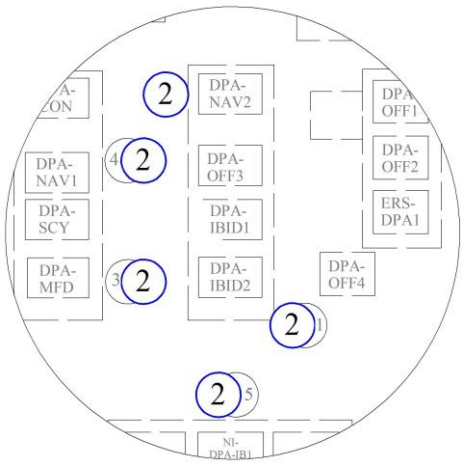


Fig. 4. Doubling of members of the watchkeeping service

The situation when (Q) is a deck officer is fully justified in the conditions of passages with minimal risk, however, in the conditions of complex maneuvering this can lead to serious negative consequences. The case when (Q) is a member of the personnel on duty, whose skills are not trusted by the captain, is unlikely.

Based on Figure 4, the reduction in the safety level can be preceded by the duplication of the functions of the watchkeeping personnel by the watch officer. Even in situations when the maneuver was carried out successfully, the loss of experience by the personnel on duty due to inaction will subsequently lead to negative consequences.

This is justified in cases when the watch officer needs the support of a more experienced navigator, and the acting member of the watchkeeping service does not cope with the task in the allotted time. In such cases, there are unforeseen collisions in the source information for decision-making, uncoordinated actions are possible and as a consequence, the safety level decrease.

Findings

Initial conditions of the experiment: a team of five men is formed (captain, 1st-3rd mate and boatswain). Before start of the course plotting, the captain instructs on the peculiarities of the terrain and traffic congestion of sea transport (Figure 5).

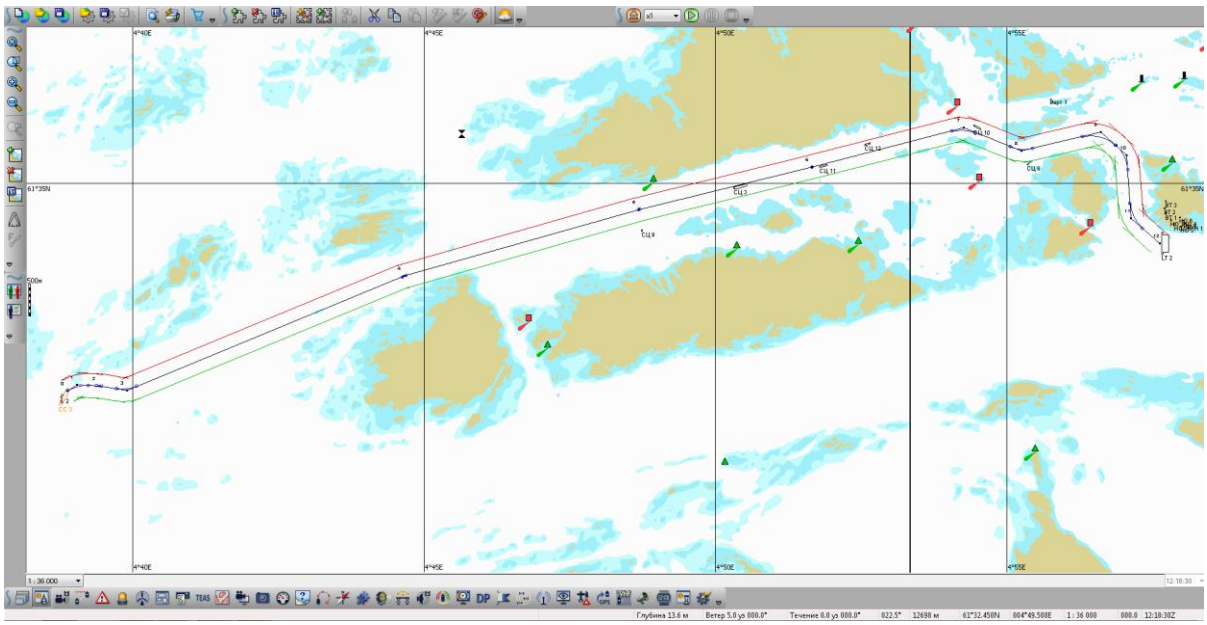


Fig. 5. Vessel's transition path to locations

We describe the interaction of team members formally. Then, N_Q when $Q=1,...,\bar{Q}$ and $\tilde{N}_S$ when $S=1,...,\bar{S}$ – we will take as the numbers of interaction groups of the personnel on duty with varying qualification in order if its descent.

Analyzing videomaterials on task completion by the watchkeeping members shows that the function of the micro-task performance $\vartheta\left(\langle W_Q, M_S\rangle\right)$ decreases monotonically with respect to Q and S, i.e. there is a performance increase due to the par-

doi: 10.15802/stp2018/147937
© P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

ticipation of more qualified member of the watch.

In order to identify location of the members of the watchkeeping service, a computer program was developed that captures their local displacements and synchronizes with the moments of taking managerial decisions.

To determine the location of team members, a three-component system consisting of beacons, wearable sensors and a server is used. Beacons M_i, ($i \in (1..m)$), are BLE transmitters (Bluetooth Low Energy), that use the Arduino technology in conjunction with the AT-09 BLE module. Wearable sensors D_k($k \in (1..d)$) use the Arduino Mega 2560 plate, heart rate sensor, temperature sensor and the ESP8266 Wi-Fi module.

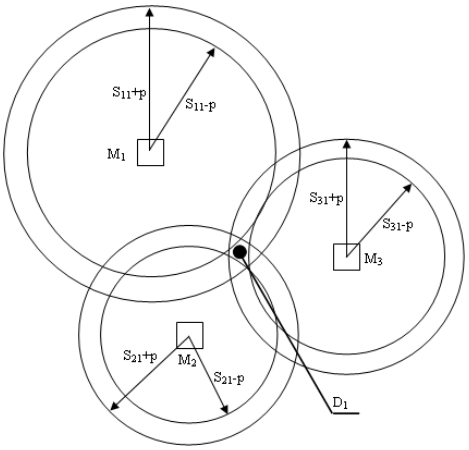


Fig. 6. The scheme for determining the position of the object from distances

All beacons and sensors have their own batteries, which makes them autonomous. D_k sensors connect to all beacons Mi by turn and accept from them the packet time T_{pac}. Based on T_{pac} the distance S_{ik} between the beacon M_i and the sensor D_k is determined with some error p. For unique determination of the location coordinates of the object with sensor, it is necessary to obtain information from at least three beacons.

Increase in the number of beacons will lead to increase in the determination accuracy of the indications. The server receives the data on distance, as well as data from temperature and heart rate sensors over the Wi-Fi network. Also in its memory are written the coordinates of all installed BLE-beacons, which allows accumulating in its database (DB) the coordinates of the object in real time (Figure 6).

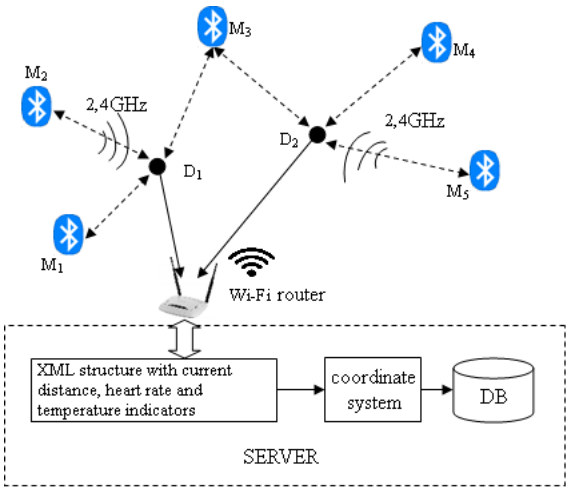


Fig. 7. General scheme of the system operation

Beacons M_i can be placed at different heights, as well as the wearable sensors D_k. Given this fact, there will be an intersection of three spheres. The common part of the intersection will determine the object location with a certain sensor. Increasing the number of beacons will help avoid blind spots and increase the accuracy of the indications.

A special program is installed on the server, which registers the movements of all team members with the connected sensors. All their parameters (coordinates, heart rate and temperature) are stored every few seconds in the database. It is possible to view all movements of team members for conducting behavioral analysis.

The general scheme of the system operation is shown in Figure 7.

The software and hardware complex allows identifying not only the location of members of the watchkeeping service, but also physiological characteristics, such as heart rate and body temperature. These characteristics may indicate the level of stress and mental state of navigators (Figure 8).

Also, in the photo (9) during the experiment it is clear that the small experience of the third mate and the uncertainty in the actions attract the attention of the first mate, who subsequently makes the decision, independently replacing the third mate.

Thus, there is a situation: $\forall L\, \vartheta\left(W_{Q-1}, M_S\right) - \vartheta\left(W_Q, M_S\right) \Uparrow S$, i.e. maneuverability due to the involvement of a more qualified member of the watch grows faster. Thus, we assume that there are navigators $W_{\bar{Q}+1}$ and $M_{\bar{S}+1}$ of the lowest experience and qualification.

doi: 10.15802/stp2018/147937
© P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

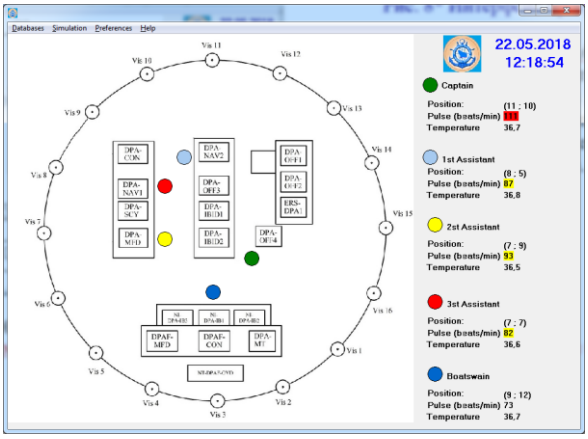


Fig. 8. Program interface

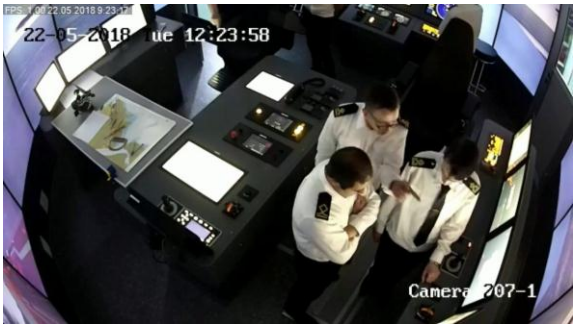


Fig. 9. Doubling of the navigator

$$\sum_{Q=1}^{\bar{Q}+1} N_Q = \sum_{S=1}^{\bar{S}+1} \tilde{N}_S :$$

$$\vartheta\left(W_Q, M_{\tilde{S}+1}\right) = \vartheta\left(W_{Q+1}, M_{\tilde{S}}\right) < 0 \forall Q, S$$

During the experiment, we define combinations $Q(S)$ and $S(Q)$ of interactions between the watchkeeping members from the conditions:

$$\sum_{Q=1}^{Q(S)-1} N_Q < \sum_{z=1}^{S} \tilde{N}_z < \sum_{Q=1}^{Q(S)} N_Q ,$$

$$\sum_{S=1}^{S(Q)-1} \tilde{N}_S < \sum_{z=1}^{Q} N_z < \sum_{S=1}^{S(Q)} N_S$$

While: $Q = 1,...,\bar{Q}$, $S = 1,...,\bar{S}$.

The most preferred interactions at the time of watchkeeping are of the most experienced members of the watchkeeping service in order of descending qualification, which confirms the existing problem. In this case, two options are possible:

1. For $\tilde{S}\ \vartheta\left(W_{Q(\tilde{S})}, M_{\tilde{S}}\right) > 0 > \vartheta\left(W_{Q(\tilde{S})}, M_{\tilde{S}+1}\right)$ deck officer 1,…, $\tilde{S}$ is organized into a conversational interaction pair with the watchkeeping member 1,…, $Q\left(\tilde{S}\right)-1$, i.e. an experienced deck officer and unexperienced watchkeeping member. According to the experiment, at a certain time, the deck officer begins to make decisions on his own (Figure 9).

2. For $Q\left(\tilde{S}\right), Q(S)$ – is the least experienced deck officer with which the experienced member of the watchkeeping duty S interacts, i.e. members of the watchkeeping duty from the group $S+1$ are united when $S < \tilde{S}$, similarly: $S(Q)$ when $Q < Q\left(\tilde{S}\right)$; values $p_Q, Q = 1,...,\bar{Q}$, $\tilde{p}_S, S = 1,...,\bar{S}$ are determined from the following condition: $p_Q = \tilde{p}_S = 0$ when $Q \geq Q\left(\tilde{S}\right), S > \tilde{S}$, $\tilde{p}_S = \vartheta\left(W_{Q(S)}, M_S\right) - p_{Q(S)}$ and $p_Q = \vartheta\left(W_Q, M_{S(Q)}\right) - p_{S(Q)}$ when $S \leq \tilde{S}, Q < Q\left(\tilde{S}\right)$. In situations when Q and S are interchanged, the following is applied:

$$\tilde{Q} \leq \bar{Q}\ \ \vartheta\left(W_{\tilde{Q}}, M_{S(\tilde{Q})}\right) > 0 > \vartheta\left(W_{\tilde{Q}+1}, M_{S(\tilde{Q})}\right).$$

From formal expressions it follows that the most experienced navigators tend to interact with also more qualified members of the watchkeeping duty, in particular, avoiding interaction with unexperienced personnel. In normal circumstances, this does not carry a high risk. However, when performing complex maneuvers, the intensity and content of the information flow from the watchkeeping personnel increases significantly and consequently requires more participation of all members of the watch without exception.

Uncoordinated actions and violation of instructions in the interaction between members of the watchkeeping personnel greatly overloads the navigators' perception, which reduces the safety level of the vessel control. So in the course of the experiment (problem variant No. 2), an abnormal emergency occurred in such a chronology:

1. 13:11:19 – Stop the engine;

2. 13:12:57 – Emergency anchoring for breaking, full astern.

3. 13:13:13 – Touched the ground at the speed of 2.2 knots (Fig. 10).

doi: 10.15802/stp2018/147937

© P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

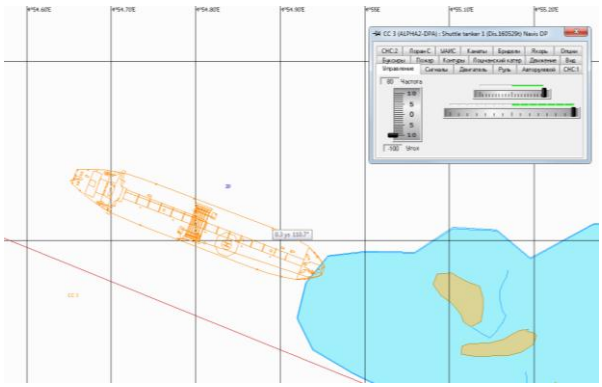


Fig. 10. Catastrophic situation

It should be taken into account that the indicated situations and their formal models are not situational, but have a vector of development and change the structure with discrete time.

Thus, the set $I=\{1,...,m\}$ $I=\{1,...,m\}$ of interactions and the sets J^Q of behavior strategies for each interaction $Q\in I$ are given in the model under study. So, from task to task the model is a cycle (passage) of periods t = 0, 1, 2, … , in each of them interaction between members of the watchkeeping duty occurs. Moreover, each watch Q is divided in a given transition t into subgroups $(Q,j)(t)$, $j\in J^Q$, according to strategies in a given period, therefore, the subgroups are represented as $N_j^Q(t)$, and its number in the designated period is $N^Q(t)$.

The behavior of watch members Q forms $\xi^Q(t)=\left(\xi_j^Q(t)=\dfrac{N_j^Q(t)}{N^Q(t),\ j\in J^Q}\right)$- distribution by strategy, and the cumulative behavior of watchmen in the given period is described by the set $\xi(t)=\left(\xi^Q(t), Q\in I\right)$.

The result of the interaction in the period t is characterized by the vector $f(t)=\left(f_j^Q(t)\right), Q\in I,\ j\in J^Q$, where f_j^Q defines the outcome of the solution of the micro-problem for the group (Q,j). Next it is necessary to indicate the dependence of f_j^Q f_j^Q on the conditions in the form of a distribution according to strategies of behavior – $\xi(t)$; weather conditions, visibility, intensity of navigation, proximity to navigational hazards – $z(t)$, as well as technical parameters whose totality is denoted by $q(t)$. This totality can include the numbers $N^L(t)$, time t, etc. Thus, the behavior of the watchkeeping duty in the long term will be described by the following dependence:

$$\xi(t+1)=G\left(\left\{\xi(\tau), f(\tau), z(\tau), q(\tau)\right\}_{\tau\le t}\right)$$

In real conditions, the composition of the watch duty $Q\in I$ is constant, in turn, members of the watchkeeping duty change their strategies depending on the tasks, adapting to the conditions of interaction with the aim of maximizing $f_j^Q(t)$. During the duty, each watch member compares the strategy i and the strategy j with respect to the interaction partner, possibly subconsciously choosing the more effective one: $f_j^Q(t)>f_i^Q(t)$ regardless of the composition of the watch.

The performance loss from the initially chosen strategy i, leads to the choice of strategy j.

This is a significant problem because individual members of the team will form stable coalition relationships of interactions, which violates the watchkeeping instructions.

In the conditions that the recruitment of the watch-keeping personnel on a vessel is of an accidental nature, we get:

$$u\left(f_j^Q(t)-f_i^Q(t)\right), u(0)=0$$

Then:

$$N_i^Q(t+1)=$$

$$=\sum_{r\in J}u\left(f_i^Q(t)-f_r^Q(t)\right)N_r^Q(t)N_i^Q(t)\Big/N^Q$$

The forecast of the state of carrying the watch on the passage at time $t+1$ will be:

$$\xi_i^Q(t+1)=\sum_r u\left(f_i^Q(t)-f_r^Q(t)\right)\xi_r^Q(t),\ i\in J^Q.$$

Thus, there is a problem of inconsistency and spontaneous replacement of the watchkeeping personnel by the mate, which violates the instructions and reduces the safety level. During simulator practice is an imbalance in training useful skills among cadets during the training practice. Passive members of the watchkeeping service do not learn

doi: 10.15802/stp2018/147937

© P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

the necessary practical skills, but active ones do this in overabundance.

The situation is complicated by the fact that for the laying and passage of a new route the composition of the watch team is formed randomly and there is a possibility of recruiting cadets who do not have the necessary skills, which will lead to the task failure.

When maneuvers are carried out in real conditions, the security threat increases significantly and can lead to catastrophic consequences.

In order to clarify the facts of the negative manifestation of the human factor, it is recommended to use the means of diagnosing the psycho-emotional state of navigators in the form of Smart Watch. Synchronization of data from Smart Watch is displayed in the program interface (Fig. 8.). Complex use of software and hardware will allow the most accurate localization of individual human factor manifestations in maritime transport.

Originality and practical value

The authors for the first time developed software and hardware for analyzing the movements of members of the watchkeeping service, allowing identifying violations of safety regulations. As a result, a hardware-software complex for identifying the location and psychophysiological parameters of navigators was developed. Exceeding the temperature and heart rate of navigators, as well as fast moving of individual members of the watchkeeping service to the positions of other team members, testifies the violation of watchkeeping instructions. The automatic identification of these manifestations will prevent the negative manifestations of the human factor of the team, both in the course of simulator practice, and in the real situation.

Conclusions

Based on the results of the simulation, it can be concluded that, regardless of the composition and functional duties of the watchkeeping personnel, navigators with the highest qualifications tend to interact with the most experienced members of the watch, which significantly affects the safety level in maritime transport. However, the selection of the team consisting of the most qualified and experienced navigators in practice are not possible. The developed software and hardware complex will allow preventing undesirable interactions and objectively assessing the fulfillment of tasks by cadets during the simulator practice. It will also be possible to classify and form the members of the watchkeeping service in relation to the same qualifications, which will reduce the risk of unwanted interactions.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бень, А. П. Людський фактор в автоматизованих системах управління судном та шляхи зниження його впливу / А. П. Бень // Наук. вісн. Херсон. держ. морс. акад. – 2012. – № 2 (7). – С. 26–30.
2. Каминский, В. Ю. Методика учёта профессионально-ценностного аспекта действий судоводителя во время тренажёрной подготовки / В. Ю. Каминский, М. Л. Маринов, Д. А. Скороходов // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – Т. 1, № 1 (39). – С. 209–214.
3. Косенко, Ю. І. Система ідентифікації функціональної ентропії суб'єкта критичної інфраструктури / Ю. І. Косенко, С. В. Рослякова, П. С. Носов // Современные направления теоретических и прикладных исследований : сб. науч. тр. по матер. Междунар. науч.-практ. интернет-конф. (19–30 марта 2013 г.). – Одеса, 2013. – Т. 8 : Технические науки. – С. 50–54.
4. A new hybrid approach to human error probability quantification–applications in maritime operations / Y. T. Xi, Z. L. Yang, Q. G. Fang, W. J. Chen, J. Wang // Ocean Engineering. – 2017. – Vol. 138. – P. 45–54. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.018
5. Arslan, O. Effects of Fatigue on Navigation Officers and SWOT Analyze for Reducing Fatigue Related Human Errors on Board / O. Arslan, I. D. Er // TransNav, the Intern. Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2007. – Vol. 1, No. 3. – P. 345–349.
6. Berg, H. P. Human Factors and Safety Culture in Maritime Safety (revised) / H. P. Berg // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2013. – Vol. 7. – Iss. 3. – P. 343–352. doi: 10.12716/1001.07.03.04
7. Can We Learn from Aviation: Safety Enhancements in Transport by Achieving Human Orientated Resilient Shipping Environment / O. Turan, R. E. Kurt, V. Arslan [et al.] // Transportation Research Procedia. – 2016. – Vol. 14. – P. 1669–1678. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.132

doi: 10.15802/stp2018/147937 © P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

8. Dixena, D. Application of Case-Based Reasoning for Ship turning Emergency to prevent Collision / D. Dixena, B. Chakraborty, N. Debnath // 9th IEEE Intern.l Conference on Industrial Informatics (26–29 July 2011). – Lisbon, 2011. doi: 10.1109/indin.2011.6034956
9. Flow networks: A characterization of geophysical fluid transport / Enrico Ser-Giacomi, Vincent Rossi, Cristóbal López, Emilio Hernández-García // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. – 2015. – Vol. 25. – Iss. 3. doi: 10.1063/1.4908231
10. Jech, T. Set theory / T. Jech. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 1997. – 243 p. doi: 10.1007/3-540-44761-X
11. Lazarowska, A. Safe ship control method with the use of ant colony optimization / A. Lazarowska // Solid State Phenomena. – 2014. – Vol. 210. – P. 234–244. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.210.234
12. Magnus, W. Combinatorial group theory: presentation of groups in terms of generators and relations / W. Magnus, A. Karrass, D. Solitar. – New York : Dover Publications. – 1976. – 464 p.
13. Osekowska, E. Potential Fields in Modeling Transport over Water / E. Osekowska, S. Axelsson, B. Carlsson // Transport of Water versus Transport over Water. – Cham : Springer, 2015. – P. 259–280. doi: 10.1007/978-3-319-16133-4_14
14. Özdemir, Ü. Strategic approach model for investigating the cause of maritime accidents / Ü. Özdemir, A. Güneroğlu // PROMET-Traffic&Transportation. – 2015. – Vol. 27. – Iss. 2. – P. 113–123. doi: 10.7307/ptt.v27i2.1461
15. The Psychological General Well-Being Index (PGWBI) for assessing stress of seafarers on board merchant ships / A. Carotenuto, M. F. Angiola, M. Ivana, F. Sibilio, A. Saturnino, E. Traini, F. Amenta // International Maritime Health. – 2013. – Vol. 64. – Iss. 4. – P. 215–220. doi: 10.5603/IMH.2013.0007
16. Understanding the outcome in the chinese changjiang disaster in 2015: a retrospective study / C. Yang, J. Gao, J. Du, H. Y. Wang, J. X. Jiang, Z. G. Wang // The Journal of Emergency Medicine. – 2017. – Vol. 52. – Iss. 2. – P. 197–204. doi: 10.1016/j.jemermed.2016.08.013
17. Zhang, L. Analyzing Human Error in Maritime Transportation in China Based on Game Theory / L. Zhang, J. Lu, Y. Ai // Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering). – 2014. – Vol. 6. – P. 1282–1290. doi: 10.3963/j.issn.2095-3844.2014.06.022

П. С. НОСОВ[1*], І. В. ПАЛАМАРЧУК[2*], М. С. САФОНОВ[3*], В. І. НОВИКОВ[4*]

[1*]Каф. «Судноводіння та електронні навігаційні системи», Херсонська державна морська академія, просп. Ушакова, 20, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (050) 909 06 08, ел. пошта pason@ukr.net, ORCID 0000-0002-5067-9766
[2*]Каф. «Судноводіння та електронні навігаційні системи», Херсонська державна морська академія, просп. Ушакова, 20, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (050) 909 06 08, ел. пошта pason@ukr.net, ORCID 0000-0001-9161-1592
[3*]Каф. «Комп'ютерна інженерія та інженерія програмного забезпечення», Одеський національний політехнічний університет, Херсонський політехнічний коледж, вул. Небесної сотні, 23, Херсон, Україна, 73000, тел. +38 (066) 245 81 85, ел. пошта nemko85@gmail.com, ORCID 0000-0001-9742-8270
[4*]Каф. «Суднове машинобудування й енергетика», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсонська філія, просп. Ушакова, 44, Херсон, Україна, 73022, тел. +38 (095) 365 67 08, ел. пошта vertigogo@i.ua, ORCID 0000-0002-1823-4919

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЯВІВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА У КОМАНДИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Мета. У статті передбачається дослідити траєкторії переміщення членів вахтової команди на морському транспорті, що призводять до зниження рівня безпеки. Метою дослідження є розробка формального апарату, а також програмно-апаратних засобів ідентифікації розташування членів вахтової команди під час виконання складних маневрів. **Методика.** У ході побудови математичної моделі були розглянуті найбільш поширені схеми взаємодії членів вахти в момент виконання складних маневрів. Загальна задача була розглянута як серія вахтових взаємодій для вирішення мікрозадач управління судном на певний момент. У результаті імітаційного моделювання визначено, що ключову роль виконує перший помічник капітана, який з найбільшою ймовірністю схильний відхилитися від інструкцій через надмірну активність або пасивність у діях. Також розглянуті моделі взаємодії членів вахтової служби в рамках багатоденного переходу судна. **Результати.** Дослідження свідчить, що утворення сталих взаємодій залежить від рівня досвіду й кваліфікації членів вахтової служби. Надмірно активне переміщення помічника капітана, а також дублювання функцій окремих членів вахтової служби негативно впливає на рівень безпеки під час управління судном. Запро-

doi: 10.15802/stp2018/147937 © P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

поновано програмно-апаратні засоби, що дозволяють ідентифікувати розташування й переміщення членів вахтової команди, які призводять до відхилень від інструкцій несення вахти на морському транспорті. **Наукова новизна.** Уперше були розроблені програмно-апаратні засоби для аналізу переміщень членів вахтової служби, що дозволяють ідентифікувати порушення посадових інструкцій. **Практична значимість.** На основі розроблених програмно-апаратних засобів ідентифікації розташування й переміщення членів вахтової команди з'являється можливість більш ефективно оцінювати дії курсантів-судноводіїв під час проходження практики на базі навігаційного тренажера NTPRO 5000 у Херсонській державній морській академії, Україна. Ці дослідження також можуть бути корисними під час вивчення дисципліни «Організація дій екіпажу в екстремальних умовах».

Ключові слова: людський фактор; модель поведінки; взаємодія членів команди; позаштатні ситуації

П. С. НОСОВ[1*], И. В. ПАЛАМАРЧУК[2*], М. С. САФОНОВ[3*], В. И. НОВИКОВ[4*]

[1*]Каф. «Судовождение и электронные навигационные системы», Херсонская государственная морская академия, просп. Ушакова, 20, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (050) 909 06 08, эл. почта pason@ukr.net, ORCID 0000-0002-5067-9766

[2*]Каф. «Судовождение и электронные навигационные системы», Херсонская государственная морская академия, просп. Ушакова, 20, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (050) 909 06 08, эл. почта pason@ukr.net, ORCID 0000-0001-9161-1592

[3*]Каф. «Компьютерная инженерия и инженерия программного обеспечения», Одесский национальный политехнический университет, Херсонский политехнический колледж, ул. Небесной сотни, 23, Херсон, Украина, 73000, тел. +38 (066) 245 81 85, эл. почта nemko85@gmail.com, ORCID 0000-0001-9742-8270

[4*]Каф. «Судовое машиностроение и энергетика», Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Херсонский филиал, просп. Ушакова, 44, Херсон, Украина, 73022, тел. +38 (095) 365 67 08, эл. почта vertigogo@i.ua, ORCID 0000-0002-1823-4919

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА У КОМАНДЫ МОРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Цель. В статье предполагается исследовать траектории перемещения членов вахтенной команды на морском транспорте, приводящие к снижению уровня безопасности. Целью исследования является разработка формального аппарата, а также программно-аппаратных средств идентификации расположения членов вахтенной команды во время выполнения сложных маневров. **Методика.** В ходе построения математической модели были рассмотрены наиболее распространенные схемы взаимодействия членов вахты в момент выполнения сложных маневров. Общая задача была рассмотрена как серия вахтенных взаимодействий для решения микрозадач управления судном на определенный момент. В результате имитационного моделирования определено, что ключевую роль выполняет первый помощник капитана, который с наибольшей вероятностью подвержен отклониться от инструкций ввиду чрезмерной активности или пассивности в действиях. Также рассмотрены модели взаимодействия членов вахтенной службы в рамках многодневного перехода судна. **Результаты.** Исследование свидетельствует, что образование устоявшихся взаимодействий зависит от уровня опыта и квалификации членов вахтенной службы. Чрезмерно активное перемещение помощника капитана, а также дублирование функций отдельных членов вахтенной службы негативно влияет на уровень безопасности при управлении судном. Предложены программно-аппаратные средства, позволяющие идентифицировать расположение и перемещение членов вахтенной команды, указывающие на отклонения от инструкций несения вахты на морском транспорте. **Научная новизна.** Впервые разработаны программно-аппаратные средства для анализа перемещений членов вахтенной службы, позволяющие идентифицировать нарушения должностных инструкций. **Практическая значимость.** На основе разработанных программно-аппаратных средств идентификации расположения и перемещения членов вахтенной команды появляется возможность более эффективно оценивать действия курсантов-судоводителей при прохождении практики на базе навигационного тренажера NTPRO 5000 в Херсонской государственной морской академии, Украина. Данные исследования также могут быть полезными при изучении дисциплины «Организация действий экипажа в экстремальных условиях».

Ключевые слова: человеческий фактор; модель поведения; взаимодействие членов команды; внештатные ситуации

doi: 10.15802/stp2018/147937 © P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

REFERENCES

1. Ben, A. P. (2012). Liudskyi faktor v avtomatyzovanykh systemakh upravlinnia sudnom ta shliakhy znyzhennia yoho vplyvu. *The Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy, 2(7),* 26-30. (in Ukranian)
2. Kaminsky, V. Y. (2018). The treatment of professional-value aspect of action navigators during simulator training. *Marine Intellectual Ttechnologies, 1(39),* 209-214. (in Russian)
3. Kosenko, Y. I., Rosliakova, S. V., & Nosov, P. S. (2013). Systema identyfikatsii funktsionalnoi entropii sub'iekta krytychnoi infrastruktury. *Sovremennye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy: Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy Internet-konferentsii (19–30 marta 2013 g.*). (pp. 50-54). Odessa. (in Ukranian)
4. Xi, Y. T., Yang, Z. L., Fang, Q. G., Chen, W. J., & Wang, J. (2017). A new hybrid approach to human error probability quantification–applications in maritime operations. *Ocean Engineering, 138,* 45-54. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.018 (in English)
5. Arslan, O. (2007). Effects of Fatigue on Navigation Officers and SWOT Analyze for Reducing Fatigue Related Human Errors on Board. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 1(3).* 345-349. (in English)
6. Berg, H. P. (2013). Human Factors and Safety Culture in Maritime Safety (revised). *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 7(3),* 343-352. doi: 10.12716/1001.07.03.04 (in English)
7. Turan, O., Kurt, R. E., Arslan, V., Silvagni, S., Ducci, M., Liston, P., … Papadakis, G. (2016). Can We Learn from Aviation: Safety Enhancements in Transport by Achieving Human Orientated Resilient Shipping Environment. *Transportation Research Procedia, 14,* 1669-1678. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.132 (in English)
8. Dixena, D., Chakraborty, B., & Debnath, N. (2011). Application of Case-based reasoning for ship turning emergency to prevent collision. *2011 9th IEEE International Conference on Industrial Informatics*. Lisbon. doi: 10.1109/indin.2011.6034956 (in English)
9. Ser-Giacomi, E., Rossi, V., López, C., & Hernández-García, E. (2015). Flow networks: A characterization of geophysical fluid transport. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 25(3).* doi: 10.1063/1.4908231 (in English)
10. Jech, T. (2003). Set Theory. Berlin; Heidelberg: Springer. doi: 10.1007/3-540-44761-X (in English)
11. Lazarowska, A. (2013). Safe Ship Control Method with the Use of Ant Colony Optimization. *Solid State Phenomena, 210,* 234-244. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.210.234 (in English)
12. Magnus, W., Karrass, A., & Solitar, D. (1976). Combinatorial group theory: presentation of groups in terms of generators and relations. New York: Dover Publications. (in English)
13. Osekowska, E., Axelsson, S., & Carlsson, B. (2015). Potential Fields in Modeling Transport over Water. *Transport of Water Versus Transport over Water* (pp. 259-280). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-16133-4_14 (in English)
14. Özdemir, Ü., & Güneroğlu, A. (2015). Strategic Approach Model for Investigating the Cause of Maritime Accidents. *PROMET-Traffic&Transportation, 27(2),* 113-123. doi: 10.7307/ptt.v27i2.1461 (in English)
15. Carotenuto, A., Fasanaro, A. M., Molino, I., Sibilio, F., Saturnino, A., Traini, E., & Amenta, F. (2013). The Psychological General Well-Being Index (PGWBI) for assessing stress of seafarers on board merchant ships. *International Maritime Health, 64(4),* 215-220. doi: 10.5603/imh.2013.0007 (in English)
16. Yang, C., Gao, J., Du, J., Wang, H., Jiang, J., & Wang, Z. (2017). Understanding the Outcome in the Chinese Changjiang Disaster in 2015: A Retrospective Study. *The Journal of Emergency Medicine, 52(2),* 197-204. doi: 10.1016/j.jemermed.2016.08.013 (in English)
17. Zhang, L., Lu, J., & Ai, Y. (2014). Analyzing Human Error in Maritime Transportation in China Based on Game Theory. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 6*, 1282-1290. doi: 10.3963/j.issn.2095-3844.2014.06.022 (in English)

Received: March 29, 2016
Accepted: July 29, 2016

doi: 10.15802/stp2018/147937 © P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІ

UDC 629.45.027.3

A. G. REIDEMEISTER[1*], S. I. LEVYTSKA[2*]

[1*]Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail reidemeister.a@gmail.com, ORCID 0000-0001-7490-7180

[2*]Dep. «Foreign Languages», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevsky St., 24 A, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 756 33 56, e-mail svetik23com@ukr.net, ORCID 0000-0001-6725-0280

STABILITY OF MOTION OF RAILWAY VEHICLES DESCRIBED WITH LAGRANGE EQUATIONS OF THE FIRST KIND

Purpose. The article aims to estimate the stability of the railway vehicle motion, whose oscillations are described by Lagrange equations of the first kind under the assumption that there are no nonlinearities with discontinuities of the right-hand sides. **Methodology.** The study is based on the Lyapunov's stability method of linear approximation. The equations of motion are compiled in a matrix form. The creep forces are calculated in accordance with the Kalker linear theory. Sequential differentiations of the constraint equations reduced the equation system index from 2 to 0. The coefficient matrix eigenvalues of the system obtained in such a way are found by means of the QR-algorithm. In accordance with Lyapunov's criterion of stability in the linear approximation, the motion is stable if the real part of all eigenvalues is negative. The presence of «superfluous» degrees of freedom, which the mechanical system does not have (in whose motion equations there are left only independent coordinates) is not trivial. Herewith the eigenvalues and eigenvectors correspond to these degrees of freedom and have no relation to the stability. In order to find a rule that allows excluding them, we considered several models of a bogie, with rigid and elastic constraints of high rigidity at the nodes. In the limiting case of high rigidities, the results for a system without rigid constraints must coincide with the results for a system with rigid constraints. **Findings.** We carried out the analysis and compared the frequencies (with decrements) and the vibration modes of a three-piece bogie with and without constraints. When analysing the stability of the system with constraints, only those eigenvalues are of interest whose eigenvectors do not break the constraints. The values of these numbers are limits for the eigenvalues of the system, in which rigid constraints are replaced by elastic elements of high rigidity, which allows us to leave the Lyapunov's criterion unchanged. **Originality** consists in the adaptation of Lyapunov's stability method of linear approximation to the case when the equations of railway vehicle motion are written in the form of differential-algebraic Lagrange equations of the first kind. **Practical value.** This written form of the equation of motion makes it possible to simplify the stability study by avoiding the selection of a set of independent generalized coordinates with the subsequent elimination of dependent ones and allows for the coefficient matrix calculation in an easily algorithmized way. Information on the vehicle stability is vitally important, since the truck design must necessarily exclude the loss of stability in the operational speed range.

Keywords: railway vehicle; motion stability; differential-algebraic equations

Introduction

Studies on the railway vehicle motion stability have been under the spotlight since the 1950s. Loss of stability is accompanied by the emergence of large transverse forces that threaten the safety of movement, which prevents from operating cars at high speeds. Among the extensive literature devoted to this issue, we point out [1–14]. In accordance with modern concepts, loss of stability is a very complex phenomenon, which near the critical speeds is described by the subcritical Hopf bifurcation. Up to a certain velocity v_1 there is only one attractor corresponding to a straight-line motion, then a periodic attractor appears, while the original one remains and disappears at the velocity $v_2 > v_1$. At high velocities, chaotic attractors may appear.

doi: 10.15802/stp2018/148023 © A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

There may be cases when they occur already at the velocity v_1 [5]. The following methods of motion stability analysis are used [15]:

1) Linearization of the motion equations (Lyapunov's stability criterion of linear approximation [1]);

2) Quasi-linearization;

3) Galerkin-Urabe method [12, 13] (quasi-linearization by several frequencies, a large amount of computational work is required);

4) «Brute force» method, when one reduces the movement speed and waits for the auto-oscillations to disappear; to determine the unstable limit cycle, one gradually increases the disturbance range [14];

5) Trajectory tracing method (the motion is assumed to be periodic, and the equation $z(0) = z(T)$ is solved; it is not suitable for the study of quasi-periodic and chaotic oscillations).

Despite the obvious unsuitability to analyze the complex picture of the emergence and disappearance of attractors, Lyapunov's stability criterion of linear approximation retains its attractiveness due to its simplicity and ability to do the main thing – to evaluate the critical velocity. It is formulated for the systems that describe ordinary differential equations. In the present paper we will extend it to the systems whose motion is defined by Lagrange differential-algebraic equations (DAE) of the first kind. Nowadays, due to the spread of standard integration programs (for example, DASSL), DAE are increasingly used in modeling railway vehicle oscillations, since they make it possible to do both without dependent generalized coordinates and without replacing rigid constraints between the car parts with high rigidity elastic elements.

Purpose

To estimate the stability of the railway vehicle motion, whose oscillations are described by Lagrange equations of the first kind under the assumption that there are no nonlinearities with discontinuities of the right-hand sides.

Methodology

The structure of the railway vehicle motion equations is as follows:

$$M\ddot{q} + (B+F)\dot{q} + (C+K)q = 0, \qquad (1)$$

(without nonlinear and non-uniform terms describing the movement along a curve). Here q is the generalized coordinate vector; M is the inertial coefficient matrix; C, B are the rigidity and viscosity matrices; K, F are the matrices describing the wheel-rail interaction. Equation (1) is obtained if we remove the dependent generalized coordinates from the vector q using the equations of constraints. When applying the Lagrange equation of the I kind, another approach is used: instead of eliminating the elements of the vector q, they are all remained, the constraint equations are included in the full set of equations describing the system motion, and additional unknowns λ are introduced (in the amount equal to the number of constraint equations) so that all these equations can be solved. The result is the following system of equations:

$$M\ddot{q} + (B+F)\dot{q} + (C+K)q + L^T\lambda = 0; \qquad (2)$$

$$Lq = 0. \qquad (3)$$

The last expression is the equation of the constraints which the mechanical system is subject to. We will assume that the matrix L is constant (depends neither on time nor on system phase coordinates). The system of equations (2) and (3) is linear, so its solution is:

$$\begin{pmatrix} q \\ \lambda \end{pmatrix} = \sum\nolimits_j C_j e^{p_j t} \begin{pmatrix} \gamma_j \\ l_j \end{pmatrix},$$

where the constants C_j are found from the initial conditions. The indices p_j together with nonzero eigenvectors γ_j, l_j are solutions of the equation

$$\begin{pmatrix} Mp_j^2 + (B+F)p_j + (C+K) & L^T \\ L & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_j \\ l_j \end{pmatrix} = 0, \qquad (4)$$

It is possible to understand whether motion is stable or not, by the sign of the real part of the values p_j – if there are positive numbers among them, the motion is stable. It is inconvenient to search for numbers p_j, equating the determinant of the left matrix to zero. Instead, we reformulate the problem so that the indices p_j turn out to be eigenvalues of a certain matrix. From (2) it follows that

$$\ddot{q} = -M^{-1}(B+F)\dot{q} - M^{-1}(C+K)q - M^{-1}L^T\lambda,$$

doi: 10.15802/stp2018/148023
© A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Multiplying the resulting expression by L and using the fact that $Lq = 0$, we get

$$\left(LM^{-1}L^T\right)\lambda = -LM^{-1}\left[(B+F)\dot{q} + (C+K)q\right].$$

The matrix $LM^{-1}L^T$ is non-degenerate (if the constraint coefficient matrix L has less rows than columns, and the rank is equal to the number of rows, which we assume), therefore

$$\lambda = -\left(LM^{-1}L^T\right)^{-1} LM^{-1}\left[(B+F)\dot{q} + (C+K)q\right].$$

Substituting this expression into the original equation, we get

$$\ddot{q} = -QM^{-1}(B+F)\dot{q} - QM^{-1}(C+K)q;$$

$$Q = 1 - M^{-1}L^T\left(LM^{-1}L^T\right)^{-1}L.$$

Thus, the vector of phase coordinates $\begin{pmatrix}\dot{q} & q\end{pmatrix}^T$ satisfies the differential equation

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}\dot{q}\\ q\end{pmatrix} = A\begin{pmatrix}\dot{q}\\ q\end{pmatrix};$$

$$A = \begin{pmatrix}-QM^{-1}(B+F) & -QM^{-1}(C+K)\\ 1 & \end{pmatrix}.$$

The eigenvectors of the matrix A, corresponding to the eigenvalues p_j, has the form $\begin{pmatrix}p_j\gamma_j & \gamma_j\end{pmatrix}^T$. Let us consider how they are related to the eigenvalues and eigenvectors of the original system with constraints, that is, if they satisfy the equation (4) with a suitable choice of the vector of Lagrange multipliers l_j. We will need an obvious correlation $LQ = 0$. Multiplying the left expression by L

$$p_j^2\gamma_j = -QM^{-1}\left[(B+F)p_j + (C+K)\right]\gamma_j, \quad (5)$$

we will get $p_j^2 L\gamma_j = 0$.

Therefore, for nonzero p_j the vector γ_j satisfies the constraint equation $L\gamma_j = 0$. Equation (4) is easy to rewrite as

$$\left[Mp_j^2 + (B+F)p_j + (C+K)\right] - L^T\left(LM^{-1}L^T\right)^{-1}Lp_j^2\gamma_j = 0.$$

Thus, with nonzero p_j the vectors γ_j satisfy the equation (4) with

$$l_j = -\left(LM^{-1}L^T\right)^{-1}Lp_j^2\gamma_j.$$

It is not clear whether the vectors γ_j satisfy the equation (4) for $p_j = 0$, but, since these solutions correspond to constant processes that are of no interest, we will not deal with them.

Thus, the stability condition of the system with constraints is as follows:

$$\left(\forall j, p_j \neq 0\right)\operatorname{Re} p_j < 0,$$

where p_j are eigenvalues of matrix A.

Let us apply the above theory to the study of stability, natural frequencies and vibration modes of a simplified mechanical system consisting of half a car body and a *3*-piece bogie, on which it rests (Fig. 1).

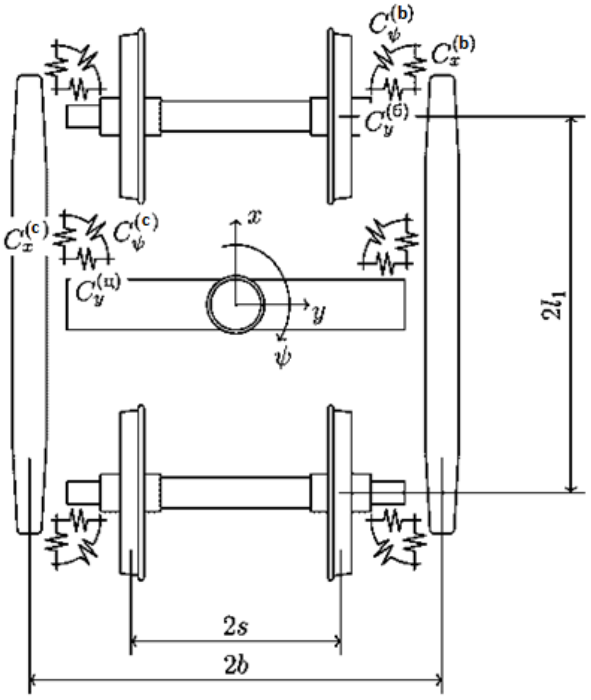


Fig. 1. *3* – piece bogie

doi: 10.15802/stp2018/148023
© A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

We consider the motion only in the horizontal plane. The system consists of (half) the body with a bolster, two side frames and two wheel sets. The body and the bolster are connected by a hinge in the center plate arrangement, the bolster with side frames and the side frames with wheel sets – by elastic elements that prevent relative translational movements in the longitudinal and transverse directions, as well as relative angular movements of hunting of the interacting bodies.

There are no dissipative elements in the system. The degrees of freedom are listed in Table 1. *x*, y, ψ indicate small movements of recoiling, swaying and hunting, for wheel sets the coordinate φ is chosen so that $(-\dot{\varphi})$ is a small deviation of the angular velocity of wheel set rotation relative to its axis from the value V/r (V is the car velocity, r is the wheel radius), corresponding to the undisturbed motion.

Table 1

Degrees of freedom and generalized coordinates

Body	Degrees of freedom	Generalized coordinates
Body with bolster	$x^{(\mathrm{bd})}$, $y^{(\mathrm{bd})}$, $\psi^{(\mathrm{bl})}$	q_1, q_2, q_3
Left side frame ($j=1$)	$x_1^{(\mathrm{sf})}$, $y_1^{(\mathrm{sf})}$, $\psi_1^{(\mathrm{sf})}$	q_4, q_5, q_6
Right side frame ($j=2$)	$x_2^{(\mathrm{sf})}$, $y_2^{(\mathrm{sf})}$, $\psi_2^{(\mathrm{sf})}$	q_8, q_9, q_{10}
First wheel set ($m=1$)	$x_1^{(\mathrm{ws})}$, $y_1^{(\mathrm{ws})}$, $\varphi_1^{(\mathrm{ws})}$, $\psi_1^{(\mathrm{ws})}$	q_{11}, …, q_{13}
Second wheel set ($m=2$)	$x_2^{(\mathrm{ws})}$, $y_2^{(\mathrm{ws})}$, $\varphi_2^{(\mathrm{ws})}$, $\psi_2^{(\mathrm{ws})}$	q_{14}, …, q_{17}

We will be interested in how the frequencies and forms of oscillations of the system without constraints (SF) and systems, whose displacement is subject to the following restrictions, correlate:

SCX – it is prohibited to move the bolster relative to the side frames (in the spring suspension openings) in the longitudinal direction;

SAJ – it is prohibited to move the pedestal openings of the side frames relative to the wheel set axle journals (side frames are pivotally connected to the wheel sets).

As for system parameters, the meaning of the notation for rigidity coefficients and basic dimensions is clear from Figure 1: the letters *m, I* with corresponding indices denote the masses and central moments of body inertia, the coefficients in the expressions for the interaction forces are explained below, the capital letters *X*, *Y*, Ψ denote the force components and the system body interaction force moments. Without giving a complete derivation of the expressions for the matrices *M, L*, etc, let us dwell only on certain points that may be of methodical interest. The elements of the matrix *C* are coefficients for the products of generalized coordinates and their variations in the expression for the virtual work of forces in elastic elements

$$-\delta A^{(\mathrm{el})} = \delta q^T C q . \qquad (6)$$

Let us consider the contribution $C^{(\mathrm{b})}$ to the matrix **C** from the elastic elements that are in axle boxes. The components of the displacement of the side frame pedestal opening relative to the wheel set axle box are combined into a vector

$$r_{mj}^{(\mathrm{b})} = \left(x_{mj}^{(\mathrm{b})} \quad y_{mj}^{(\mathrm{b})} \quad \psi_{mj}^{(\mathrm{b})} \right)^T .$$

They are linear combinations of the generalized coordinates

$$x_{mj}^{(\mathrm{b})} = x_j^{(\mathrm{sf})} - \left(x_m^{(\mathrm{ws})} + Js\psi_m^{(\mathrm{ws})} \right),$$

$$y_{mj}^{(\mathrm{b})} = \left(y_j^{(\mathrm{sf})} + Ml_1\psi_j^{(\mathrm{sf})} \right) - y_m^{(\mathrm{ws})},$$

$$\psi_{mj}^{(\mathrm{b})} = \psi_j^{(\mathrm{sf})} - \psi_m^{(\mathrm{ws})},$$

This means that it is possible to choose such matrices $D_{mj}^{(\mathrm{b})}$ with constant coefficients that

$$r_{mj}^{(\mathrm{b})} = D_{mj}^{(\mathrm{b})} q .$$

doi: 10.15802/stp2018/148023
© A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

The force components in the elastic element are proportional to the vector $r_{mj}^{(\text{b})}$, $F_{mj}^{(\text{b})} = -C_1^{(\text{b})} r_{mj}^{(\text{b})}$,

$$C_1^{(\text{b})} = \begin{pmatrix} C_x^{(\text{b})} & & \\ & C_y^{(\text{b})} & \\ & & C_z^{(\text{b})} \end{pmatrix}$$

The virtual work of the forces $F_{mj}^{(\text{б})}$ is equal to

$$\delta A^{(\text{el, b})} = \sum\nolimits_{m,j} \delta r_{mj}^{(\text{b})T} F_{mj}^{(\text{b})} . \qquad (7)$$

Comparing the expressions (6) and (7), we get: $C = \sum\nolimits_{m,j} D_{mj}^{(\text{b})T} C_1^{(\text{b})} D_{mj}^{(\text{b})} +$ (contributions from other elastic elements).

In order to prohibit linear movements of the pedestal openings of the side frames relative to wheel set axle boxes, it is necessary to require the fulfillment of the conditions:

$$x_{mj}^{(\text{b})} = 0 , \quad y_{mj}^{(\text{b})} = 0 .$$

There are 8 rows in the *L* matrix, which we get by writing the first two rows of each matrix under each other. Thus, the compilation of a system of equations describing the motion of a mechanical system with constraints does not practically require additional calculations – in our case, the matrices $D_{mj}^{(\text{b})}$ were written out at the stage of working with the system without constraints.

The wheel-rail interaction is described by Kalker linear theory [16 par. 2.2.2] with the following simplifications:

1) spin is neglected;

2) the coefficients c_{11}, c_{22} for the longitudinal and transverse directions are considered equal to 3.90.

The expression for longitudinal sliding additionally contains terms proportional to the velocities $\dot{x}_m^{(\text{ws})}$, $\dot{\varphi}_m^{(\text{ws})}$.

$$\varepsilon_{xmj} = \frac{\dot{x}_m^{(\text{ws})} + r\dot{\varphi}_m^{(\text{ws})} + Js\dot{\psi}_m^{(\text{ws})}}{V} + \frac{ny_m^{(\text{ws})}}{r} J ,$$

The expression for transverse sliding retains the usual look

$$\varepsilon_{ymj} = \frac{\dot{y}_m^{(ws)}}{V} - \psi_m^{(ws)} .$$

Findings

Let us consider the results of the calculation of the eigenvalues and eigenvectors describing the 3–piece bogie oscillations. Our goal is to understand how the eigenvalues and eigenvectors of SF system with constraints and SCX and SAJ systems without constraints are related. We expect that the results for SF with $C_x^{(\text{b})} \to \infty$, $C_y^{(\text{b})} \to \infty$ will tend to the results for SAJ, and the results for SF with $C_x^{(\text{b})} \to \infty$ – to the results for SCX. The subject of the study will be the confirmation of this expectation and a detailed description of the limiting transition nature.

The eigenvalues of the matrix *A* for the SF and SAJ systems are listed in Table 2. The system parameters correspond to the 4-axle car loaded up to deadweight capacity on 18–100 bogies (with an axle load of 23.5 tf). The motion speed $V = 100$ km/h.

The eigenvalues were ordered by the QR algorithm, so they can be compared only by values. Even without analyzing the eigenvectors, it is clear that the numbers with $j = 9,\ 11,\ 14$ of the SAJ system are the limits for the eigenvalues $j = 25,\ 27,\ 29$ of the SAF system. It seems plausible to assume that large negative numbers of one system go into large negative numbers of the other system, both systems have five such numbers, but the correspondence between them is not obvious. It is not quite clear which of the numbers of the SF system goes into the number $-6.29 \pm 335i$ of the SAJ system. The numbers $j = 9,\ \ldots,\ 24$ of SF, except for one pair, apparently correspond to the side frame oscillations on the high rigidity elastic elements in the axle boxes, since these numbers have a large imaginary component.

The study of eigenvectors confirms the conclusions made and allows for some refinements. Let us consider the SAJ system with hinges in axle boxes. Equations of constraints do not violate the first 15 eigenvectors:

1, 2) non-physical solutions, which appeared due to the fact that there are no variables $\varphi_m^{(\text{ws})}$ in the equations of motion, there are only their derivatives;

3, 4, 13) extremely rapidly decaying solutions describing the motion of wheel sets against pseudo-slip forces (for example, bogie swaying without hunting);

doi: 10.15802/stp2018/148023
© A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

5, 6) bolster hunting oscillations;

7, 8) the same as 3, 4 – rotation of the wheel sets about their axis without longitudinal displacement;

9, 10) body swaying oscillations (wheel sets also have swaying and hunting oscillations, but the ratio of amplitude values ψ and y is less by about 20% than Klingel solution provides);

11, 12) joint oscillations of the wheel set swaying and hunting (amplitude of body oscillations is less than with the forms 9 and 10);

14, 15) bogie oscillations under the body in the longitudinal direction (spring suspension sets are deformed in the longitudinal direction).

Table 2

Eigenvalues for systems SF, SAJ, and SCX

j	p_j, 1/c	j	p_j, 1/c
SF		SAJ	
1, 2	0	1, 2	0
3	–1800	3	–990
4	–1640	4	–1140
5, 6	–5610	5, 6	–6.29±335i
7	–1790	7	–5040
8	–1650	8	–3900
9, 10	–56.5±585i	9, 10	–2.33±17.3i
11, 12	–38.2±554i	11, 12	1.24±11.9i
13, 14	–11.9±314i	13	–1440
15, 16	–34.1±874i	14, 15	–0.21±91.1i
17, 18	±857i	16, …, 34	0
19, 20	–3.64±638i	SAJ + SCX	
21, 22	±542i	1, 2	0
23, 24	–3.89±315i	3	–4000
25, 26	–2.31±17.1i	4	–3900
27, 28	1.25±11.9i	5	–891
29, 30	–0.21±88.6i	6	–1440
31	–148	7	–1440
32, 33	0	8, 9	–2.33±17.,3i
34	–1.14	10, 11	1.24±11.9i
		12, …, 34	0

For all these vectors, one can find the corresponding eigenvectors of the SF system with close values of the components. Some vectors γ_j are shown in Table 3. The vectors γ_{13}, γ_{27} for a bogie without constraints, with large rigidity of elastic elements in the axle boxes are almost coincide with the vectors γ_5, γ_{11} for a bogie with hinges in boxes. The vector γ_9 (SF) describes the longitudinal oscillations of the side frames relative to the wheel sets, which is incompatible with the constraints to which the SAJ system is subordinate, and it is impossible to find a corresponding vector among the

doi: 10.15802/stp2018/148023
© A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

eigenvectors of the latter. The bogie movement is unstable, the eigenvalues p_{27} (SF) and p_{11} (SAJ) have a positive real part. Wheel sets perform self-oscillations of hunting and swaying (the ratio between the amplitudes y and ψ is as in the Klingel solution), and the body swaying is twice as large as wheel set swaying. Figure 2 shows how the components of the corresponding eigenvector change as rigidity changes $C^{(b)} = C_x^{(b)} = C_y^{(b)}$.

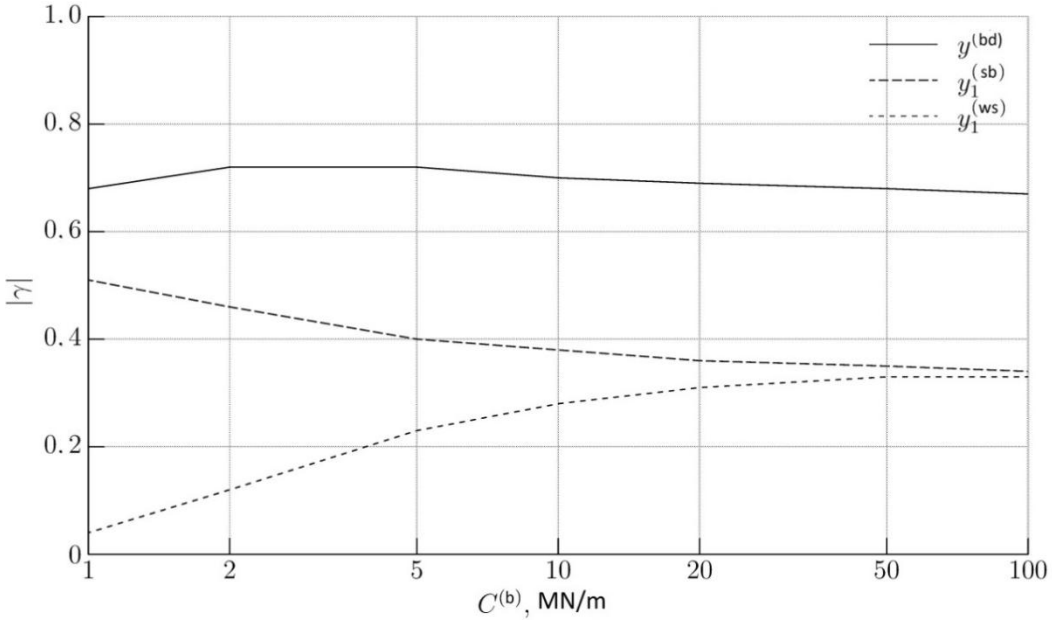


Fig. 2. The principal mode of unstable motion

Table 3

Components of eigenvectors γ_j

Component	SF						SAJ			
	$j=9$		$j=13$		$j=27$		$j=5$		$j=11$	
	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$
$x^{(bd)}$										
$y^{(bd)}$					0.67	–1.47			0.67	–1.47
$\psi^{(bl)}$	0.30	1.19	0.98	–1.61	0.13	0.42	1.00	–1.59	0.13	0.40
$x_1^{(sf)}$	0.65	–1.67	0.13	–2.15	0.13	0.42	0.04	2.82	0.14	0.40
$y_1^{(sf)}$	0.06	–2.82			0.34	–1.26			0.34	–1.26
$\psi_1^{(sf)}$										
$x_2^{(sf)}$	0.65	1.47	0.13	0.99	0.13	–2.73	0.04	–0.33	0.14	–2.74
$y_2^{(sf)}$	0.06	–2.82			0.34	–1.26			0.34	–1.26
$\psi_2^{(sf)}$										
$x_1^{(ws)}$										
$y_1^{(ws)}$	0.02	1.29			0.33	–1.25			0.34	–1.26

doi: 10.15802/stp2018/148023
© A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Continuation of the table 3

Component	SF						SAJ			
	$j=9$		$j=13$		$j=27$		$j=5$		$j=11$	
	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$	$\lvert\gamma\rvert$	$\arg\gamma$
$\varphi_1^{(ws)}$										
$\psi_1^{(ws)}$	0.16	2.88	0.06	2.80	0.13	0.42	0.04	2.82	0.13	0.40
$x_2^{(ws)}$										
$y_2^{(ws)}$	0.02	1.29			0.33	–1.25			0.34	–1.26
$\varphi_2^{(ws)}$										
$\psi_2^{(ws)}$	0.16	2.88	0.06	2.80	0.13	0.42	0.04	2.82	0.13	0.40

If a rigid longitudinal constraint in the spring suspension is added to the hinges in the axle box (Table 2, column SAJ + SCX), then the oscillation patterns 5, 6, 14, 15 in the SAJ system, which are accompanied by deformations of the spring groups in the longitudinal direction will disappear and four more eigenvectors, corresponding to zero eigenvalues and violating equations of constraints, will be. Other eigenvalues will change slightly.

Originality and practical value

Originality consists in the adaptation of Lyapunov's stability method of linear approximation to the case when the equations of railway vehicle motion are written in the form of differential-algebraic Lagrange equations of the first kind. This written form of the equation of motion makes it possible to simplify the stability study by avoiding the selection of a set of independent generalized coordinates with the subsequent elimination of dependent ones and allows for the coefficient matrix calculation in an easily algorithmized way. Information on the vehicle stability is vitally important, since the truck design must necessarily exclude the loss of stability in the operational speed range.

Conclusions

1. An effective method for studying the stability of railway vehicle motion, described by the Lagrange equations of the first kind, has been proposed. Stability criterion – the real numbers of exponential functions that satisfy the equations of motion – should not be greater than zero. The indicators themselves can be found as eigenvalues of a certain matrix *A*, depending on the matrices of physical parameters *M, B, F, C, K* and the matrix of constraint coefficients *L*, using the QR algorithm [2, chapter 4].

2. The eigenvectors of this matrix, corresponding to nonzero eigenvalues, satisfy the equations of constraints. The advantage of the proposed method is the easy algorithmization of the motion equation derivation (no need to choose independent generalized coordinates).

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Деммель, Дж. Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения / Дж. Деммель ; пер. с англ. Х. Д. Икрамова. – Москва : Мир, 2001. – 435 с.
2. Лазарян, В. А. Устойчивость движения рельсовых экипажей / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – Киев : Наук. думка, 1972. – 198 с.
3. Орлова, А. М. Влияние конструктивных схем и параметров тележек на устойчивость, ходовые качества и нагруженность грузовых вагонов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Орлова Анна Михайловна ; Петербург. гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2008. – 32 с.
4. Bigoni, D. Sensitivity analysis of the critical speed in railway vehicle dynamics / D. Bigoni, H. True, A. P. Engsig-Karup // Vehicle System Dynamics. – 2014. – Vol. 54. – Iss. supp1. – P. 272–286. doi: 10.1080/00423114.2014.898776

doi: 10.15802/stp2018/148023 © A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

5. Critical speed of a Korean high-speed train through optimization with measured wheel profiles / C.-S. Jeon, H.-S. Cho, C.-S. Park, S.-W. Kim, T.-W. Park // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2018. – Vol. 232. – Iss. 1. – P. 171–181. doi: 10.1177/0954409716662091
6. Gasch, R. Non-linear bogie hunting / R. Gasch, W. Kik, D. Moelle // Vehicle System Dynamics. – 1981. – Vol. 10. – Iss. 2-3. – P. 145–148. doi: 10.1080/00423118108968657
7. Influence of vehicle parameters on critical hunting speed based on Ruzicka model / D. Cui, Li Li, X. Jin, X. Xiao, J. Ding // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 25. – Iss. 3. – P. 536–542. doi: 10.3901/cjme.2012.03.536
8. Kalker, J. J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact / J. J. Kalker. – Dordrecht : Springer, 1990. – 314 p. doi: 10.1007/978-94-015-7889-9
9. Mao, X. A design method for rail profiles based on the geometric characteristics of wheel-rail contact / X. Mao, G. Chen // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2018. – Vol. 232. – Iss. 5. – P. 1255–1265. doi: 10.1177/0954409717720346
10. Mazzola, L. Evaluation of the hunting behavior of a railway vehicle in a curve / L. Mazzola, S. Alfi, S. Bruni // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2014. – Vol. 229. – Iss. 5. – P. 530–541. doi: 10.1177/0954409713517379
11. Moelle, D. Computation of Limit Cycles of a Wheelset Using a Galerkin Method / D. Moelle, H. Steinborn, R. Gasch // Vehicle System Dynamics. – 1979. – Vol. 8. – Iss. 2-3. – P. 168–171. doi: 10.1080/00423117908968592
12. Molatefi, H. Critical speed and limit cycles in the empty Y25-freight wagon / H. Molatefi, M. Hecht, M. H. Kadivar // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2006. – Vol. 220. – Iss. 4. – P. 347–359. doi: 10.1243/09544097jrrt67
13. Polach, O. Bogie design for better dynamic performance: example of a locomotive bogie / O. Polach // European Railway Review. – 2003. – No. 1. – P. 69–77.
14. Polach, O. Comparison of Methods Analyzing Bifurcation and Hunting of Complex Rail Vehicle Models / O. Polach, I. Kaiser // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. – 2012. – Vol. 7. – Iss. 4. doi: 10.1115/1.4006825
15. Polach, O. Compatibility of the non-linear and linearized stability assessment during railway vehicle design / O. Polach // Vehicle System Dynamics. – 2006. – Vol. 44. – Iss. sup1. – P. 129–138. doi: 10.1080/00423110600869537
16. True, H. The Dynamics of a Railway Freight Wagon Wheelset with Dry Friction Damping / H. True, R. Asmund // Vehicle System Dynamics. – 2002. – Vol. 38. – Iss. 2. – P. 149–163. doi: 10.1076/vesd.38.2.149.5617
17. Xia, F. On the dynamics of the three-piece-freight truck / F. Xia, H. True // Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference. – 2003. – P. 149–159. doi: 10.1109/rrcon.2003.1204661

О. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР[1*], С. І. ЛЕВИЦЬКА[2*]

[1*]Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19,
ел. пошта reidemeister.a@gmail.com, ORCID 0000-0001-7490-7180
[2*]Каф. «Іноземні мови», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24А, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 756 33 56, ел. пошта svetik23com@ukr.net, ORCID 0000-0001-6725-0280

СТІЙКІСТЬ РУХУ ЗАЛІЗНИЧНИХ ЕКІПАЖІВ, ЯКИЙ ОПИСУЮТЬ РІВНЯННЯ ЛАГРАНЖА І РОДУ

Мета. У статті необхідно оцінити стійкість руху залізничних екіпажів, коливання яких описані рівняннями Лагранжа І роду, в припущенні, що відсутні нелінійності з розривами правих частин. **Методика.** За основу прийнято метод дослідження стійкості руху Ляпунова за лінійним наближенням. Рівняння руху складено в матричній формі. Сили кріпа обчислені у відповідності з лінійної теорією Калкера. Послідовними диференціюваннями рівнянь зв'язків індекс системи рівнянь знижений з 2 до 0. Власні числа матриці коефіцієнтів отриманої таким чином системи знайдені за допомогою QR-алгоритму. Відповідно до критерію Ляпунова про стійкість за лінійним наближенням рух стійкий, якщо у всіх власних чисел дійсна частина

doi: 10.15802/stp2018/148023 © A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

негативна. Нетривіальним є наявність «зайвих» ступенів свободи, яких немає у механічної системи (в її рівняннях руху залишили тільки незалежні координати). Цим ступеням свободи відповідають власні числа і власні вектори, що не мають відношення до стійкості. Щоб знайти правило, що дозволяє їх виключити, ми розглянули кілька моделей візків, із жорсткими і пружними зв'язками великої жорсткості у вузлах. У граничному випадку великих жорсткостей результати для системи без жорстких зв'язків повинні співпасти з результатами для системи з жорсткими зв'язками. **Результати.** Проведено аналіз і зіставлені частоти (з декрементом) і форми коливань 3-елементного візка зі зв'язками і без них. При аналізі стійкості системи зі зв'язками становлять інтерес тільки ті власні числа, власні вектори яких не порушують зв'язків. Значення цих чисел є межами для власних чисел системи, в якій жорсткі зв'язки замінені пружними елементами великої жорсткості, що дозволяє залишити критерій Ляпунова незмінним. **Наукова новизна** полягає в адаптації методу дослідження стійкості руху Ляпунова за лінійним наближенням до випадку, коли рівняння руху залізничних екіпажів записані в формі диференційно-алгебраїчних рівнянь Лагранжа І роду. **Практична значимість.** Зазначена форма запису рівняння руху дозволяє спростити дослідження стійкості за рахунок відмови від виділення безлічі незалежних узагальнених координат із наступним виключенням залежних і допускає обчислення матриці коефіцієнтів легко алгоритмізованим способом. Інформація про стійкість екіпажів украй важлива, оскільки конструкція ходових частин повинна в обов'язковому порядку виключати втрату стійкості в експлуатаційному діапазоні швидкостей.

Ключові слова: залізничний екіпаж; стійкість руху; диференційно-алгебраїчні рівняння

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР[1*], С. И. ЛЕВИЦКАЯ[2*]

[1*]Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта reidemeister.a@gmail.com, ORCID 0000-0001-7490-7180

[2*]Каф. «Иностранные языки», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24А, Днипро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 756 33 56, эл. почта svetik23com@ukr.net, ORCID 0000-0001-6725-0280

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ, ОПИСЫВАЕМОГО УРАВНЕНИЯМИ ЛАГРАНЖА I РОДА

Цель. В статье необходимо оценить устойчивость движения железнодорожных экипажей, колебания которых описаны уравнениями Лагранжа I рода, в предположении, что отсутствуют нелинейности с разрывами правых частей. **Методика.** За основу принят метод исследования устойчивости движения Ляпунова по линейному приближению. Уравнения движения составлены в матричной форме. Силы крипа вычислены в соответствии с линейной теорией Калкера. Последовательными дифференцированиями уравнений связей индекс системы уравнений понижен с 2 до 0. Собственные числа матрицы коэффициентов полученной таким образом системы найдены с помощью QR–алгоритма. В соответствии с критерием Ляпунова об устойчивости по линейному приближению движение устойчиво, если у всех собственных чисел действительная часть отрицательна. Нетривиальным является наличие «лишних» степеней свободы, которых нет у механической системы (в ее уравнениях движения оставили только независимые координаты). Этим степеням свободы соответствуют собственные числа и собственные векторы, к устойчивости отношения не имеющие. Чтобы найти правило, позволяющее их исключить, мы рассмотрели несколько моделей тележки, с жесткими и упругими связями большой жесткости в узлах. В предельном случае больших жесткостей результаты для системы без жестких связей должны совпасть с результатами для системы с жесткими связями. **Результаты.** Проведен анализ и сопоставлены частоты (с декрементами) и формы колебаний 3–элементной тележки со связями и без них. При анализе устойчивости системы со связями представляют интерес только те собственные числа, собственные векторы которых не нарушают связей. Значения этих чисел являются пределами для собственных чисел системы, в которой жесткие связи заменены упругими элементами большой жесткости, что позволяет оставить критерий Ляпунова неизменным. **Научная новизна** состоит в адаптации метода исследования устойчивости движения Ляпунова по линейному приближению к случаю, когда уравнения движения железнодорожных экипажей записаны в форме дифференциально-алгебраических уравнений Лагранжа I рода. **Практическая значимость.** Указанная форма записи уравнения движения позволяет упростить исследование устойчивости за счет отказа от выделения множества независимых обобщенных координат с последующим исключением зависимых и допускает вычисление матрицы коэффици-

doi: 10.15802/stp2018/148023 © A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ентов легко алгоритмизируемым способом. Информация об устойчивости экипажей крайне важна, поскольку конструкция ходовых частей должна в обязательном порядке исключать потерю устойчивости в эксплуатационном диапазоне скоростей.

Ключевые слова: железнодорожный экипаж; устойчивость движения; дифференциально-алгебраические уравнения

REFERENCES

1. Demmel, D. (2001). *Vychislitelnaya lineynaya algebra. Teoriya i prilozheniya*. Moscow: Mir. (in Russian)
2. Lazaryan, V. A., Dlugach, L. A., & Korotenko, M. L. (1972). *Ustoychivost dvizheniya relsovykh ekipazhey*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
3. Orlova, A. M. (2008). *Vliyanie konstruktivnykh skhem i parametrov telezhek na ustoychivost, khodovye kachestva i nagruzhennost gruzovykh vagonov*. (Avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk). Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg. (in Russian)
4. Bigoni, D., True, H., & Engsig-Karup, A. P. (2014). Sensitivity analysis of the critical speed in railway vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics, 52(sup1),* 272-286. doi: 10.1080/00423114.2014.898776 (in English)
5. Jeon, C.-S., Cho, H.-S., Park, C.-S., Kim, S.-W., & Park, T.-W. (2018). Critical speed of a Korean high-speed train through optimization with measured wheel profiles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 232(1),* 171-181. doi: 10.1177/0954409716662091 (in English)
6. Gasch, R., Kik, W., & Moelle, D. (1981). Non-Linear Bogie Hunting. *Vehicle System Dynamics, 10(2-3),* 145-148. doi: 10.1080/00423118108968657 (in English)
7. Cui, D., Li, L., Jin, X., Xiao, X., & Ding, J. (2012). Influence of vehicle parameters on critical hunting speed based on Ruzicka model. *Chinese Journal of Mechanical Engineering, 25(3),* 536-542. doi: 10.3901/cjme.2012.03.536 (in English)
8. Kalker, J. J. (1990). Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact. Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-94-015-7889-9 (in English)
9. Mao, X., & Chen, G. (2018). A design method for rail profiles based on the geometric characteristics of wheel-rail contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 232(5),* 1255-1265. doi: 10.1177/0954409717720346 (in English)
10. Mazzola, L., Alfi, S., & Bruni, S. (2014). Evaluation of the hunting behavior of a railway vehicle in a curve. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 229(5),* 530-541. doi: 10.1177/0954409713517379 (in English)
11. Moelle, D., Steinborn, H., & Gasch, R. (1979). Computation of Limit Cycles of a Wheelset Using a Galerkin Method. *Vehicle System Dynamics, 8(2-3),* 168-171. doi: 10.1080/00423117908968592 (in English)
12. Molatefi, H., Hecht, M., & Kadivar, M. H. (2006). Critical speed and limit cycles in the empty Y25-freight wagon. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 220(4),* 347-359. doi: 10.1243/09544097jrrt67 (in English)
13. Polach, O. (2003). Bogie design for better dynamic performance: example of a locomotive bogie. *European Railway Review, 1,* 69-77. (in English)
14. Polach, O., & Kaiser, I. (2012). Comparison of Methods Analyzing Bifurcation and Hunting of Complex Rail Vehicle Models. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 7(4),* 041005. doi: 10.1115/1.4006825 (in English)
15. Polach, O. (2006). Comparability of the non-linear and linearized stability assessment during railway vehicle design. *Vehicle System Dynamics, 44(sup1),* 129-138. doi: 10.1080/00423110600869537 (in English)
16. True, H., & Asmund, R. (2003). The Dynamics of a Railway Freight Wagon Wheelset With Dry Friction Damping. *Vehicle System Dynamics, 38(2),* 149-163. doi: 10.1076/vesd.38.2.149.5617 (in English)
17. Fujie Xia, & True, H. (n.d.). (2003). On the dynamics of the three-piece-freight truck. *Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Railroad Conference*. doi: 10.1109/rrcon.2003.1204661 (in English)

Received: June 25, 2018
Accepted: Oct. 03, 2018

doi: 10.15802/stp2018/148023 © A. G. Reidemeister, S. I. Levytska, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

UDC 629.42.015

V. A. TATARINOVA[1*], J. KALIVODA[2*], L. O. NEDUZHA[3*]

[1*]Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropertovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 728 36 99, e-mail Valentina100vol@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777
[2*]Dep. «Automobiles, Internal Combustion Engines and Railway Vehicles», Czech Technical University, Technicka St., 4, Prague 6, Czech Republic, 16607, tel. +(420) 224 352 493, e-mail jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515
[3*]Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropertovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 810 51 65, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

RESEARCH OF LOCOMOTIVE MECHANICS BEHAVIOR

Purpose. The main purpose of the study is to compare and confirm the results of theoretical studies of locomotive motion along the straight and curved track sections in the set range of operating speeds, which is essential for determining their dynamic qualities. The conducted research complex is one of the prerequisites for improving the reliability of the rolling stock mechanics, in particular the bogie parameters. **Methodology.** The research was carried out by numerical integration of the dynamic loading of a railway vehicle using one of the modern software complexes. In this study we used the mathematical model of locomotive spatial oscillations obtained using Lagrangian equations of the second kind. **Findings.** Authors carried out theoretical research and performed the analysis of the vehicle behavior during the motion along the track section, which in the vertical plane has no geometric defects, and taking into account the inequalities on the example of the main locomotive. The researches were carried out both analytically and with the help of the modern software complex. Comparison of the graphs shows that the results obtained by different methods coincide with sufficient accuracy. **Originality.** Based on the results of many years of work, the authors present the General Classification of Locomotive Mechanics, which may be useful to researchers, who are involved in the assessment of the dynamic qualities of new and upgraded types of rolling stock. **Practical value.** A new licensed modern software complex has been applied, which makes it possible to use it in the design, modeling of units of rolling stock and their elements; during theoretical and experimental studies, comparison of their results. The results of theoretical research can be taken into account for the preliminary research during creating the reliable constructions of a new vehicle, further improvement of the mechanics, modernization of the existing units of rolling stock during field tests.

Keywords: vehicle; rolling stock; locomotive; vehicle mechanics; bogie; software complex

Introduction

Designs of the new generation of traction rolling stock allows to provide its high performance: to reduce power consumption for traction; to reduce the impact on the track at a given load from the wheel set axle on the rails; to improve the working conditions of locomotive crews and passenger comfort; to reduce the emission of harmful substances into the atmosphere, etc. [10, 18, 19, 21].

As is known from the history of rail transport, the mechanics of the first locomotives consisted of a body, wheel sets with bearing units, traction drive, draw gear and brakes (Fig. 1, a). Over time, the design of the mechanics changed several times – its features depended on changing requirements to the traction rolling stock, increased design speed, the locomotive purpose, the type of motion, the need to take into account the growing demand of consumers and many other factors [3, 5, 7, 9, 10, 21–24]. Due to achievements of modern machine building and the development of scientific and technological progress the main components of the mechanics of the first locomotives received significant improvement (Fig. 1, b, c) and railway machinery manufacturers are not ready to rest on the results obtained [8, 10]. Modern locomotives have, as a rule, rotary bogies with one or two stages of spring suspension (elastic and dissipative elements), body-bogie mounting point, elements of the transmission of longitudinal forces between the bogie and the body, quasi-elastic cross-links between them, turn-over fixtures and units for uniform distribution of vertical loads between wheel sets (Fig. 1, c).

doi: 10.15802/stp2018/148026 © V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

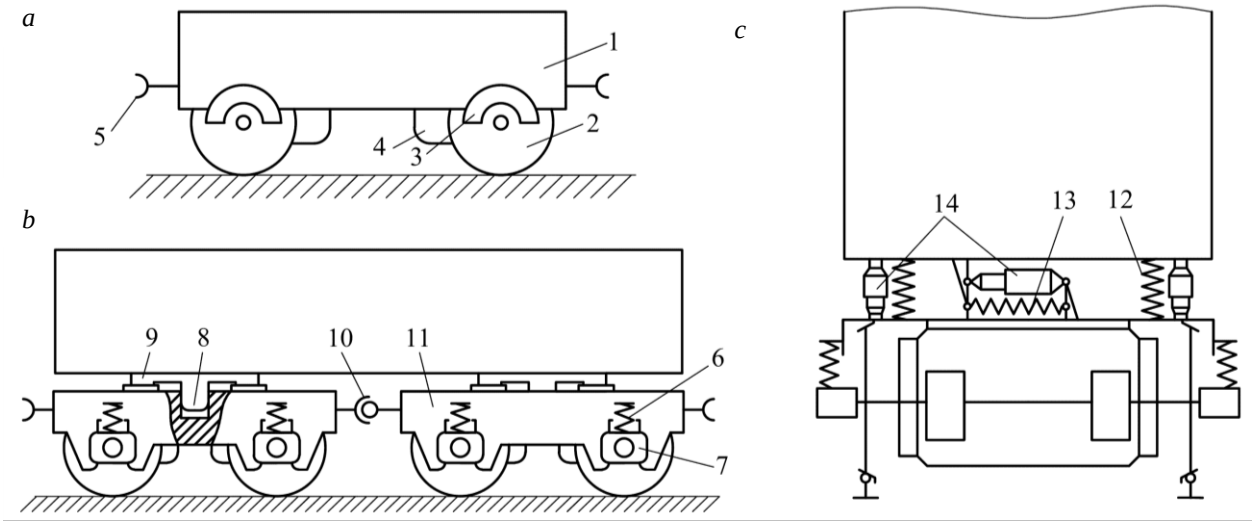


Fig. 1. Evolution of the mechanics in the locomotive:
a – mechanics of the first locomotives:
1 – body; *2* – wheel set; *3* – bearing unit; *4* – traction drive; *5* – draw gear and brakes;
b – improved design of the mechanics:
6 – elastic elements; *7* – axle box; *8* – pivot; *9* – body support; *10* – bogie coupling; *11* – bogie frame;
c – construction of the modern locomotives` mechanics:
12 – secondary suspension; *13* – spring of lateral suspension; *14* – special devices (dampers)

Purpose

The main purpose of the study is to compare and confirm the results of theoretical studies of locomotive motion along the straight and curved track sections in the set range of operating speeds, which is essential for determining their dynamic qualities. The conducted research complex is one of the prerequisites for improving the dynamic qualities of the rolling stock mechanics, in particular the bogie parameters.

Methodology

The research was carried out by numerical integration of the dynamic loading of a railway vehicle using one of the modern software complexes. We used in this study the mathematical model of locomotive spatial oscillations obtained using Lagrangian equations of the second kind.

The mechanics of the railway rolling stock, which is affected by the weight of the equipment, participates in the transfer of tractive effort from the locomotive to the train, accepts the dynamic loads that arise when moving along the straight and curved sections of the track. Therefore, in order to ensure its normal and trouble-free operation:

– All components of the mechanics corresponded to the strength requirements at the most unfavourable combination of operating loads;

– The mechanics was sufficiently strong, met the safety requirements and railway operating rules;

– The mechanics was a simple and reliable construction, especially its bogie.

Therefore, based on the analysis of the traction rolling stock structures [4, 8, 10, 12, 13, 15, 18, 19, 21], the ideas and achievements of locomotive construction [1, 2, 5, 7, 8–10, 13, 17–19, 21], the results of numerous studies [3, 5, 7, 9, 21–24], the authors of the paper, in terms of systematic originality, proposed a variant of the General Classification of Locomotive Mechanics (Fig. 2).

One of the necessary conditions for improving the traction rolling stock of railways is to determine the parameters of its bogie [2, 4, 8–10, 18, 19, 21]. Therefore the important task is to determine the dynamic qualities of locomotives, taking into account the selected technical solutions in the bogie design, for example, the presence and location of connections between the body and the bogie, the secondary suspension system, devices for transmission of longitudinal and transverse forces, etc.

doi: 10.15802/stp2018/148026 © V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

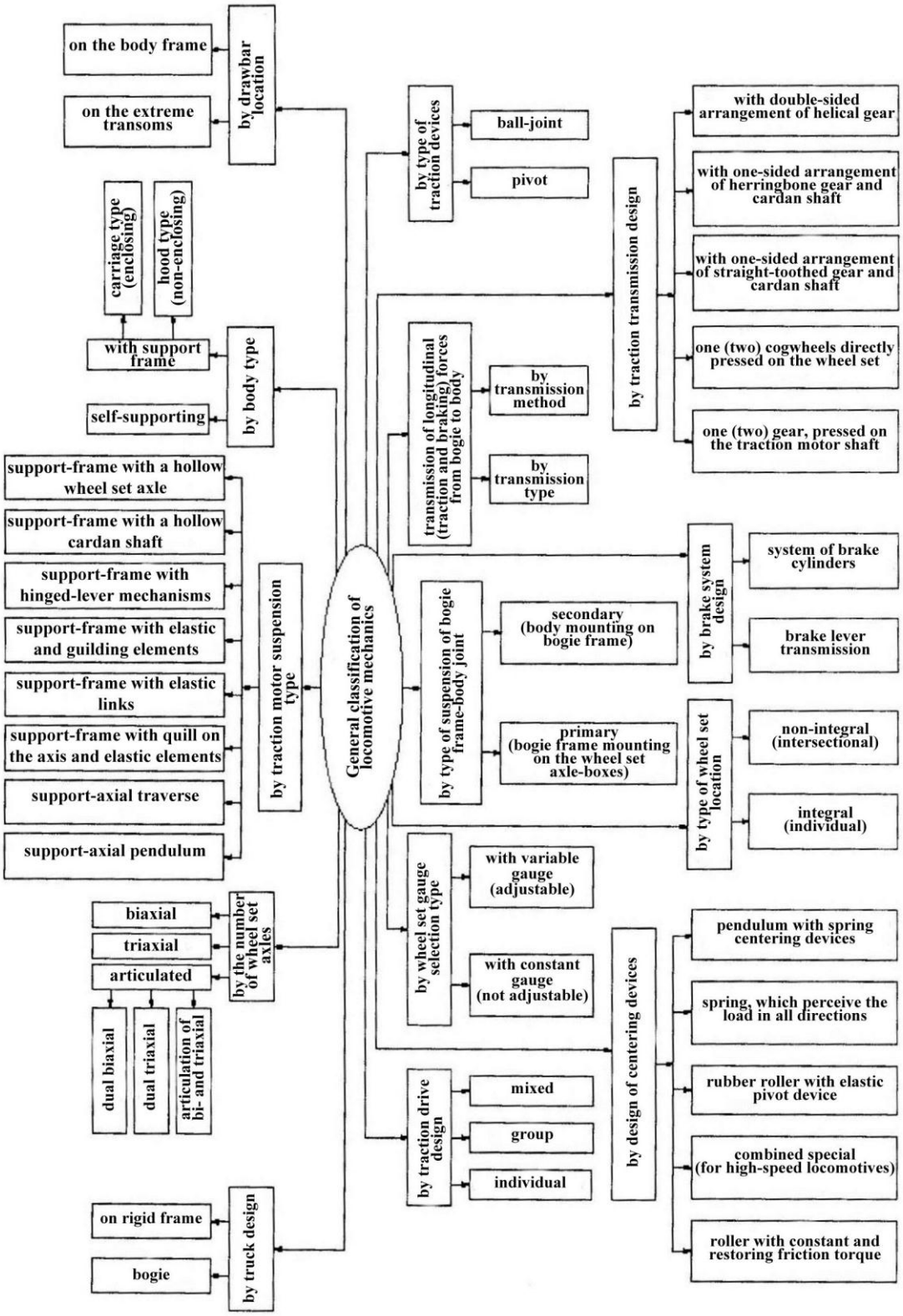


Fig. 2. General Classification of Locomotive Mechanics

doi: 10.15802/stp2018/148026
© V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

This work presents the research conducted for the main line electric locomotive of the DS series, which was created in cooperation with Siemens Concern at the Dnipropetrovsk Electric Locomotive Building Plant (DELBP) with the participation of a number of scientific and production organizations, including the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT) [10, 18, 19, 21]. Its bogie (Fig. 3) is two-axle, ball-joint, with support-frame suspension of traction electric motors. For the transmission of longitudinal forces of traction (braking), a tilt rod is installed between each bogie and body, which is pivotally connected to the bogie traction unit and with an equilateral balancer, whose ends are connected with the rods by means of the pivot-hinged bearings [10, 13, 18, 19].

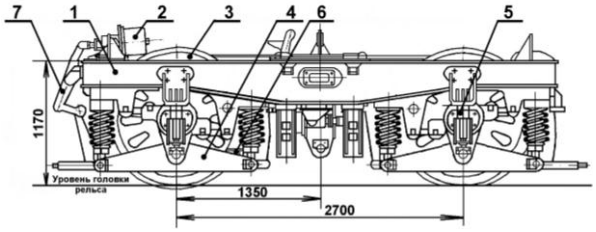


Fig. 3. Bogie drawing:
1 – bogie frame; *2* – brake cylinder; *3* – wheel set;
4 – balancer of the first stage of spring suspension;
5 – shock absorber; *6* – wheel flange lubricator;
7 – lever braking system

As it is known, the locomotive mechanics is a complex system with many bodies that have many degrees of freedom.

This paper describes the first (simplified) stage of research that considers the simplest computational dynamic model of the vehicle, i.e. a single-mass system, whose degree of freedom is equal to one, with the parameters of the reduced object. We construct the Lagrange equation of the second kind for the oscillations of this system. Let the body (possibly a body of a rolling stock unit) of mass *m* with the help of an elastic element and a viscous drag damper is attached to a wheel set (the mass of which so far neglected), and moves along the track, which in the vertical plane has no geometric defects (without regard to track irregularities) (Fig. 4). The coordinate axis *y*, along which the body moves, is oriented down. The elastic element has rigidity *c*, the damper viscous drag coefficient we denote as β. Figure 4 shows the calculation model, plane and spatial image of this scheme.

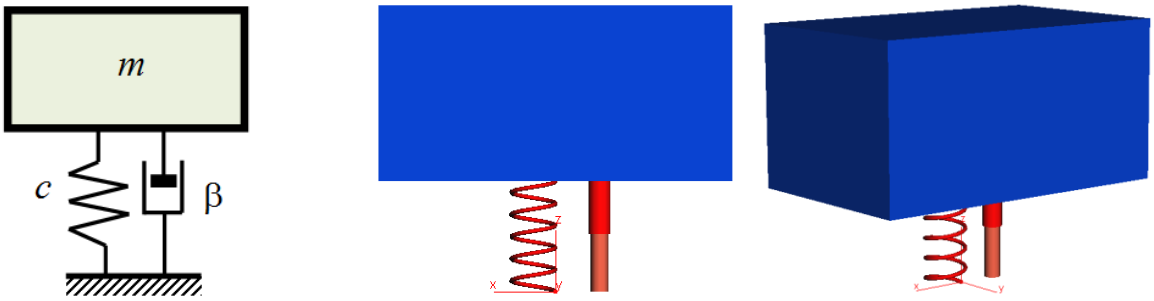


Fig. 4. Object of research without regard to track irregularities

Since the system has one degree of freedom, that is $n=1$; for a generalized coordinate, we choose the displacement of the body along the vertical axis $q_1 = y$; generalized speed $\dot{q}_1 = \dot{y}$.

The kinetic energy of the body, the potential energy accumulated in the elastic element, the function of energy dissipation in the viscous drag damper are determined by the known formulas [2, 6, 11, 14].

The generalized force, as is known from theoretical mechanics, can have two components: a generalized force that has the potential $Q_i^{**} = -\dfrac{\partial \Pi}{\partial q_i}$ and a generalized force that has no potential Q_i^*. That is $Q = Q_i^* + Q_i^{**}$. Since the load is not affected by a perturbing external force that has no potential, then the corresponding generalized force $Q_i^* = 0$.

Using the Lagrange equations of the second kind

doi: 10.15802/stp2018/148026
© V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}+\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i}+\frac{\partial \Pi}{\partial q_i}=0,$$

we obtain an equation of body motion $m\ddot{q}_1+\beta\dot{q}_1+cq_1=0$, in the canonical form it will be as follows

$$\ddot{q}+2b\dot{q}+k^2\,q=0.$$

Let us denote $b=\frac{\beta}{2m}$, $k^2=\frac{c}{m}$.

Its solution has the form [2, 6, 11, 14]

$$q=e^{-bt}\left(A\cos k_1 t+B\sin k_1 t\right),$$

where $k_1=\sqrt{k^2-b^2}$, A, B – constants derived from the initial conditions. Physical content: k_1 – frequency of oscillations with regard to friction, k – frequency of free oscillations (without friction).

Let us consider the case when the body of mass m with the help of an elastic element and a viscous drag damper is attached to a wheel set, the mass of which is so far neglected, moves along a track, which in the vertical plane has the irregularity given by the equation $\eta=\eta_0\sin\omega t$. Figure 5 shows the calculation model, plane and spatial image of this scheme.

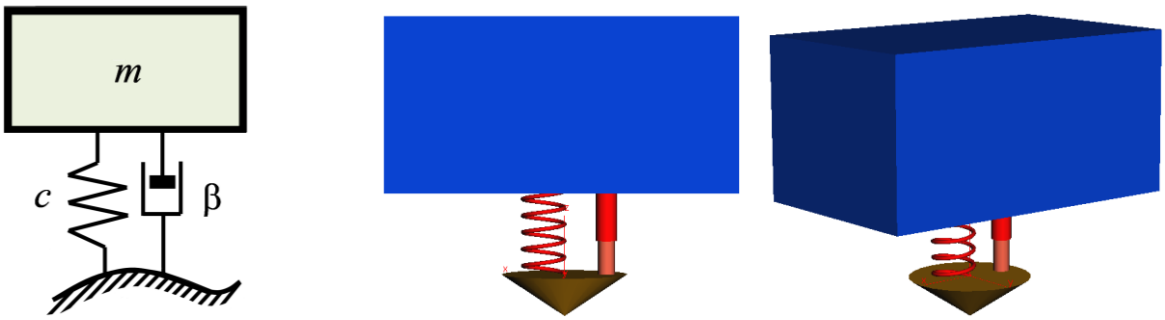


Fig. 5. Object of research with regard to track irregularities

Then the differential equation of body motion obtained by means of the Lagrange equation of the second kind has the form [2, 6, 11, 14]:

$$m\ddot{q}_1+\beta\left(\dot{q}_1-\dot{\eta}\right)+c\left(q_1-\eta\right)=0,$$

or:

$$m\ddot{q}_1+\beta\dot{q}_1+cq_1=\beta\dot{\eta}+c\eta.$$

This equation can be rewritten in a different way:

$$m\ddot{q}_1+\beta\dot{q}_1+cq_1=c\eta_0\sin\omega t+\beta\omega\eta_0\cos\omega t,$$

where η_0 – amplitude value of rail deflection, ω – frequency of sinusoidal perturbation.

In this case, the solution has the form

$$q_1=e^{-bt}\left(A\cos k_1 t+B\sin k_1 t\right)+D_1\sin\omega t+D_2\cos\omega t,$$

where D_1, D_2 – constants of integration that satisfy the initial conditions.

Findings

Example 1. Let us consider the real mechanical system of the electric locomotive DS3 as a single-mass system, which moves along the track, which in the vertical plane has no geometric defects (without taking into account the irregularities) (Fig. 4).

System parameters:

$$c=2\,950\ \frac{\text{kN}}{\text{m}},\ m=50\ \text{t},\ \beta=180\ \frac{\text{kN}\cdot\text{s}}{\text{m}},$$

$$k^2=\frac{c}{m}=\frac{2\,950}{50}=59,\ k=\sqrt{59}=7.68\ \text{s}^{-1},$$

$$b=\frac{\beta}{2m}=\frac{180}{100}=1.8\ \text{s}^{-1},$$

$$k_1=\sqrt{59-3{,}24}=7.47\ \text{s}^{-1}.$$

For the initial conditions $q_0=25\cdot10^{-3}=2.5\cdot10^{-2}$ m, $\dot{q}_0=0$ we will obtain

doi: 10.15802/stp2018/148026
© V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

$A = 2.5 \cdot 10^{-2}$ m, $B = 3.93 \cdot 10^{-3}$ m. Then the final result of the problem has the following form

$$q = e^{-0,45t}\left(2.5 \cdot \cos 2.86t + 0.393 \cdot \sin 2.86t\right) \cdot 10^{-2} \text{ m}.$$

The graph of this coordinate behavior, obtained by analytical calculations and using the software complex, is presented in Figure 6 and Figure 9 respectively.

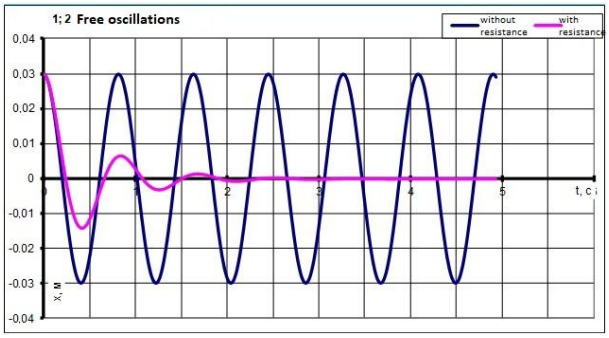


Fig. 6. Graph of free oscillations obtained by analytical calculation

Since designers are interested in the forces that arise in elastic elements, we find acceleration of the body

$$\ddot{q} = -3.24 \cdot e^{-1.8t}\left(2.5 \cdot \cos 7.47t + 0.602 \cdot \sin 7.47t\right) -$$

$$-3.6 \cdot e^{-1.8t}\left(-18.68 \cdot \sin 7.47t + 4.50 \cdot \cos 7.47t\right) +$$

$$+e^{-1.8t}\left(-139.50 \cdot \cos 7.47t - 33.60 \cdot \sin 7.47t\right)\left(\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right).$$

Example 2. The results of the motion of the same vehicle (under the same conditions and values of parameters) along the track, having irregularities in the vertical plane (Fig. 7).

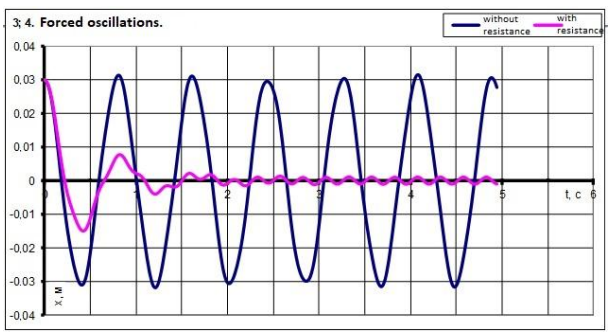


Fig. 7. Graph of forced oscillations obtained by analytical calculation

Example 3. Amplitude-frequency response of the same vehicle shows the ratio of the amplitude of body oscillation with the mass m and the amplitude of track inequalities depending on the frequency of its inequalities (Fig. 8).

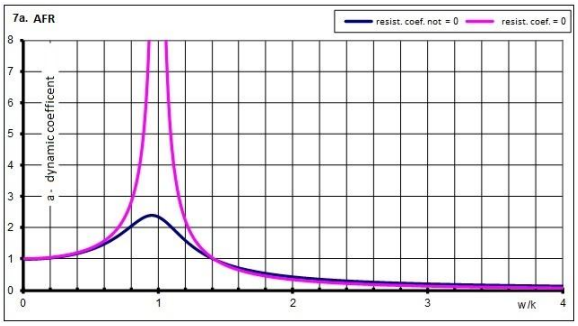


Fig. 8. Graph of amplitude-frequency response obtained by analytical calculation

The results obtained using the modern software system [17, 20] are presented in Fig. 9 – 11 respectively.

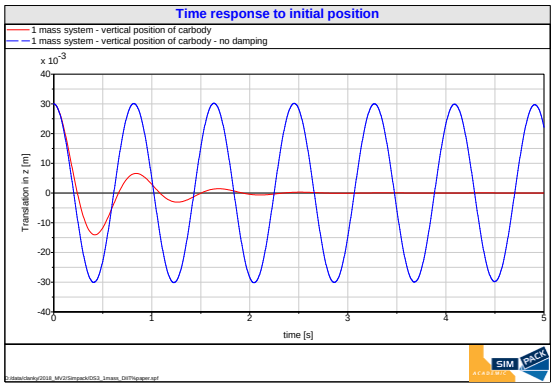


Fig. 9. Graph of free oscillations obtained using software complex

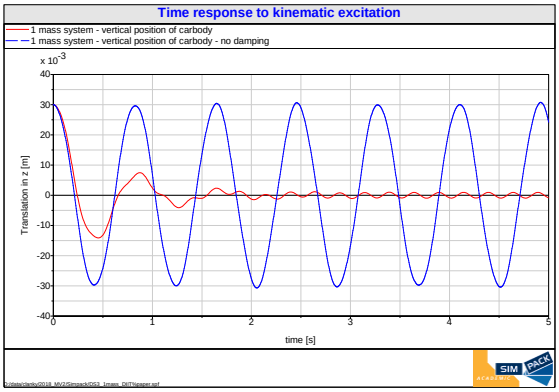


Fig. 10. Graph of forced oscillations obtained using software complex

doi: 10.15802/stp2018/148026

© V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

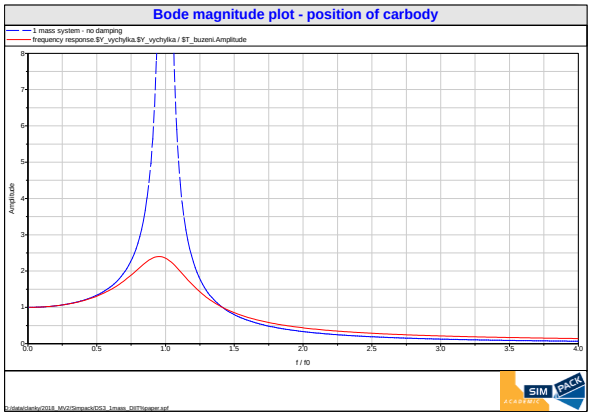


Fig. 11. Graph of amplitude-frequency response obtained using software complex

When comparing these graphs, it is easy to understand that we have the same results in both cases. Unlike the analytical solving, we can achieve these results easer with the help of software system.

The software complex automatically creates an equation of motion, finds a solution and displays results. This advantage can be used in order to create complex models with many degrees of freedom (Fig. 12).

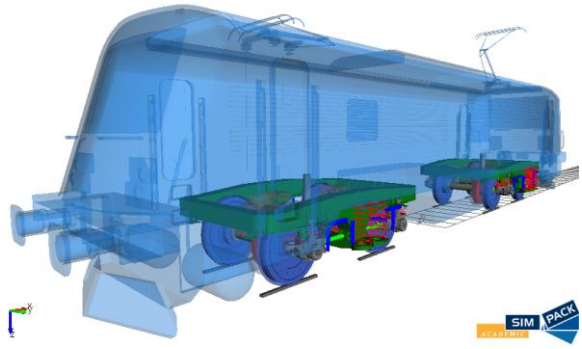


Fig. 12. Spatial nonlinear electric locomotive model with 124 degrees of freedom

Without the use of modern software, the creation of such a model will be very complex and time-consuming. Modern software complexes allow creating and calculating such a model within a few days.

Originality and practical value

Based on the results of many years of work, the authors present the General Classification of Locomotive Mechanics, which may be useful to researchers, who are involved in the assessment of the dynamic qualities of new and upgraded types of rolling stock.

A new licensed modern software complex has been utilized. This program complex is applicable in the design, modeling of units of rolling stock and their elements; during theoretical and experimental studies, comparison of their results.

The results of theoretical research can be taken into account for preliminary study during creating the reliable constructions of a new vehicle, further improvement of the vehicle mechanics, and modernization of the units of rolling stock during field tests.

Conclusions

When creating and improving the structures of rolling stock, the actual is generalization of theoretical, scientific-methodical and experimental researches, which are directed on improvement of qualities of a vehicle in general, and locomotive mechanics in particular.

The article analyses the behavior of a vehicle during motion along the track section, which in the vertical plane does not have geometric defects, and taking into account the irregularities using the example of the main locomotive. The research was carried out both analytically and with the help of modern software complex.

Comparison of graphs (Fig. 6 – 8 and Fig. 9 – 11) shows that the results obtained by different methods coincide with sufficient accuracy.

The use of modern computing tools makes it easier and faster to get results compared to using the analytical methods.

The implementation of the results of theoretical researches can give an opportunity of simultaneous increase in vehicle velocity, provision of necessary dynamic parameters of a railway vehicle, reduce its impact on the track and improve the level of railway traffic safety.

doi: 10.15802/stp2018/148026
© V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Басов, Г. Г. Теоретичні й експериментальні дослідження екіпажної частини тепловозів : навч. посіб. / Г. Г. Басов, В. І. Нестеренко. – Луганськ : Ноулідж, 2011. – 247 с.
2. Блохін, Є. П. Динаміка електричного рухомого складу : навч. посіб. / Є. П. Блохін, М. Л. Коротенко, В. С. Буров. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2002. – 138 с.
3. Бондаренко, І. О. Моделювання з метою встановлення оціночних умов функціональної безпеки залізничної колії / І. О. Бондаренко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 1, № 7 (79). – С. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59874
4. Евстратов, А. С. Экипажные части тепловозов / А. С. Евстратов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 136 с.
5. Кузишин, А. Я. Побудова механічної моделі вагона дизель-поїзда ДПКр-2 та її особливості / А. Я. Кузишин, А. В. Батіг // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 20–29. doi: 10.15802/stp2017/117936
6. Лазарян, В. А. Устойчивость движения рельсовых экипажей / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – Киев : Наук. думка, 1972. – 197 с.
7. Математична модель вагона дизель-поїзда ДПКР-2 / С. А. Кострица, Ю. Г. Соболевська, А. Я. Кузишин, А. В. Батіг // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 1 (73). – С. 56–65. doi: 10.15802/stp2018/123079
8. Механическая часть тягового подвижного состава : учебник для вузов / под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с.
9. Мурадян, Л. А. К вопросу о планах испытаний надежности механических систем / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків, 2015. – Вип. 157. – С. 119–128.
10. Мямлин, С. В. Особенности конструкции ходовых частей тягового подвижного состава / С. В. Мямлин, О. Лунис, Л. А. Недужая // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 130–146. doi: 10.15802/stp2017/104824
11. Павловський, М. А. Теоретична механіка / М. А. Павловський. – Київ : Техніка, 2002. – 510 с.
12. Повышение надежности экипажной части тепловозов / под ред. Л. К. Добрынина. – Москва : Транспорт, 1984. – 248 с.
13. Соколов, Ю. Н. Конспект для локомотивных бригад. Электровоз ДС3. Устройство, управление, обслуживание / Ю. Н. Соколов. – Киев : Изд-во Юго-Запад. ж.-д., 2011. – 299 с.
14. Теоретична механіка : навч. посіб. / В. І. Векерик, Д. І. Ільчишина, К. Г. Левчук, І. В. Цідило, Л. М. Шальда – Івано-Франківськ : Факел, 2006. – 459 с.
15. Тепловозы: Основы теории и конструкция / под ред. В. Д. Кузьмича. – Москва : Транспорт, 1991. – 352 с.
16. Трофимович, В. В. Механическая часть электроподвижного состава : курс лекций : в 2 ч. / В. В. Трофимович. – Хабаровск : Изд-во Дальневост. гос. ун-та путей сообщения, 2006. – Ч. 2. – 100 с.
17. Kalivoda, J. Enhancing the scientific level of engineering training of railway transport professionals / J. Kalivoda, L. O. Neduzha // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 6 (72). – С. 128–137. doi: 10.15802/stp2017/119050
18. Klimenko, I. Parameter Optimization of the Locomotive Running Gear / I. Klimenko, J. Kalivoda, L. Neduzha // Proc. of 22nd Intern. Sci. Conf. (October 3–5, 2018) / Kaunas University of Technology. – Trakai ; Klaipėda, 2018. – P. 1095–1098.
19. Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the «Underframe-Track» System Interaction / I. Klimenko, L. Černiauskaite, L. Neduzha, O. Ochkasov // Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems – ITELMS'2018 : Proc. of 12th Intern. Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys) / Kaunas University of Technology. – Kaunas, 2018. – P. 105–114.
20. Multy-Body Simulation Software [Електроний ресурс] // SIMULIA Simpack. – Available at: http://www.simpack.com – Title from the screen. – Accessed : 31.10.2018.
21. Myamlin, S. Research of Innovations of Diesel Locomotives and Bogies / S. Myamlin, L. Neduzha, Ž. Urbutis // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 469–474. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.069
22. Nestacionarieji ir Kvazistatiniai Gelezinkelio Traukiniq Judejimo Rezimai : monografija / E. Blochinas, S. Dailydka, L. Lingaitis, L. Ursuliak ; Vilniaus Gedimino Technicos Universitetas. – Vilnius : Technika, 2015. – 167 p. doi: 10.3846/2321-m

doi: 10.15802/stp2018/148026 © V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

23. Serdiuk, T. M. Modeling of influence of traction power supply system on railway automatics devices / T. M. Serdiuk // 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE (4-7 Sept. 2017). – Angers, France, 2017. doi: 1109/EMCEurope.2017.8094637
24. Shykunov, O. A. Three-element bogie side frame strength / O. A. Shykunov // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 183–193. doi: 10.15802/stp2017/92535

В. А. ТАТАРІНОВА[1*], Я. КАЛІВОДА[2*], Л. О. НЕДУЖА[3*]

[1*]Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 728 36 99, ел. пошта Valentina100vol@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777
[2*]Каф. «Автомобілі, двигуни внутрішнього згоряння та залізничний транспорт», Чеський технічний університет, вул. Технічна, 4, Прага, 6, Чехія, 16607, тел. +(420) 224 352 493, ел. пошта jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515
[3*]Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, ел. пошта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛОКОМОТИВА

Мета. Основною метою роботи є порівняння й підтвердження результатів теоретичних досліджень руху локомотива по прямолінійним та криволінійним ділянкам колії у встановленому діапазоні експлуатаційних швидкостей, що є головним для визначення їх динамічних якостей. Проведений комплекс досліджень є однією з передумов поліпшення динамічних якостей механічної частини рухомого складу, зокрема параметрів ходової частини. **Методика.** Дослідження проведені методом чисельного інтегрування динамічної навантаженості залізничного транспортного засобу з використанням одного із сучасних програмних комплексів. У роботі застосовано математичну модель просторових коливань локомотива, отриманих за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду. **Результати.** Проведено теоретичні дослідження й виконано аналіз поведінки транспортного засобу під час руху по ділянці колії, яка у вертикальній площині не має геометричних дефектів, та з урахуванням нерівностей на прикладі магістрального локомотива. Дослідження проведено як аналітично, так і за допомогою сучасного програмного комплексу. Порівняння графіків показує, що результати, отримані різними методами, збігаються з достатньою точністю. **Наукова новизна.** За результатами багаторічної роботи автори представили загальну класифікацію механічної частини локомотивів, що може стати в нагоді науковцям, які досліджують динамічні якості нових і модернізованих засобів рейкового рухомого складу. **Практична значимість.** Застосовано новий ліцензований сучасний програмний комплекс, який можна використовувати під час проектування, моделювання одиниць рухомого складу та їх елементів під час проведення теоретичних й експериментальних досліджень, порівняння їх результатів. Результати теоретичних досліджень можуть бути враховані для проведення попередніх досліджень під час створення надійних конструкцій нового транспортного засобу, подальшого поліпшення механічної частини, модернізації одиниць рухомого складу, під час проведення натурних випробувань.

Ключові слова: транспортний засіб; рухомий склад; локомотив; механічна частина; візок; програмний комплекс

В. А. ТАТАРИНОВА[1*], Я. КАЛИВОДА[2*], Л. А. НЕДУЖАЯ[3*]

[1*]Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 728 36 99, эл. почта Valentina100vol@gmail.com, ORCID 0000-0001-6484-3777
[2*]Каф. «Автомобили, двигатели внутреннего сгорания и железнодорожный транспорт», Чешский технический университет, ул. Техническая, 4, Прага, 6, Чехия, 16607, тел. +(420) 224 352 493, эл. почта jan.kalivoda@fs.cvut.cz, ORCID 0000-0002-0278-2515
[3*]Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 810 51 65, эл. почта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

doi: 10.15802/stp2018/148026 © V. A. Tatarinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛОКОМОТИВА

Цель. Основной целью работы является сравнение и подтверждение результатов теоретических исследований движения локомотива по прямолинейным и криволинейным участкам пути в установленном диапазоне эксплуатационных скоростей, что является главным для определения их динамических качеств. Проведенный комплекс исследований является одним из условий улучшения динамических качеств механической части подвижного состава, в частности параметров ходовой части. **Методика**. Исследования проведены методом численного интегрирования динамической нагруженности железнодорожного транспортного средства с использованием одного из современных программных комплексов. В работе применена математическая модель пространственных колебаний локомотива, полученных с помощью уравнений Лагранжа второго рода. **Результаты**. Проведены теоретические исследования и выполнен анализ поведения транспортного средства во время движения по участку пути, который в вертикальной плоскости не имеет геометрических дефектов, и с учетом неровностей на примере магистрального локомотива. Исследование проведено как аналитически, так и с помощью современного программного комплекса. Сравнение графиков показывает, что результаты, полученные разными методами, совпадают с достаточной точностью. **Научная новизна.** По результатам многолетней работы авторы представили общую классификацию механической части локомотивов, которая может пригодиться ученым, исследующим динамические качества новых и модернизированных средств рельсового подвижного состава. **Практическая значимость.** Применен новый лицензированный современный программный комплекс, который можно использовать при проектировании, моделировании единиц подвижного состава и их элементов при проведении теоретических и экспериментальных исследований, сравнения их результатов. Результаты теоретических исследований могут быть учтены для проведения предварительных исследований при создании надежных конструкций нового транспортного средства, дальнейшего улучшения механической части, модернизации единиц подвижного состава, во время проведения натурных испытаний.

Ключевые слова: транспортное средство; подвижной состав; локомотив; механическая часть; тележка; программный комплекс

REFERENCES

1. Basov, H. H., & Nesterenko, V. I. (2011). *Teoretychni y eksperymentalni doslidzhennia ekipazhnoi chastyny teplovoziv: Navchalnyi posibnyk*. Lughansk, Noulidzh. (in Ukranian)
2. Blokhin, Y. P., Korotenko, M. L., & Burov, V. S. (2002). *Dynamika elektrychnoho rukhomoho skladu: Navchalnyi posibnyk*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukranian)
3. Bondarenko, I. O. (2016). Modeling for establishment of evaluation conditions of functional safety of the railway track. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/7(79)*, 4-10. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59874 (in Ukranian)
4. Yevstratov, A. S. (1987). *Ekipazhnye chasti teplovozov*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
5. Kuzyshyn, A. Y., & Batig, A. V. (2017). Construction of Mechanical Model of the Diesel-Train DTKr-2 Car and its Features. *Science and Transport Progress, 6(72)*, 20-29. doi: 10.15802/stp2017/117936 (in Ukranian)
6. Lazarian, V. A., Dluhach, L. A., & Korotenko, M. L. (1972). *Ustoychivost dvizheniya relsovykh ekipazhey*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
7. Kostritsa, S. A., Sobolevska, Y. H., Kuzyshyn, A. Y., & Batih, A. V. (2018). Mathematical Model of Dpkr-2 dyzel Train Car. *Science and Transport Progress, 1(73)*, 56-65. doi: 10.15802/stp2018/123079 (in Ukranian)
8. Biryukov, I. V. (Ed). (1992). *Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava: Uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Transport. (in Russian)
9. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Y. (2015). K voprosu o planakh ispytaniy nadezhnosti mekhanicheskikh sistem. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu, 157,* 119-128. (in Russian)
10. Myamlin, S. V., Lunys, O., & Neduzha, L. O. (2017). Peculiarities of Running Gear Construction of Rolling Stock. *Science and Transport Progress, 3(69)*, 130-146. doi: 10.15802/stp2017/104824 (in Russian)
11. Pavlovskyi, M. A. (2002). *Teoretychna mekhanika.* Kyiv: Tekhnika. (in Ukranian)

doi: 10.15802/stp2018/148026 © V. A. Tararinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

12. Dobrynin, L. K. (Ed). (1984). *Povyshenie nadezhnosti ekipazhnoy chasti teplovozov*. Moscow: Transport. (in Russian)
13. Sokolov, Y. N. (2011). *Konspekt dlya lokomotivnykh brigad. Elektrovoz DS3. Ustroystvo, upravlenie, obsluzhivanie*. Kyiv: Izdatelstvo Yugo-Zapadnoy zheleznoy dorogi. (in Russian)
14. Vekeryk, V. I., Ilchyshyna, D. I., Levchuk, K. H., Tsidylo, I. V., & Shalda, L. M. (2006). *Teoretychna mekhanika*. Ivano-Frankivsk: Fakel. (in Ukranian)
15. Kuzmich, V. D. (Ed). (1991). *Teplovozy: Osnovy teorii i konstruktsiya.* Moscow: Transport. (in Russian)
16. Trofimovich, V. V. (2006). *Mekhanicheskaya chast elektropodvizhnogo sostava: Kurs lektsiy* (Vol. 1-2). Khabarovsk: Izdatelstvo Dalnevostochnogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. (in Russian)
17. Kalivoda, J., & Neduzha, L. O. (2017). Enhancing the Scientific Level of Engineering Training of Railway Transport Professionals. *Science and Transport Progress, 6(72),* 128-137. doi: 10.15802/stp2017/119050 (in English)
18. Klimenko, I, Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2018). Parameter Optimization of the Locomotive Running Gear: Proceedings of 22nd International Scientific Conference (October 3–5, 2018). Trakai, Klaipėda. (in English)
19. Klimenko, I., Černiauskaite, L., Neduzha, L. & Ochkasov, O. (2018). Mathematical Simulation of Spatial Oscillations of the «Underframe-Track» System Interaction. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems – ITELMS'2018: Proc. of 12th Intern. Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys)*. Kaunas. (in English)
20. Multy-Body Simulation Software. *SIMULIA Simpack*. Retrived from http://www.simpack.com (in English)
21. Myamlin, S., Neduzha, L., & Urbutis, Ž. (2016). Research of Innovations of Diesel Locomotives and Bogies. *Procedia Engineering, 134*, 469-474. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.069 (in English)
22. Blochinas, E., Dailydka, S., Lingaitis, L. P., & Ursuliak, L. (2015). Nestacionarieji ir kvazistatiniai geležinkelio traukinių judėjimo režimai: monografija. Vilnius: Technika. doi: 10.3846/2321-m (in Lithuanian)
23. Serdiuk, T. M. (2017). Modeling of influence of traction power supply system on railway automatics devices. *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*. doi: 10.1109/emceurope.2017.8094637 (in English)
24. Shykunov, O. A. (2017). Three-element Bogie Side Frame Strength. *Science and Transport Progress, 1(67*), 183-193. doi: 10.15802/stp2017/92535 (in English)

Received June 04, 2018
Accepted: Oct. 08, 2018

doi: 10.15802/stp2018/148026 © V. A. Tararinova, J. Kalivoda, L. O. Neduzha, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

УДК 629.463.66.015

А. О. ШВЕЦЬ[1*]

[1*]Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, ел. пошта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

ВПЛИВ ПОЗДОВЖНЬОГО ТА ПОПЕРЕЧНОГО ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ ВАГИ ВАНТАЖУ В ПІВВАГОНАХ НА ЇХ ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Мета. Підвищення швидкості руху залізничних екіпажів дозволяє посилити інтеграційні процеси з країнами Європи й Азії, проте призводить до необхідності вдосконалення контролю, кількісної оцінки динамічної завантаженості рухомого складу для дотримання безпечного і надійного сполучення на залізницях. Тому в процесі проектування й експлуатації рухомого складу кількісна оцінка динамічних навантажень становить актуальну науково-технічну задачу. Метою цієї роботи є дослідження впливу поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах у разі збільшення швидкості руху на їх основні динамічні показники – коефіцієнти горизонтальної та вертикальної динаміки, коефіцієнт стійкості від сходу з рейок. **Методика.** За основу дослідження взятий метод математичного й комп'ютерного моделювання динамічної завантаженості вантажного піввагона з використанням моделі просторових коливань зчепу п'яти вагонів і програмного комплексу, розробленого в галузевій науково-дослідній лабораторії динаміки та міцності рухомого складу (ГНДЛ ДМРС) Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Теоретичні дослідження проведені за умови руху піввагона моделі 12-532 з типовими візками 18-100 зі швидкостями в діапазоні від 50 до 90 км/год по кривих із радіусами 350 й 600 м, з підвищеннями зовнішньої рейки 130 та 120 мм відповідно. **Результати.** У статті подано аналіз теоретичних досліджень динамічних якостей рухомого складу на прикладі піввагонів. Розрахунки з використанням пакета прикладних програм проведені з достатньою для практики точністю. У ході виконання теоретичних досліджень та після проведення моделювання з урахуванням процесів коливання вантажного вагона й вантажу за поздовжнього та поперечного зміщення центру його ваги в піввагоні отримано залежності основних динамічних показників із урахуванням швидкості руху. **Наукова новизна.** У роботі досліджений вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу на динамічну завантаженість вагона з метою вирішення задачі прогнозування динаміки рухомого складу. Уперше подано результати теоретичних досліджень із урахуванням швидкості руху по кривих ділянках колії малого та середнього радіуса. **Практична значимість.** Робота має практичну спрямованість. Застосування отриманих результатів сприятиме підвищенню безпеки руху вантажних вагонів і дозволить поліпшити техніко-економічні показники роботи залізничного транспорту.

Ключові слова: вантаж; піввагони; динамічні показники; криві ділянки колії; поздовжнє та поперечне зміщення центру ваги; швидкість руху

Вступ

Безпека руху вантажних поїздів, значення допустимих швидкостей і вантажопідйомності, витрати на утримання рухомого складу й колійного господарства, збільшення міжремонтних пробігів вагонів суттєво залежать від конструкції вантажного рухомого складу залізниць. Експлуатація морально застарілого рухомого складу з низькими динамічними властивостями, частка якого серед залізничних транспортних засобів сягає близько 90 % (рис. 1), є однією з причин недостатнього рівня безпеки руху поїздів і високих експлуатаційних витрат, обумовлених збільшенням ремонтних робіт, а також підвищеним споживанням енергії на тягу поїздів. Час висуває нові вимоги до збільшення рівня сил динамічної взаємодії рухомого складу й колії, що в умовах значного зносу екіпажної частини рухомого складу минулого покоління є неприпустимим [10, 11].

Технічний рівень рухомого складу залізничного транспорту безпосередньо впливає на економічні показники транспортної галузі та економіки країни в цілому. Тому посилення потужностей залізничної галузі України є стратегічним напрямком розвитку її економіки [10].

doi: 10.15802/stp2018/146432 © А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

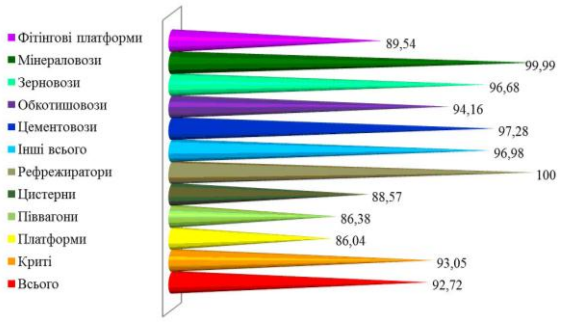


Рис. 1. Знос парку вантажних вагонів

Fig. 1. Wear of the freight car fleet

Оскільки залізничний транспорт у наш час широко використовують для перевезення різних видів вантажів практично на будь-якому підприємстві, украй важливо створити умови для безпечного руху поїздів. Не останню роль у цьому відіграє правильне розміщення вантажу, який перевозять у кузові вагона. Визначення зміщення центру ваги вантажу відносно осей симетрії залізничного вагона дозволяє оперативно виявляти небезпечні відхилення в його стійкості й тим самим істотно збільшити безпеку під час руху поїзда. Останнім часом це питання стає особливо актуальним у зв'язку з підвищенням вимог залізниці до допустимих значень поздовжнього та поперечного зміщення вантажу під час завантаження вагона й на шляху його прямування [8].

Мета

Підвищення швидкості руху залізничних екіпажів дозволить посилити інтеграційні процеси з країнами Європи й Азії, задовольнити попит населення у перевезеннях, знизити витрати електроенергії та ресурсів, задіяти виробничі потужності провідних галузей промисловості. Проте це призводить до необхідності вдосконалення контролю, кількісної оцінки динамічної навантаженості рухомого складу для дотримання безпечного й надійного сполучення на залізницях. Тому в процесі проектування рухомого складу кількісна оцінка динамічних навантажень становить актуальну науково-технічну задачу [10, 11].

Метою цієї роботи є дослідження впливу поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах із урахуванням можливого підвищення швидкості руху на їх основні динамічні показники – коефіцієнти горизонтальної й вертикальної динаміки, стійкості від сходження з рейок.

Методика

Під час проектування рухомого складу конструктори повинні визначити, чи буде спроектована модель володіти необхідними динамічними якостями. Відповідь можна отримати тільки інтуїтивно шляхом зіставлення основних параметрів конструкції з аналогічною, уже наявною, або після її виготовлення та проведення динамічних ходових випробувань. Однак цей процес тривалий, тому практичний інтерес становить проведення попередньої оцінки динамічних якостей вагона на стадії його проектування, що можна здійснити за допомогою математичного моделювання. Воно дозволяє визначити динамічні показники вагонів під час їх руху по прямолінійних та криволінійних ділянках залізничної колії з реальними нерівностями у вертикальній і горизонтальній площинах (рис. 2, 3), з урахуванням реальної поверхні кочення колеса й профілю головки рейки [2, 10, 11].

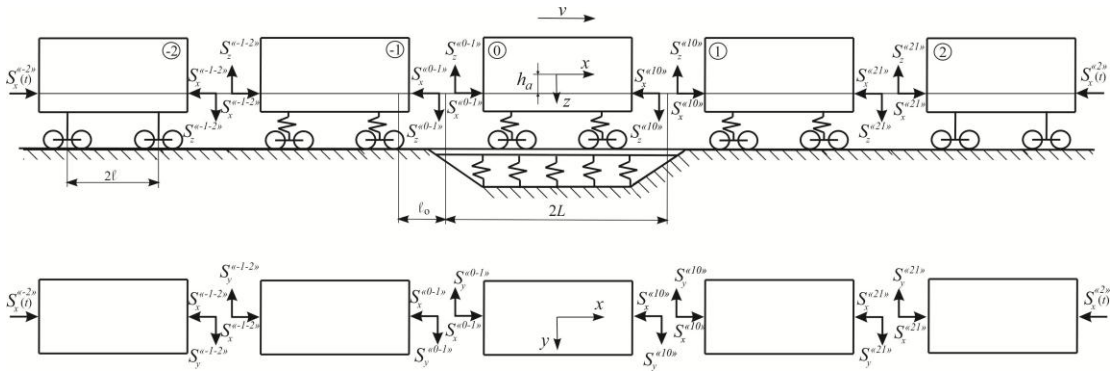


Рис. 2. Сили, які виникають від дії поздовжніх сил в автозчепленнях вагонів

Fig. 2. Forces arising from the action of longitudinal forces in the automatic couplings of cars

doi: 10.15802/stp2018/146432
© А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Як відомо, під час руху вагона в складі поїзда по кривих ділянках колії на сили взаємодії коліс із рейками безпосередній вплив мають поперечні сили, які виникають від дії поздовжніх сил в автозчепленнях вагона в режимах тяги на затяжних ухилах і під час гальмувань, особливо рекуперативних [2, 6, 14–20].

На рис. 3 зображено, як діють на вагон сили з боку інших вагонів, розташованих попереду й позаду нього по ходу руху поїзда.

Рухаючись по кривій, вагон під дією поздовжніх сил в автозчепленнях може зайняти різне положення відносно осі колії, що значною мірою впливає на величини бічних горизонтальних сил взаємодії й сили тертя коліс із рейками. У режимі гальмування стискні сили можуть сприяти розташуванню вагонів у колії «ялинкою», що призводить до збільшення кутів набігання коліс на рейки. Доповнення математичних моделей просторових коливань вихідними даними з уточненими інерційними характеристиками елементів вагонів і вантажів дозволяє наблизити результати розрахунків до реального стану об’єктів і тим самим підвищити об’єктивність математичного та комп’ютерного моделювання. Саме для вирішення цієї проблеми було створено «Програмний комплекс для визначення моментів інерції кузовів вагонів» [2, 6, 11, 15].

Як було зазначено вище, безпека руху поїздів і збереження вантажів, які перевозять, безпосередньо залежать від способу їх розміщення й кріплення. Удосконалення методики розрахунку кріплення вантажів є актуальною прикладною задачею, що має істотне значення для транспортної науки й галузі залізничного транспорту [8, 10, 11].

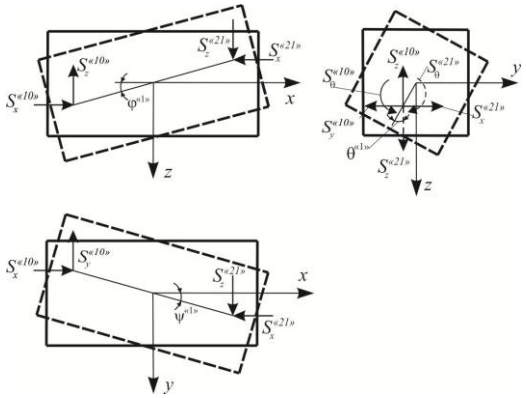


Рис. 3. Дія на вагон сил із боку сусідніх вагонів

Fig. 3. The forces action on the car from the neighbouring ones

Особливу увагу приділяють центру ваги. Для стійкості й безпеки транспортування центр ваги повинен бути на перетині центральних поздовжніх і поперечних ліній. Якщо потрібно перевезти нестандартний вантаж, то можливе незначне зміщення центру ваги. Крім того, у процесі перевезення вантажів іноді виникає необхідність у несиметричному розташуванні їх у вагоні. Зсув вантажу відносно центру ваги вагона можливий і під час транспортування. Часто потрібно оцінити вплив такої несиметричності на динамічні якості вагона та встановити допустимі величини зсуву вантажів (рис. 4) [3, 5, 9].

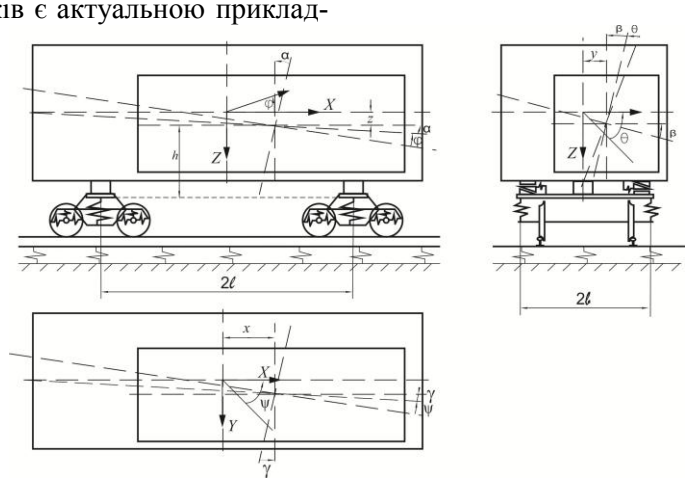


Рис. 4. Розрахункова схема 4-вісного вагона з несиметричним розташуванням вантажу

Fig. 4. The calculation scheme of a 4-axle car with asymmetric arrangement of cargo

doi: 10.15802/stp2018/146432
© А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Зазвичай у разі симетричного завантаження кузова вагона в розрахунковій схемі приймають, що головні центральні осі інерції співпадають з осями його симетрії. Якщо прийняти, що в розрахунковій схемі вагона з несиметричним завантаженням кузова розташування осей координат співпадає з осями симетрії кузова, то інерційні властивості його можна виразити через моменти інерції відносно трьох перпендикулярних осей і відповідні цим осям відцентрові моменти інерції. У кожному з варіантів завантаження кузова розташування початку координат прийнято в центрі ваги. Головні осі інерції при цьому співпадають з осями симетрії еліпсоїда інерції, напрямок яких визначають косинусами трьох кутів α, β, γ. Математична модель дозволяє розглянути коливання вагона з несиметричним розміщенням вантажу й різними жорсткостями ресорного підвішування.

Загальний центр ваги вантажів ($ЦВ_{в}^{з}$) повинен розміщуватися, як правило, на лінії перетину поздовжньої та поперечної площин симетрії вагона. У випадках, коли ця вимога нездійсненна з об'єктивних причин (геометричні параметри вантажу, умови розміщення та кріплення), допускається зміщення $ЦВ_{в}^{з}$ відносно поздовжньої та поперечної площин симетрії вагона (табл. 1) [5, 9].

Допустиму величину зміщення $ЦВ_{в}^{з}$ у поздовжньому напрямку $\ell_{зм}$ (відносно поперечної площини симетрії) під час завантаження вантажу й на шляху прямування визначають відповідно до табл. 1 залежно від загальної маси вантажу у вагоні.

Відповідно до [4] в разі необхідності несиметричного розташування вантажу у вагоні різниця в завантаженні візків не повинна перевищувати: для 4-вісних вагонів – 10 т; 6-вісних – 15 т; 8-вісних – 20 т. При цьому навантаження, що припадає на кожен із візків, повинно бути не більше за половину вантажопідйомності вагона.

Допустиму величину зміщення $ЦВ_{в}^{з}$ у поперечному напрямку $b_{зм}$ (відносно поздовжньої площини симетрії) під час завантаження вантажу й на шляху прямування визначають відповідно до табл. 2 залежно від загальної маси вантажу у вагоні й висоти загального центру ваги вагона з вантажем ($H_{цв}^{з}$) над рівнем верху головок рейок [5, 9].

Таблиця 1

Допустиме поздовжнє зміщення загального центру ваги вантажу в 4-вісному вагоні

Table 1

Permissible longitudinal displacement of the common gravity center of the cargo in 4-axle car

Вага вантажу, т	$\ell_{зм}$, мм	
	під час завантаження	на шляху прямування
≤10	2 700	3 000
15	2 250	2 480
20	1 950	2 160
25	1 550	1 730
30	1 250	1 440
35	1 100	1 235
40	950	1 080
45	850	960
50	750	865
55	680	785
60	600	720
62	550	630
67	200	260
70	0	60
>70	0	0

Допускається одночасне зміщення $ЦВ_{в}^{з}$ відносно поздовжньої та поперечної площин симетрії вагона (рис. 5) в межах значень, поданих у табл. 1, 2.

Допускається перевезення двох вантажів (або груп вантажів) однакової маси з кососиметричним розміщенням їх у вагоні (рис. 6) у разі дотримання таких умов:

– висота загального центру ваги вагона з вантажем ($H_{цв}^{з}$) над РГР не перевищує 2 300 мм;

– відстані між центрами ваги вантажів $ЦВ_{в1}$ та $ЦВ_{в2}$ у поздовжньому та поперечному напрямках не перевищують допустимих значень, які визначають відповідно до табл. 3 з урахуванням загальної маси вантажів;

– $ЦВ_{в}^{з}$ знаходиться на перетині поздовжньої й поперечної площин симетрії вагона.

doi: 10.15802/stp2018/146432

© А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Таблиця 2

Допустиме поперечне зміщення загального центру ваги вантажу в 4-вісному вагоні

Table 2

Permissible lateral displacement of the common gravity center of the cargo in 4-axle car

Вага вантажу, т	Висота загального центру ваги вагона з вантажем над РГР, м	$b_{зм}$, мм	
		під час завантаження	на шляху прямування
≤10	≤1,2	450	620
	1,5	380	550
	2,0	290	410
30	<1,2	380	550
	1,5	310	450
	2,0	250	350
	2,3	200	280
50	≤1,2	250	350
	1,5	200	280
	2,0	180	250
	2,3	140	200
55	≤1,5	150	220
	2,0	120	170
	2,3	100	150
67	≤1,5	125	180
	2,0	95	140
	2,3	80	120
>67	≤2,3	70	100

Сумарна маса вантажу й засобів кріплення у вагоні не повинна перевищувати його трафаретної вантажопідйомності, а в разі завантаження вантажу з обпиранням на два вагони частка маси вантажу й засобів кріплення, що припадає на кожний вантажонесний вагон зчепу, не повинна перевищувати трафаретної вантажопідйомності вагона. Вихід вантажу в поздовжньому напрямку за межі кінцевих балок рами платформи або піввагона не повинен перевищувати 400 мм [5, 9].

Таблиця 3

Максимально допустимі відстані між центрами ваги вантажів із кососиметричним розміщенням їх у вагоні

Table 3

Maximum permissible distances between the centers of gravity of the cargos with skew-symmetric placement in the car

Загальна вага двох вантажів, т	ℓ, мм	b, мм
≤20	8 000	1 250
30	7 000	900
40	6 000	750
50	6 000	600
55	6 000	500
67	5 000	400
72	4 500	350

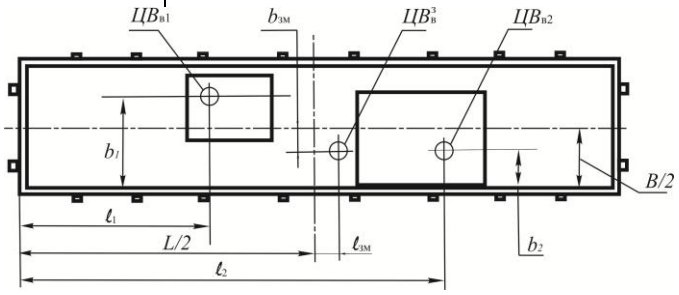


Рис. 5. Розрахункова схема визначення поздовжнього та поперечного зміщень загального центру ваги вантажів у вагоні

Fig. 5. Calculation scheme for determining the longitudinal and transverse displacements of the common gravity center of cargo in the car

doi: 10.15802/stp2018/146432
© А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

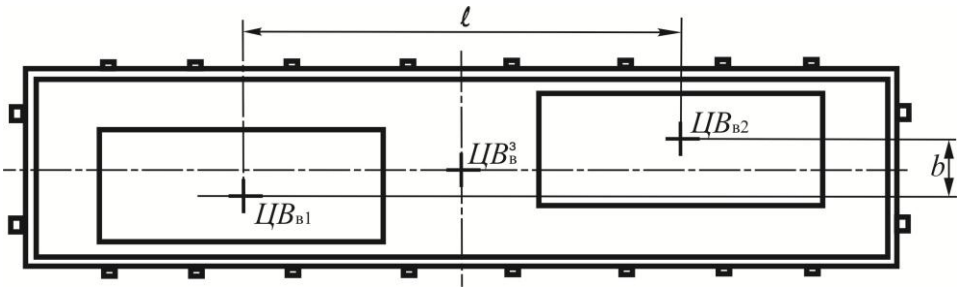


Рис. 6. Кососиметричне розміщення вантажів у вагоні:
$ЦВ_{в1}$, $ЦВ_{в2}$ – центри ваги вантажів; $ЦВ^{з}_{в}$ – загальний центр ваги вантажу у вагоні

Fig. 6. The skew-symmetric cargo placement in the car:
$ЦВ_{в1}$, $ЦВ_{в2}$ – cargo gravity centers; $ЦВ^{з}_{в}$ – common gravity center of cargo in the car

Результати

Розрахунки можна проводити з достатньою для практики точністю, обмежуючись розглядом руху групи з п'яти вагонів (рис. 2). За основу дослідження взятий метод математичного моделювання з використанням моделі просторових коливань зчепу п'яти вагонів і програмного комплексу, розробленого в ГНДЛ ДМРС Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Теоретичні дослідження проведені за умови руху піввагона моделі 12-532 з типовими візками 18-100 зі швидкостями в діапазоні від 50 до 90 км/год по кривих із радіусами 350 й 600 м, з підвищеннями зовнішньої рейки 130 і 120 мм відповідно [2, 7, 15].

У цьому дослідженні розглянутий вплив зсуву центру ваги вантажу в кузові піввагона у поздовжньому та поперечному напрямках, а також в обох напрямках одночасно. Графіки зміни динамічних показників під час руху по кривих ділянках колії $R = 600$ м й 350 м наведені на рис. 7–9. Зсув у поздовжньому напрямку (рис. 7) досліджений у межах до $A_x = 3$ м, що допускається за нормами для вантажів малої ваги (табл. 1) [3, 5, 9].

Як видно з рис. 7, у цілому зі збільшенням поздовжнього зміщення центру ваги вантажу коефіцієнти вертикальної динаміки збільшуються. Так, за швидкості 70–90 км/год показники $K_{дв}$ в разі збільшення поздовжнього зсуву від 0 до 3 м не перевищують допустиму норму як у кривій $R = 600$ м, так й у кривій $R = 350$ м. Рівень оцінки $K_{дв}$ у кривій $R = 350$ м відповідає – «добре», а у кривій $R = 600$ м – «відмінно». На рис. 7 (*в, г*) наведені коефіцієнти горизонтальної динаміки $K_{дг}$ під час руху по кривих із радіусом $R = 350$ м та 600 м відповідно. Із них видно, що зі збільшенням A_x коефіцієнти горизонтальної динаміки $K_{дг}$ змінюються незначно та залишаються у кривій $R = 600$ м й у кривій $R = 350$ м на рівні оцінки – «відмінно» [1, 4].

Коефіцієнти запасу стійкості від сходу коліс із рейок у кривій $R = 350$ м (рис. 7, *д*) мало залежать від поздовжнього зміщення вантажу, на відміну від кривої $R = 600$ м (рис. 7, *е*), але в обох випадках не перевищують мінімально допустиме значення. З отриманих результатів випливає, що поздовжнє зміщення вантажу в разі збільшення швидкості руху не викликає збільшення коефіцієнтів горизонтальної динаміки, а коефіцієнти $K_{дв}$ й $K_{ст}$ не перевищують значень, визначених нормами [1, 3, 4].

Поперечне зміщення вантажу розглянуте в межах від $A_y = 0$ до 0,2 м при поздовжньому зміщенні $A_x = 0$ м (рис. 8).

Для вантажів вагою 63 т, за якої проведені розрахунки, допускається поздовжнє зміщення $A_y = 0{,}15$ м, на шляху прямування це значення може становити 0,2 м (табл. 2, 3) [5, 9]. Вплив поперечного зміщення центру ваги вантажу більш істотно позначається на динамічних показниках, ніж поздовжній зсув.

doi: 10.15802/stp2018/146432
© А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

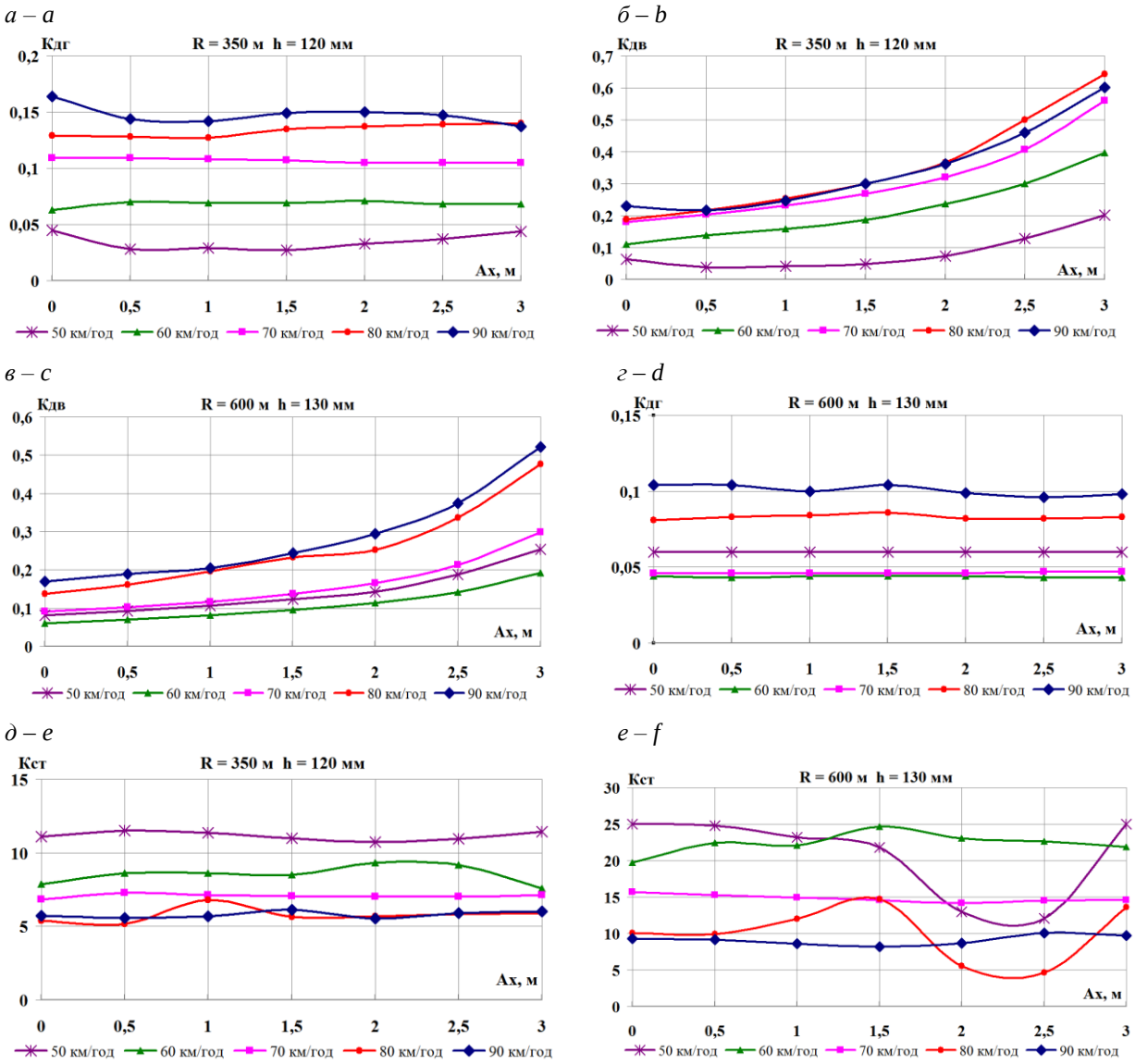


Рис. 7. Графіки залежності від зсуву вантажу в поздовжньому напрямку під час руху по відповідній кривій:
а, б – коефіцієнти вертикальної динаміки; *в, г* – коефіцієнти горизонтальної динаміки;
д, е – коефіцієнти стійкості від сходу з рейок

Fig. 7. Dependence graphs on the cargo displacement in the longitudinal direction when moving in the corresponding curve:
a, b – vertical dynamics coefficient;
c, d – horizontal dynamics coefficient; *e, f* – derailment stability coefficient

На рис. 8 показано вплив на динамічні показники поперечного зміщення центру ваги вантажу A_y у кривих $R = 350$ м та $R = 600$ м відповідно. Зі збільшенням A_y коефіцієнти вертикальної динаміки збільшуються (рис. 8, *а, б*), коефіцієнти горизонтальної динаміки змінюються не дуже значно (рис. 8, *в, г*), а коефіцієнти стійкості від сходу з рейок навпаки значно знижуються (рис. 8, *д, е*). За швидкості 70–90 км/год в разі збільшення поперечного зміщення A_y від 0 до допустимого для зазначеної ваги значення 0,15 м коефіцієнт запасу стійкості від сходу

doi: 10.15802/stp2018/146432
© А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

коліс із рейок $K_{ст}$ значно знижується у кривій $R = 600$ м. Це наочно демонструють результати, наведені на рис. 8, *д, е*. Збільшення A_y від 0 до 0,15 м за швидкості 70 км/год призводить до зниження коефіцієнта $K_{ст}$ в 3,13 раза (у кривій $R = 600$ м) й у 3,1 раза (у кривій $R = 350$ м). Отже, обмеження поперечного зсуву, позначеного нормами, потрібно дотримуватися, воно обумовлене різким зниженням коефіцієнта запасу стійкості від сходу коліс із рейок.

Одночасне зміщення центру ваги уздовж осей X, Y розглянуто в межах A_x та A_y від 0 до 0,15 м (рис. 9) [3, 12, 13].

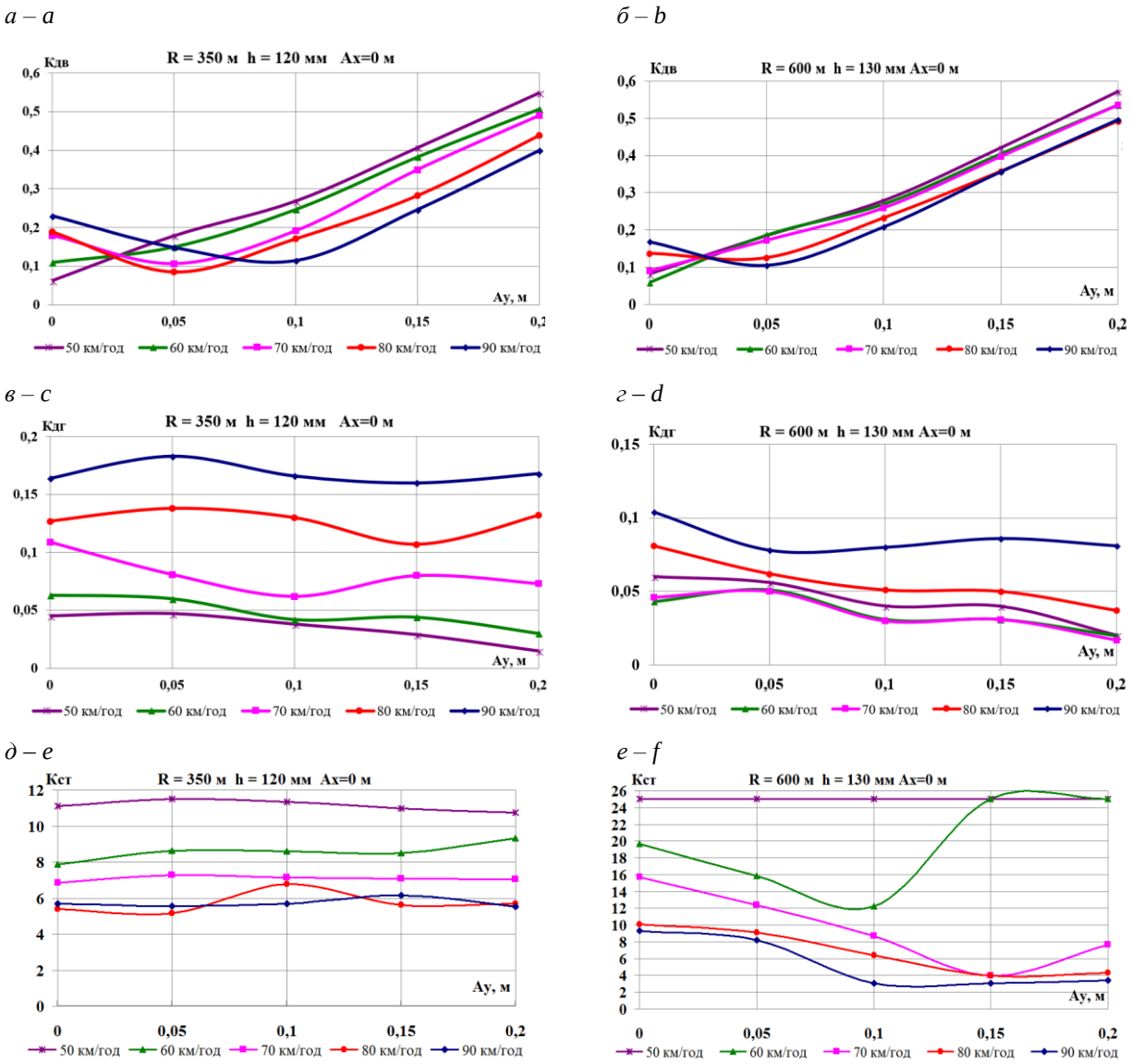


Рис. 8. Графіки залежності від зсуву вантажу в поперечному напрямку під час руху по відповідній кривій:
а, б – коефіцієнти вертикальної динаміки; *в, г* – коефіцієнти горизонтальної динаміки;
д, е – коефіцієнти стійкості від сходу з рейок

Fig. 8. Dependence graphs on the cargo displacement in the longitudinal direction when moving in the corresponding curve:
a, b – vertical dynamics coefficient; *c, d* – horizontal dynamics coefficient;
e, f – derailment stability coefficient

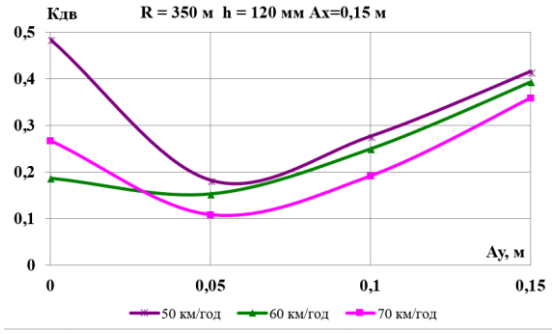
doi: 10.15802/stp2018/146432
© А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

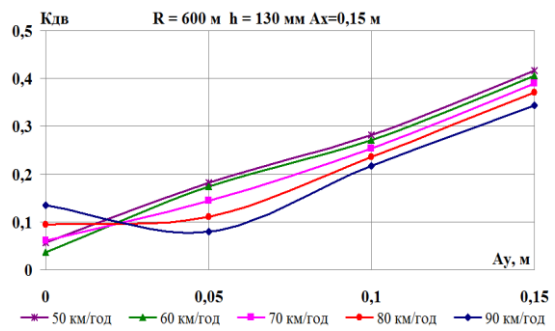
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

На рис. 9 побудовані графіки залежності динамічних показників від величини зміщення центру ваги вантажу в поперечному напрямку A_y за величини поздовжнього зміщення центру мас вантажу $A_x = 0{,}15$ м. Як видно з порівняння графіків, наведених на рис. 7 за $A_x = 0$ й рис. 9 за $A_x = 0{,}15$ м, відмінності у показниках невеликі, тобто наявність одночасного поперечного та поздовжнього зсувів центру ваги вантажу практично не позначається на динамічних показниках. Коефіцієнти вертикальної динаміки $K_{дв}$ та запасу стійкості $K_{ст}$ дещо більше залежать від одночасного поздовжнього й поперечного зміщення центру ваги вантажу.

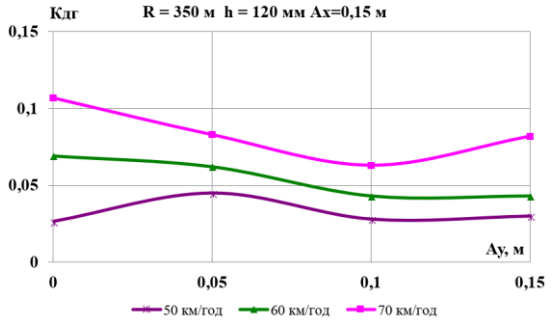
а – a



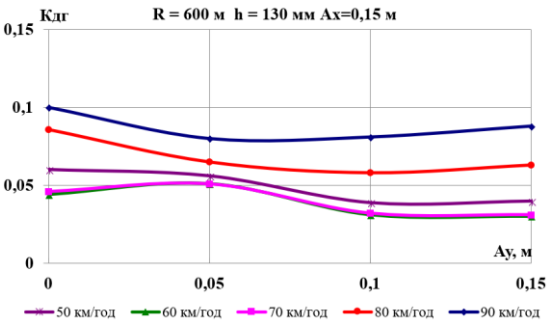
б – b



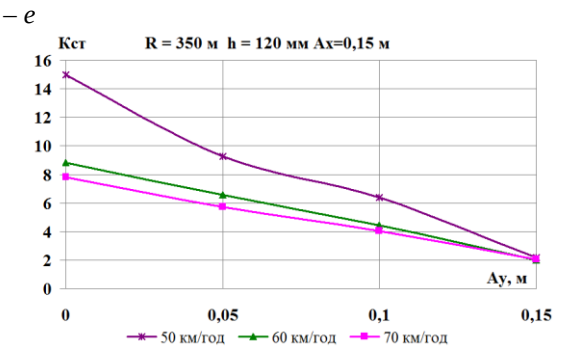
в – c



г – d



д – e



е – f

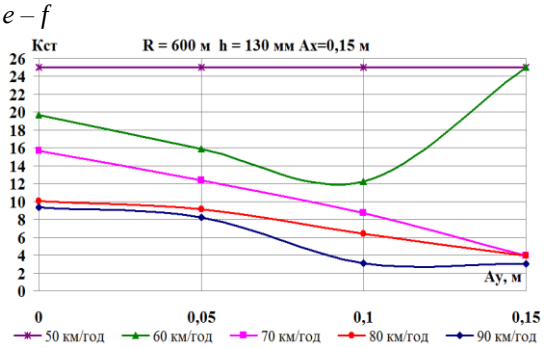


Рис. 9. Графіки залежності від одночасного зсуву вантажу в поперечному та поздовжньому напрямках під час руху у відповідній кривій:
а, б – коефіцієнти вертикальної динаміки; *в, г* – коефіцієнти горизонтальної динаміки;
д, е – коефіцієнти стійкості від сходу з рейок

Fig. 9. Dependence graphs on the cargo displacement in the longitudinal direction when moving in the cor-responding curve:
a, b – vertical dynamics coefficient; *c, d* – horizontal dynamics coefficient;
e, f – derailment stability coefficient

doi: 10.15802/stp2018/146432
© А. О. Швець, 2018

Рівень оцінки коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки від одночасного поздовжнього й поперечного зміщення центру ваги вантажу – «відмінно», але таке зміщення призводить до значного зниження коефіцієнта $K_{\text{ст}}$. Тому обмеження одночасного поздовжнього й поперечного зсуву, позначеного нормами, також потрібно дотримуватися. Крім того, розрахунки показали неможливість збільшення швидкості руху по кривих малого радіуса у зв'язку з великою ймовірністю сходження рухомого складу з рейок [1, 3, 4, 12, 13].

Розрахунки продемонстрували, що в разі несиметричного розміщення вантажу до 0,5 м уздовж та 0,05 м впоперек піввагона його горизонтальна динаміка порівняно із симетричним розташуванням вантажу мало змінюється, а вертикальні динамічні коефіцієнти збільшуються на 10–15 %.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна роботи полягає в дослідженні впливу поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу на динамічну завантаженість вагона з метою вирішення задачі прогнозування динаміки рухомого складу й включає результати теоретичних досліджень з урахуванням швидкості руху по кривих ділянках колії малого й середнього радіуса.

Одержані результати мають практичну спрямованість. У ході виконання теоретичних досліджень та після проведення моделювання з урахуванням процесів коливання вантажного вагона й вантажу за поздовжнього та поперечного зміщення центру його ваги в піввагоні отримано залежності основних динамічних показників із урахуванням швидкості руху. Застосування отриманих результатів сприятиме підвищенню безпеки руху вантажних вагонів і дозволить поліпшити техніко-економічні показники роботи залізничного транспорту.

Висновки

У статті подано аналіз проведених теоретичних досліджень динамічних якостей рухомого складу на прикладі піввагонів, розрахунки виконано з використанням пакета прикладних програм.

На підставі дослідження можна зробити наступні висновки:

– поздовжні зміщення вантажу викликають збільшення коефіцієнтів вертикальної динаміки й не повинні перевищувати значень, визначених нормами;

– обмеження поперечного зсуву, визначеного нормами, потрібно дотримуватися; воно спричинене не збільшенням коефіцієнтів динаміки, а різким зниженням коефіцієнта запасу стійкості від сходу коліс із рейок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2016–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 54 с.
2. Данович, В. Д. Математическая модель пространственных колебаний сцепа пяти вагонов, движущихся по прямолинейному участку пути / В. Д. Данович, А. А. Малышева // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава : сб. науч. тр. / Днепропетр. гос. техн. ун-т ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1998. – С. 62–69.
3. ДСТУ ГОСТ 22235:2015. Вагони вантажні магістральних залізничних доріг колії 1520 мм. Загальні вимоги щодо забезпечення збереження під час завантажувально-розвантажувальних та маневрових робіт (ГОСТ 22235-2010, IDT). – Введ. 2016–02–01. – Київ : УкрНДНЦ, 2015. – 20 с.
4. ДСТУ ГОСТ 33211:2017. Вагони вантажні. Вимоги до міцності та динамічних якостей (ГОСТ 33211-2014, IDT). – Введ. 2017–07–01. – Київ : УкрНДНЦ, 2017. – 58 с.
5. Збірник № 17 Правил перевезення і тарифів залізничного транспорту України. – Київ : САМ, 2005. – 176 с.
6. Определение допустимых сил при оценке устойчивости грузовых вагонов от выжимания в поездах / А. А. Швец, К. И. Железнов, А. С. Акулов, А. Н. Заболотный, Е. В. Чабанюк // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 189–192. doi: 10.15802/stp2016/61045
7. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії : ЦП 02336. – Київ : Укрзалізниця, 2013. – 44 с.

doi: 10.15802/stp2018/146432 © А. О. Швець, 2018

8. Романов, А. Н. Определение смещения центра тяжести груза в железнодорожном вагоне / А. Н. Романов, Ф. И. Гиревка, Д. Г. Заворотный // ПиКАД: Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2007. – № 3. – С. 34–35.
9. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. – Москва : Юртранс, 2003. – 544 с.
10. Швець, А. О. Аналіз засобів проектування та методів удосконалення конструкцій вантажного рухомого складу / А. О. Швець // Вісник сертифікації залізничного транспорту. – 2018. – № 02 (48). – С. 61–73.
11. Швець, А. О. Особливості визначення моментів інерції кузовів вантажних вагонів / А. О. Швець // Вісник сертифікації залізничного транспорту. – 2018. – № 5 (51). – С. 20–34.
12. BS EN 14363:2005. Railway applications. Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Testing of running behavior and stationary tests. – Publication Date 2006-04-28. – Brussels : BSI, 2005. – 118 p.
13. BS EN 14363:2016. Railway applications. Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Running behavior and stationary tests. – Publication Date 2016-04-30. – Brussels : BSI, 2005. – 198 p.
14. Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car / A. O. Shvets, K. I. Zhelieznov, A. S. Akulov, O. M. Zabolotnyi, Ye. V. Chabaniuk // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 134–148. doi: 10.15802/stp2015/57098
15. Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear / E. P. Blokhin, O. M. Pshinko, V. D. Danovich, M. L. Korotenko // Railway Bogies and Running Gears : Proc. of the 4th Intern. Conf. / Technical University of Budapest. – Budapest, 1998. – P. 313–323.
16. Impact of cargo distribution on the vehicle flatback on braking distance in road freight transport / T. Skrúcaný, J. Vrábel, M. Kendra, P. Kažimír // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 134 : 18th International Scientific Conference – LOGI 2017 (19 Oct. 2017, Czech Republic). doi: 10.1051/matecconf/201713400054
17. Navarrete, J. A. Experimental and theoretical modeling of cargo sloshing during braking / J. A. Navarrete, F. Otremba // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Phoenix, Arizona, USA, Nov. 11–17, 2016). – Phoenix, 2016. – Vol. 4B : Dynamics, Vibration, and Control. doi: 10.1115/imece2016-65698
18. Ramos, A. G. A new load balance methodology for container loading problem in road transportation / A. G. Ramos, E. Silva, J. F. Oliveira // European Journal of Operational Research. – 2018. – Vol. 266. – Iss. 3. – P. 1140–1152. doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.050
19. Transit cooperative research program Report 71. Track-Related Research. Vol. 5 : Flange Climb Derailment Criteria and Wheel/Rail Profile Management and Maintenance Guidelines for Transit Operations. – Washington : Transportation Research Board, 2005. – 147 p.
20. Turanov, Kh. Mathematical Modeling of Cargo Motion Crosswise the Wagon under the Action of Plane Force System / Kh. Turanov // Science and Technology. – 2015. – № 5 (1) – P. 5–14. doi: 10.5923/j.scit.20150501.02

А. А. ШВЕЦ[1*]

[1*]Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 214 14 19, эл. почта angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-8469-3902

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ГРУЗА В ПОЛУВАГОНАХ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Цель. Повышение скорости движения железнодорожных экипажей позволяет усилить интеграционные процессы со странами Европы и Азии, однако приводит к необходимости совершенствования контроля, количественной оценки динамической загруженности подвижного состава для соблюдения безопасного и надежного сообщения на железных дорогах. Поэтому в процессе проектирования и эксплуатации подвижного состава количественная оценка динамических нагрузок составляет актуальную научно-техническую задачу. Целью настоящей работы является исследование влияния продольного и поперечного смещения

doi: 10.15802/stp2018/146432 © А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

центра тяжести груза в полувагонах при увеличении скорости движения на их основные динамические показатели – коэффициенты горизонтальной и вертикальной динамики, коэффициент устойчивости от схода с рельсов. **Методика**. За основу исследования взят метод математического и компьютерного моделирования динамической загруженности грузового полувагона с использованием модели пространственных колебаний сцепа пяти вагонов и программного комплекса, разработанного в отраслевой научно-исследовательской лаборатории динамики и прочности подвижного состава (ОНИЛ ДППС) Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Теоретические исследования проведены при движении полувагона модели 12-532 с типичными тележками 18-100 со скоростями в диапазоне от 50 до 90 км/ч по кривым с радиусами 350 и 600 м, с повышениями наружного рельса 130 и 120 мм соответственно. **Результаты**. В статье представлен анализ теоретических исследований динамических качеств подвижного состава на примере полувагонов. Расчеты с использованием пакета прикладных программ проведены с достаточной для практики точностью. В ходе выполнения теоретических исследований и после моделирования с учетом процессов колебания грузового вагона и груза при продольном и поперечном смещении центра его веса в полувагоне получены зависимости основных динамических показателей с учетом скорости движения. **Научная новизна.** В работе исследовано влияние продольного и поперечного смещения центра тяжести груза на динамическую загруженность вагона с целью решения задачи прогнозирования динамики подвижного состава. Впервые представлены результаты теоретических исследований с учетом скорости движения по кривым участкам пути малого и среднего радиуса. **Практическая значимость.** Работа имеет практическую направленность. Применение полученных результатов будет способствовать повышению безопасности движения грузовых вагонов и позволит улучшить технико-экономические показатели работы железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: груз; полувагоны; динамические показатели; кривые участки пути; продольное и поперечное смещение центра тяжести; скорость движения

A. O. SHVETS[1*]

[1*]Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 214 14 19,
e-mail angela_Shvets@ua.fm, ORCID 0000-0002-5537-6617

INFLUENCE OF THE LONGITUDINAL AND TRANSVERSE DISPLACEMENT OF THE CARGO GRAVITY CENTER IN GONDOLA CARS ON THEIR DYNAMIC INDICATORS

Purpose. Increase in the movement speed of railway vehicles makes it possible to strengthen integration processes with the countries of Europe and Asia and leads to the need to improve control, to quantify the dynamic load of rolling stock to ensure safe and reliable communication on the railways. Therefore, in the process of design and operation of rolling stock, the quantitative assessment of dynamic loads constitutes an urgent scientific and technical task. The purpose of this paper is to investigate the effect of longitudinal and transverse displacement of the cargo gravity center in gondola cars during movement speed increase on their main dynamic indicators –the horizontal and vertical dynamics coefficients, the derailment stability coefficient. **Methodology**. The study was carried out by the method of mathematical and computer simulation of the dynamic loading of freight gondola car using the model of spatial oscillations of the five cars coupling and the software complex developed in the branch research laboratory of dynamics and strength of rolling stock (BRL DSRS) of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Theoretical studies were carried out during the movement of the 12-532 gondola car model with typical bogies 18-100 with speeds in the range from 50 to 90 km/h in curves with radii of 350 and 600 m, with increases of the outer rail 130 and 120 mm, respectively. **Findings**. The article presents analysis of the carried out theoretical researches of dynamic qualities of rolling stock using the example of gondola cars. Calculations are performed using the package of applied programs with sufficient accuracy for practice. When performing the theoretical studies and after modeling, taking into account the processes of oscillation of the freight car and cargo at the longitudinal and transverse displacement of its gravity center in the gondola car, the dependences of the main dynamic parameters taking into account the movement speed were obtained. **Originality**. The article investigates the effect of longitudinal and transverse displacement of the load's gravity center on the dynamic loading of the car in order to solve the problem of forecasting the rolling stock dynamics. The results of theoretical stud-

doi: 10.15802/stp2018/146432 © А. О. Швець, 2018

ies taking into account the movement speed in curved track sections of small and medium radius. **Practical value**. The article has a practical focus. Application of the results will contribute to improving the traffic safety of freight cars and will improve the technical and economic performance of the railway transport.

Keywords: cargo; gondola cars; dynamic indicators; curved track sections; longitudinal and transverse displacement of the gravity center; gravity center; movement speed

REFERENCES

1. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam, 54 GOST 33211-2014 (2016). (in Russian)
2. Danovich, V. D., & Malysheva, A. A. (1998). Mathematical Model of Spatial Oscillations of the Coupling of Five Cars Moving Along a Rectilinear Section of the Track. *Transport. Stress Loading and Durability of a Rolling Stock*, 62-69. Dnepropetrovsk. (in Russian)
3. Vahony vantazhni mahistralnykh zaliznychnykh dorih kolii 1520 mm. Zahalni vymohy shchodo zabezpechennia zberezhennia pid chas zavantazhuvalno-rozvantazhuvalnykh ta manevrovykh robit, 20 DSTU GOST 22235:2015 (2015). (in Ukrainian)
4. Vahony vantazhni. Vymohy do mitsnosti ta dynamichnykh yakostei, 58 DSTU 33211:2017 (2017). (in Ukrainian)
5. *Zbirnyk № 17 Pravyl perevezennia i taryfiv zaliznychnoho transportu Ukrainy*. (2005). Kyiv: SAM. (in Ukrainian)
6. Shvets, A. A., Zheleznov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotny, A. N., & Chabanyuk, E. V. (2016). Determination the permissible forces in assessing the lift resistant factor of freight cars in trains. *Science and Transport Progress, 1(61),* 189-192. doi: 10.15802/stp2016/61045 (in Russian)
7. Pravyla vyznachennia pidvyshchennia zovnishnoi reiky i vstanovlennia dopustymykh shvydkostei v kryvykh diliankakh kolii. TsP 02336. (2013). Kyiv: Ukrzaliznytsia. (in Ukrainian)
8. Romanov, A. N., Girevka, F. I., & Zavorotny, D. G. (2007). Opredelenie smeshcheniya tsentra tyazhesti gruza v zheleznodorozhnom vagone. *PiKAD: Promyshlennye izmereniya, kontrol, avtomatizatsiya, diagnostika, 3,* 34-35. (in Russian)
9. *Tekhnicheskie usloviya razmeshcheniya i krepleniya gruzov v vagonakh i konteynerakh*. (2003). Moscow: Yurtrans. (in Russian)
10. Shvets, A. O. (2018). Analysis of Design Tools and Methods to Improve Designs of Freight Rolling Stock. *Visnyk sertyfikatsii zaliznychnoho transportu, 02(48),* 61-73. (in Ukrainian)
11. Shvets, A. O. (2018). Osoblyvosti vyznachennia momentiv inertsii kuzoviv vantazhnykh vahoniv. *Visnyk sertyfikatsii zaliznychnoho transportu, 5(51),* 20–34. (in Ukrainian)
12. Railway applications. Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Testing of running behavior and stationary tests, 118 BS EN 14363:2005 (2005). (in English)
13. Railway applications. Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Running Behavior and stationary tests, 198 BS EN 14363:2016 (2016). (in English)
14. Shvets, A. A., Zhelieznov, K. I., Akulov, A. S., Zabolotnyi, A. N., & Chabaniuk, Ye. V. (2015). Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Science and Transport Progress, 6 (60),* 134-148. doi: 10.15802/stp2015/57098 (in English)
15. Blokhin, E. P., Pshinko, O. M., Danovich, V. D., & Korotenko, M. L. (1998). Effect of the state of car running gears and railway track on wheel and rail wear. *Railway Bogies and Running Gears: Proceedings of the 4th International Conference* (pp. 313-323). Budapest. (in English)
16. Skrúcaný, T., Vrábel, J., Kendra, M., & Kažimír, P. (2017). Impact of cargo distribution on the vehicle flatback on braking distance in road freight transport. *MATEC Web of Conferences*: *18th International Scientific Conference – LOGI 2017 (19 Oct. 2017, Czech Republic), 134*. doi: 10.1051/matecconf/201713400054 (in English)
17. Navarrete, J. A., & Otremba, F. (2016). Experimental and theoretical modeling of cargo sloshing during braking. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Phoenix, Arizona, USA, Nov. 11-17, 2016). *Dynamics, Vibration, and Control, 4B.* Phoenix. doi: 10.1115/IMECE201665698 (in English)
18. Ramos, A. G., Silva, E., & Oliveira, J. F. (2018). A new load balance methodology for container loading problem in road transportation. *European Journal of Operational Research, 226(3),* 1140-1152. doi: 10.1016/j.ejor.2017.10.050 (in English)

doi: 10.15802/stp2018/146432 © А. О. Швець, 2018

19. Transit cooperative research program Report 71. Track-Related Research. Volume 5: Flange Climb Derailment Criteria and Wheel/Rail Profile Management and Maintenance Guidelines for Transit Operations. (2005). Washington: Transportation Research Board. (in English)
20. Turanov, K. (2015). Mathematical Modeling of Cargo Motion Crosswise the Wagon under the Action of Plane Force System. *Science and Technology, 5(1),* 5-14. doi: 10.5923/j.scit.20150501.02 (in English)

Надійшла до редколегії: 11.06.2018
Прийнята до друку: 20.09.2018

doi: 10.15802/stp2018/146432 © А. О. Швець, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDC 691.32-024

D. V. RUDENKO[1]*

[1*]Dep. «Project Management, Building and Building Materials», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. + 38 (098 214 04 85), e-mail veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

PROPERTIES OF MODIFIED CONCRETE FOR SPECIAL PURPOSE STRUCTURES

Purpose. The paper is aimed at developing the scientific fundamentals of new-generation monolithic concrete technology for special purpose structures by controlling the processes of structure formation of a modified cement system under natural hardening conditions. **Methodology.** The kinetics of interaction between the cement system and aggregates was evaluated by microcalorimetry. The measurements were carried out continuously for 24 hours after preparation of the mixture. The differential and integral characteristics of the heat release of the solidifying system were recorded. Investigation of the rheological properties of concrete mixtures was carried out on the mixtures with 10...15 cm consistency. The microhardness of contact layers was investigated on concrete cubes with dimensions from 20×20×20 to 50×50×50 mm. When determining the structural characteristics, x-ray phase and differential-thermal analyzes of the concrete cement matrix were used. Infrared spectroscopy was used to determine the effect of physicochemical modification on the cement system. Tensile creep was studied over a wide load range from $0.2R_t$ to $0.8R_t$. **Findings.** It is determined that the reason for changing the concrete properties of natural hardening is the change in its hygrometric and thermal state, as well as the harmonic fluctuations of these environmental factors. The hygrometry of concrete depends on the thermal moisture conditions of the environment, the type and composition of concrete, the massiveness of concrete elements. An analysis of these factors and experimental data made it possible to establish the exponential dependence of the change in the hygrometric state of monolithic natural hardening concrete. The change in the moisture state of concrete makes it possible to predict its volumetric deformations. **Originality**. For the first time, the features of the structure formation of a modified cement system are established, consisting in the fact that magnesium chloride hydrate crystals grow rapidly in the space between hydrated clinker minerals, and the resulting mechanical cohesion defines the development of initial strength and rigidity. Since the free growth of crystals is hampered by a lack of space, the crystals mutually intergrow, forming a dense structure, contributing to the growth of strength. The developed organo-mineral modifying complex provides disperse reinforcement of the cement matrix of concrete. **Practical value**. The obtained dependences of structural concrete stresses make it possible to analyze their effect on the structure of modified concrete: to determine the probability of formation around the filler particles of the plastic flow zone, the material microcrack formation zone, the crack initiation period, the microcrack onset conditions, and the change of elasticity modulus of the material caused by microcracks in its structure. Disperous modification of cement matrix allows to obtain durable concrete of special purpose with design operational properties. The developed binder disperse modification technology, the established features of the structure formation mechanism for the modified cement system, as well as the use of the principle of congruence of a complex of technological influences to the physico-chemical processes of hydration of clinker minerals allowed developing the scientific fundamentals for the special purpose concrete technology. This helps to expand the use of modified concrete in various types of construction.

Keywords: modified concrete; disperse modification; structure formation; cement system; structural characteristics; durability

doi: 10.15802/stp2018/146434

© D. V. Rudenko, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Introduction

The development of capital construction in a market economy is closely linked with the tasks of further increasing the efficiency of construction production, reducing the cost and complexity of technological processes, economical use of material and energy resources, the use of new progressive materials [7, 8, 10, 12, 18].

Obtaining concrete of special purpose with high operational properties is possible by using different additives of organic and mineral origin. However, along with the positive effect, organic additives have a number of significant drawbacks, the main of which is the violation of the initial processes of hydration of the cement system in concrete. The organic plasticizer molecules are adsorbed onto cement particles and inhibit the hydration of the cement matrix with all the resulting consequences.

One of the promising structural materials is dispersed reinforced concrete. Such concrete is one of the varieties of a large class of composite materials, which are now increasingly used in various industries. Disperse reinforcement is carried out by fibers of various nature, uniformly distributed in the volume of the cement matrix, and is one of the ways of modifying the concrete cement system [2, 3, 17].

The uniqueness of modern buildings and structures being erected determines a complex of high operational requirements for this material. First of all, they include the high strength, the stability of heavy concrete in different operating conditions and the highest possible durability of the selected material [1, 6, 11].

The current level of development of construction requires the further development of the concept of new generation concretes, which are necessary for the perception of increasing natural and man-made impacts, as well as for special conditions of exploitation.

The development of the binding system activation methods was promoted due to the studies by G. R. Wagner, V. M. Glushchenko, G. Gouda, I. G. Grankovsky, L. I. Dvorkin, P. Clark, M. M. Kruglytsky, V. A. Matvienko, M. I. Netesa, O. O. Pashchenko, O. M. Pshinko, D. M. Roy, N. M. Rudenko, M. A. Sainitskiy, V. I. Solomatov, M. B. Uriev, M. Sh. Finer, Yu. G. Hayutin, O. O. Shishkin, Yu. Steierman, B. E. Yudovich and others.

Obtaining concrete of marginal strength is one of the main problems of modern concrete technology. Taking into account the considerable accumulated experience in this direction, it should be noted that the solution of this problem is possible with the purposeful management of the processes of hydration and structural formation of the cement matrix of concrete [9, 13-16].

The most vulnerable part of the concrete conglomerate is its cementing matrix. The study of foreign practice in the construction of unique objects has shown that the efforts of researchers and builders are aimed at increasing the physical and technical characteristics of the cement matrix. It is provided with the use of high-early cements of high grade or cement remilling, as well as various additives that provide the maximum possible reduction of water-cement ratio. In particular, the practice of using super- and hyperplasticians is widely used. Improvement of other properties of concrete is also achieved by using various complex additives. Particular attention in obtaining concrete with high operational properties is paid to increasing the operational stability of the cementious matrix. As a rule, this is achieved by a combination of the described technological measures with the use of highly dispersed microfiller with amorphous surface in the concrete composition.

Purpose

Development of scientific fundamentals of new-generation monolithic concrete technology for special purpose structures by controlling the processes of structure formation of a modified cement system under natural hardening conditions.

Methodology

The kinetics of interaction between the cement system and aggregates was evaluated by microcalorimetry. The measurements were carried out continuously for 24 hours after preparation of the mixture. The differential and integral characteristics of the heat release of the solidifying system were recorded. Investigation of the rheological properties of concrete mixtures was carried out on the mixtures with 10...15 cm consistency. The microhardness of contact layers was investigated on concrete

doi: 10.15802/stp2018/146434
© D. V. Rudenko, 2018

cubes with dimensions from 20×20×20 to 50×50×50 mm. When determining the structural characteristics, x-ray phase and differential-thermal analyzes of the concrete cement matrix were used. Infrared spectroscopy was used to determine the effect of physicochemical modification on the cement system. Tensile creep was studied over a wide load range from $0.2R_t$ to $0.8R_t$.

Findings

The microstructure of a modified cement concrete matrix is formed in the form of well crystallized, spiral tubular filamentous crystals. The mechanical grip of these crystals is considered as the main source of strength formation along with the additional grip, which is achieved as a result of the mutual intergrow of the crystals when they collide with each other. Slow solidification and rapid hardening of the modified cement concrete system allows the use of such concrete mixtures for concrete pumping transport and transport them over long distances when erecting buildings and structures.

The process of formation of the modified concrete coagulation structure in natural conditions is carried out due to the selective adsorption of ions and associates from the liquid phase, the change in the contact area in the spatial plastic structure, the directed growth of crystals. The coagulation-crystallization structure of the modified cement matrix derives the features of the mutual arrangement of aggregate structures, the porosity and dispersion type. Herewith, the mineral part of the modifier is a chemically active component – an additional source of hydrated phases, which contributes to the strengthening of the binding system. The physico-chemical modification of the cement system of concrete creates special conditions for the formation of a spatial structure that differs in structure from ordinary concrete.

From the moment of the preparation of the modified concrete mixture, the defect in the surface monolayer of the cement particle increases, thereby affecting the amplitude of the oscillations of the crystalline lattice nodal atoms. The combination of thermal, chemical and mechanical influences leads to a disturbance of the distant order of the crystalline lattice of the cement particle surface layer, causing the atoms to oscillate near the equilibrium positions more intensively.

It is important that the complex modification of the concrete mixture creates special conditions for the formation of the contact area of the cement matrix and filler grains. Modification creates conditions for the formation of a pseudo-solid body, the deformation of which manifests itself in the form of an elastic aftereffect. This creates the conditions for marginal packing of grains of different granulometry and optimization of the thickness of the contact layers with the minimum possible porosity of the material. Modification of the cement system leads to the equalization of the water-cement ratio in all layers of the concrete mixture. The reason for this is the high level and constancy of the hydrostatic pressure of water. In this case, the formation of the contact layer cement matrix – filler occurs in special conditions.

The microhardness of the concrete contact layers was investigated. The microhardness value was characterized by the magnitude of the diamond cone imprint. The cement matrix microhardness parameters listed in Table 1 indicate that the strength of the intergranular area is substantially inferior to the strength of the contact area for ordinary concrete. The imprint diameters in the intergranular area are 15...17% bigger than the values in the contact area with the filler. For the cement matrix of modified concrete, these parameters are close by values. It is established that in modified concrete the strength of the contact and intergranular area of the cement matrix differs by 3...7%, which explains the increase in concrete strength during tension.

At low values of W/C close to [W/C], the contact areas of the cement matrix are practically overlapping, which determines the high strength of such concrete during tension. Thus, it can be concluded that in the modified concrete a cement matrix is formed, practically isotropic from the surface of the filler to the centers of the intergranular layers. Such matrix is characterized by high adhesion to the filler surface, approximately equal to its cohesive properties. The established position is confirmed by the concrete structure analysis.

doi: 10.15802/stp2018/146434
© D. V. Rudenko, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

Table 1

Concrete cement matrix microhardness parameters

Type of concrete	W/C	Average diameter of the diamond cone imprint, 10^{-7} m	
		contact area	intergranular area
Modified	0.29	2.6	2.8
	0.31	3.0	3.1
	0.33	3.3	3.4
Ordinary	0.42	4.6	5.2
	0.44	5.1	5.7
	0.46	5.4	6.2

The kinetics of the interaction of the binder and fillers in the solidifying dispersion system was evaluated by methods of microcalorimetry. The measurements were carried out continuously for 24 hours after preparation of the mixture. The differ-rential and integral characteristics of the heat generation of the solidifying mixture were recorded. In the process of measurements, the microcalorimeter maintained the temperature of 20°C. The heat generation of cement systems with W/C=0.30...0.42 differs significantly. The differentiated heat generation of cement systems, prone to modification, differs significantly. They are characterized by high-intensity heat generation in the period up to one day of hardening, whereas in traditional samples the heat generation rate change basically ends up to 7-day age.

After four hours of hardening of the modified concrete, we observe the heat generation process intensification, which indicates the recrystallization, as well as the stabilization of the cement matrix structure.

Comparison of the cement matrix microhardness data with the microcalorimetric study data shows that between the filler and the cement matrix there is a physical interaction, which leads to the formation of a contact area consisting of layers on the edge of the cement matrix and the filler and the surface of the partition between them. The value of the cement matrix adhesion to the filler surface is several orders of magnitude higher than that of the ordinary concrete. This explains the significant increase in the strength of concrete during tension compared with the ordinary concrete.

With almost constant ratio of volumes of hydrated phases and porous space, they undergo regular qualitative changes in time. In the solid phase, as far as the cementing agent is exponentially accumulated, the volume of relic minerals exponentially decreases as well. Although the cementing agent at various stages of its formation is represented by a set of high-base forms of hydrated newgrowths, their structure depends on the technological conditions of structuring.

Change in quantitative characteristics of the modified concrete structure was observed when changing the modification parameters. The observed changes in the morphological structure of the cement matrix can not be random, as they are confirmed by repeated experiments with reproducibility from 82 to 96%. At the same time, such change in the newgrowth morphology is not observed in the ordinary concrete. The data obtained show a significant increase in the lamellar-prismatic component in the cement matrix of the modified concrete. With longer curing time, the number of formed crystalline newgrowths increases.

This can be explained by the system approach: the cement matrix structure morphology is the result of the interaction of the build and growth systems. In this case, the growth system (structure recrystallization and development in time) can effectively develop without a sufficiently complete development of the build system (accumulation of primary hydration products). The developed system of cement particle hydration build-up in favorable conditions of the hydraulic pressure of the surrounding water due to thixotropy will weaken the morphology of structural newgrowths. However, this phenomenon is not observed in ordinary concrete, where there is no structure modification. According to experimental data obtained by complex methods of studying the structure, development in volumes of similar morphological structures can reach 20%. Herewith, the hydration rate increases by 11...14%.

doi: 10.15802/stp2018/146434
© D. V. Rudenko, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

The research of physical and mechanical properties of the concrete mixture and the concrete on the modified cement system was carried out. Research of rheological properties of the concrete mixtures was carried out on mixtures with 10...15 cm mobility. Physico-chemical modification of the cement system provides the obtaining of mobile concrete mixtures with the decreased cement cost per 1 m^3 of concrete by 32...37%. The ease of laying these concrete mixtures is stable in the range of used compositions. This allows asserting that the cement system modification provides obtaining of non-disintegrating concrete mixtures. In contrast, the ordinary concrete mixtures were characterized by obvious signs of stratification. In this case, with the cone slump (CS) =15 cm, the composition with a minimum cement consumption was subjected to the disintegration as well.

It is established that the use of modified cement systems contributes to increasing the water-retaining capacity of concrete mixtures. In view of transportation without the vibration effect, the water-retaining capacity of the modified cement system is W/C = 1.3 [W/C].

The technological properties of the concrete mixture are largely determined by its viability in a certain period of time. The viability of the mixtures is significantly affected by the environment. In the laboratory, the mixture mobility change in time was determined by the cone slump measurement. The intensity of CS change depended on the conditions of concrete and the type of experiments conducted. The results of experiments are presented in Table 2.

Table 2

Influence of concrete mixture curing time on its mobility (initial cone slump of 15 cm)

Type of mixture	Curing conditions	Concrete mixture mobility, cm, in						
		15 min	30 min	45 min	60 min	75 min	90 min	105 min
Ordinary	Laboratory	12	10	7	6	4	3	3
	Climatic camera	12	8	5	4	3	2	2
On a modified binder	Laboratory	15	15	14	13	13	12	12
	Climatic camera	15	13	13	12	11	10	10

It was established that the modification of the cement system contributes to increased strength of the concrete during tension and bending. This explains the decrease in the values of the ratios R/R_t and R/R_b of the modified concrete, which solidified under natural conditions (Table 3).

Table 3

Concrete strength ratio at tension and compression

Concrete strength limit, MPa			Ratio R/R_t	Ratio R/R_b
At compression (R)	At tension (R_t)	At bending (R_b)		
Ordinary concrete				
45.6	2.75	3.28	16.5	13.9
47.5	2.94	3.69	16.1	12.9
52.9	3.17	4.07	16.7	13.0
54.7	3.23	4.28	16.9	12.8
Modified concrete				
76.4	5.78	12.07	13.21	6.33
80.3	6.87	12.87	11.76	6.24
91.9	8.04	14.24	11.43	6.45

doi: 10.15802/stp2018/146434
© D. V. Rudenko, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

It has been experimentally found that the modified concrete in specific conditions of operation is ensured with fairly high atmospheric resistance. The indicated is also confirmed by stable values of material strength in the research process. For ordinary concrete there is a decline in strength both during compression and bending. Standard samples began to collapse after 127 cycles of water saturation and drying, while samples of modified concrete were in a satisfactory condition to almost 200 cycles, after which the tests were discontinued.

Taking into account the operation of elements of concrete and reinforced concrete structures in conditions of variable water level, they are subjected to alternate freezing and thawing under conditions of capillary suction. Therefore, the concrete, intended for erection and restoration of special structures, must have high frost resistance. The theoretical prerequisite for increasing the frost resistance of concrete is the modification of its pore structure.

The estimation of the parameters of conditionally closed porosity of concrete was carried out by means of microscopic studies on concrete polished sections by the linear method. The chosen method of determining the specific surface of the concrete polished sections is the most widely used and is called the linear intercept method.

The X-ray diffraction and differential-thermal analyzes of concrete cement matrix have been carried out. As follows from diffractograms, the composition of newgrowths in a cement stone of the ordinary concrete is somewhat different from the same composition of the modified concrete. In the ordinary concrete, there is identified the three-sulfate form of hydrosulfoalumite calcium (d=9.73; 5.61; $3.85 \cdot 10^{-10}$ m), C_3AH_6 (d=4.45; 2.30; $1.572 \cdot 10^{-10}$ m), $Ca(OH)_2$ (d=4.91; 2.61; $1.79 \cdot 10^{-10}$ m), hydrosilicates of calcium of increased basicity (d=3.03; 2.83; 2.026; 1.632 m). The modified concrete newgrowths are characterized by formation of four-calcium hydroaluminate (d = 7.8, 3.85, 2.43, $1.67 \cdot 10^{-10}$ m), as well as recrystallization into a monosulfate form of calcium hydrosulfoaluminate (d = 8.92, 4.96; 3.99; $2.25 \cdot 10^{-10}$ m), which obviously contributes to the increased frost resistance of the modified concrete.

The data of the differential-thermal analysis confirm the results obtained during radiographic studies. The endoeffect with a maximum of 132°C on a thermogram of the ordinary concrete cement stone subjected to the frost resistance test corresponds to the dehydration of the three-sulfate form of calcium hydrosulfoaluminate and calcium hydrosilicates. The temperatures 440-445°C correspond to the decomposition of $Ca(OH)^2$, while for the modified cement matrix the effect is less noticeable. At low temperatures of 586, 698, 716 °C, low-mass hydrosilicates of calcium type CSH (B) and C_2SH_2 are dehydrated. The endoeffects at temperatures of 690 and 710 °C for the ordinary cement stone also correspond to the decomposition of $CaCO_3$, although calcium carbonate is exuded in a small amount.

The purpose of physico-chemical modification of the cement system is to create conditions for a highly efficient reaction of clinker minerals with water at sufficient rapidity. Herewith the solid products with very low solubility and microstructure should be formed, which provides the necessary mechanical strength, volume stability and other necessary properties. The formation of adsorption layers on the surface of cement grains is the most important stage of the modification process. While playing the same role as protective colloids, these layers regulate the growth of crystals at certain stages of the clinker minerals hydration process. The action of modifiers in a concrete mixture is reduced to multiplication of seeds and to their growth in the cement system. This is due to the fact that modifiers, being a surfactant and acting on the edge of the crystals formed from the solution, contribute to the increase of surface activity, and also affect their shape. Since under other equal conditions the growth rate of crystals is often proportional to the surface tension, even very small additions of substances that are capable of altering the surface tension significantly affect the degree of grain wetting, the crystallization nature and the newgrowth pecularities.

The simulation of interconnections in the modified cement system was performed, as well as the differential equations for the potential were derived, which correspond to any distribution of physical boundaries and charges in the cement system. It was proved that it is necessary to divide the liquid phase into several areas, each of which the Laplace equation or the Poisson equation can be applied to. Then the solution of these equations depends on the conditions that obey the corresponding parameters within the boundaries of the areas where the equation data apply.

doi: 10.15802/stp2018/146434
© D. V. Rudenko, 2018

When maintaining samples of concrete in a sulfate medium for 360 days, the decrease in the modified concrete strength is 3...6% (decrease in the ordinary concrete strength – 12...23%), the coefficient of sulfate resistance K_s is within 0.91...0.93.

Stabilization of the modified concrete strength in time indicates the predominance of constructive processes over destructive ones.

The mathematical model of the corrosion resistance processes was obtained. The experimental data resulted in the equation which binds the sulphate stability of the concrete with the parameters of the aggressive medium (content of sulfate ions) and the concrete characteristics (content of C_3A, cement, $CaCO_3$ in the fine filler, cement system modification degree) [5]. The test for adequacy has shown good convergence of model results. The deviation of the calculated K_s from the experimental one in the whole range of tests does not exceed $\delta_{ks} = \pm 0.1$.

The deformation properties and the stress state of modified concrete for special purpose were investigated. It was established that the causes of volumetric changes of concrete are shrinkage and temperature deformation. Herewith, in the natural conditions of concrete hardening it is important to take into account both types. Moreover, the value of temperature deformations of concrete in natural conditions may be close to the amount of shrinkage.

Shrinkage deformations were investigated for conditions of linear drying, for which purpose the concrete was laid in glass tubes, open on one side. The 14-day age deformations vary depending on the sample length to five times. Despite some smoothing of this difference over time, it remains significant even at 60-day age.

The equations obtained from the test results allow us to solve the question of the minimum level of structural stresses in monolithic concrete with its certain saturation with large aggregate, and also to evaluate the influence of structural stresses on the concrete properties [4]. The ordinary concrete with a relatively thin cement sheath are characterized by high tangential and small radial stresses at temperature-shrinkage deformations. Under natural conditions, these stresses are higher as a result of increased values of $\Delta\varepsilon(\tau)$, which is not observed in the modified concrete. In the modified concrete, only the tangential stresses present the greatest danger to the structure.

Change in shrinkage stresses in time is unambiguous. Total temperature-shrinkage deformations have a saw-tooth graph. For the modified concrete, the amplitude of fluctuations is 48...53% less.

The tensile creep was studied in a wide range of loads from $0.2\underline{R_t}$ to $0.8R_t$ with the modified concrete strength during tension of 3.68 MPa and that of the ordinary concrete of 2.04 MPa. As the stresses σ / R_{tc} increase, the magnitude of the creep deformations of ordinary concrete increases significantly. However, the nature of the creep deformation of the modified concrete during tension differs from the generally known. The main difference between all the curves is a significant superiority of the creep deformation of the ordinary concrete samples. Up to 90-day age, for all values of σ / R_{tc}, the creep deformations are practically stabilized. Consequently, in this age it is convenient to compare the creep deformations of the samples with different values of σ/R_{tc}.

Originality and practical value

For the first time, the features of the structure formation of a modified cement system are established, consisting in the fact that magnesium chloride hydrate crystals grow rapidly in the space between hydrated clinker minerals, and the resulting mechanical cohesion defines the development of initial strength and rigidity. Since the free growth of crystals is hampered by a lack of space, the crystals mutually intergrow, forming a dense structure, contributing to the growth of strength. The developed organo-mineral modifying complex provides disperse reinforcement of the cement matrix of concrete.

The obtained dependences of structural concrete stresses make it possible to analyze their effect on the structure of modified concrete: to determine the probability of formation around the filler particles of the plastic flow zone, the material microcrack formation zone, the crack initiation period, the microcrack onset conditions, and the change of elasticity modulus of the material caused by microcracks in its structure. Disperous modification of cement matrix allows to obtain durable concrete of special purpose with design operational properties. The developed binder disperse modification technology, the established features of the structure formation mechanism for the modified cement system, as well as the use of the principle of

doi: 10.15802/stp2018/146434
© D. V. Rudenko, 2018

congruence of a complex of technological influences to the physico-chemical processes of hydration of clinker minerals allowed developing the scientific fundamentals for the special purpose concrete technology. This helps to expand the use of modified concrete in various types of construction.

Conclusions

It is determined that the reason for changing the concrete properties of natural hardening is the change in its hygrometric and thermal state, as well as the harmonic fluctuations of these environmental factors. The hygrometry of concrete depends on the thermal moisture conditions of the environment, the type and composition of concrete, the massiveness of concrete elements. An analysis of these factors and experimental data made it possible to establish the exponential dependence of the change in the hygrometric state of monolithic natural hardening concrete.

According to the hygrometric data of the concrete, a dependence is obtained to determine its temperature-shrinkage deformation. This confirms the physical principles of changed hygrometry and shrinkage of concrete in time. The obtained dependences also take into account the concrete composition (relative content of the filler), as well as allow to determine volumetric deformations of concrete elements of different composition and massiveness.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Большаков, В. И. Контактная прочность механоактивированных мелкозернистых бетонов из доменных гранулированных шлаков / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, С. А. Щербак // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 138–149. doi: 10.15802/stp2014/29975
2. Пшінько, О. М. Вибір матеріалів для ремонту та відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій транспортних споруд з урахуванням критерію сумісності : монографія / О. М. Пшінько, А. В. Краснюк, О. В. Громова. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 195 с.
3. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография / Ф. Н. Рабинович. – Москва : АСВ, 2004. – 560 с.
4. Руденко, Д. В. Бетон на основі дисперсно модифікованої цементної системи / Д. В. Руденко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 4 (64). – С. 169–175. doi: 10.15802/stp2016/78008
5. Руденко, Д. В. Дослідження напруженого стану модифікованого монолітного бетону / Д. В. Руденко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 6 (66). – С. 166–174. doi: 10.15802/stp2016/90515
6. Руденко, Д. В. Фізико-хімічна модифікація цементної системи монолітного бетону / Д. В. Руденко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 174–182. doi: 10.15802/stp2015/57103
7. Шишкін, О. О. Наномодифікований реакційно-порошковий бетон / О. О. Шишкін // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне, 2015. – Вип. 31. – С. 106–111.
8. Шумаков, И. В. Оптимизационные тенденции в прогнозировании продолжительности строительства / И. В. Шумаков, Р. И. Микаутадзе, И. И. Ляхов // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. – Харків, 2018. – Т. 91, № 1. – С. 115–121. doi: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-115-121
9. Шумаков, І. В. Перспективність техногенних територій для міського цивільного будівництва / І. В. Шумаков, О. А. Гринчук, Ю. В. Фурсов // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. – Харків, 2016. – № 3 (85). – С. 73–77.
10. Aitcin, P. C. The Art and Science of Durable High-Performance Concrete / P. C. Aitcin // Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers : proc. of a symposium honouring Dr. N. Spiratos (Bucharest, Romania, June 2003). – Bucharest, 2003. – P. 69–88.
11. Collepardi, M. The New Concrete / M. Collepardi, N. B. Singh. – Milan : Grafishe Tintoretto, 2006. – 421 p.
12. Holland, T. C. High-Performance Concrete: As High as It Gets / T. C. Holland // The Concrete Producer. – 1998. – Vol. 16, No. 7. – P. 501–505.
13. Lee, M. G. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material / Ming-Gin Lee, Yung-Chih Wang, Chui-Te Chiu // Construction and Building Materials. – 2007. – Vol. 21. – Iss. l. – P. 182–189. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.024
14. Lee, C. Y. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems / C. Y. Lee, H. K. Lee, K. M. Lee // Cement and Concrete Research. – 2003. – Vol. 33. – Iss. 3. – P. 425–431. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00973-0

doi: 10.15802/stp2018/146434 © D. V. Rudenko, 2018

15. Middendorf, B. Nanoscience and Nanotechnology in Cementations Materials / B. Middendorf // Cement International. – 2006. – No. 4. – P. 80–86.
16. Rudenko, D. Properties of the phase components of the modified cement system / D. Rudenko // Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2013. – Vol. 13, No. 4. – P. 218–224.
17. Rudenko, N. The Development of Conception of New Generation Concretes / N. Rudenko // Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2010. – Vol. XB. – P. 128–133.
18. Sanytsky, M. Chemical processes causing dissolution of calcium cement minerals / M. Sanytsky // Будівельні матеріали і вироби. – 2016. – № 4. – С. 34–37.
19. Sanytsky, M. Department of building production: educational activity and scientific research / M. Sanytsky // Internationalizing higher education and research in civil engineering and architecture : Proceedings of the Exploratory Visit Grant of «Internationalising Higher Education» program supported by British Council Ukraine. – Rivne, 2016. – P. 70–73.
20. Shishkin, A. Effect of the iron-containing filler on the strengthof concrete / A. Shishkin, N. Netesa, V. Scherba // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 5. – Iss. 6 (89). – 2017. – P. 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109977

Д. В. РУДЕНКО[1*]

[1*]Каф. «Управління проектами, будівлі та будівельні матеріали», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (098) 214 04 85, ел. пошта veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНОГО БЕТОНУ ДЛЯ СПОРУД СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Мета. У роботі потрібно розробити наукові основи технології монолітного бетону нового покоління для споруд спеціального призначення за рахунок керування процесами структуроутворення модифікованої цементної системи в природних умовах тверднення. **Методика**. Кінетику взаємодії цементної системи й заповнювачів оцінювали за методами мікрокалориметрії. Вимірювання проводили безперервно протягом 24 годин після приготування суміші. Реєстрували диференційну та інтегральну характеристики тепловиділення твердіючої системи. Дослідження реологічних властивостей бетонних сумішей здійснювали на сумішах рухливістю 10...15 см. Мікротвердість контактних шарів досліджували на бетонних кубиках розмірами від 20×20×20 до 50×50×50 мм. Під час визначення структурних характеристик застосовували рентгенофазовий і диференційно-термічний аналізи цементної матриці бетону. Інфрачервона спектроскопія проведена з метою визначення впливу фізико-хімічного модифікування на цементну систему. Повзучість при розтягу досліджувалася в широкому діапазоні навантаження від 0,2 до 0,8 R_p. **Результати.** Встановлено, що причиною зміни властивостей бетону природного тверднення є зміна його гігрометричного й термічного стану, а також гармонічні коливання цих факторів навколишнього середовища. Гігрометрія бетону залежить від термовологісних умов середовища, виду й складу бетону, масивності бетонних елементів. Аналіз цих факторів та експериментальні дані дозволили встановити експонентну залежність зміни гігрометричного стану монолітного бетону природного тверднення. Зміна вологісного стану бетону дозволяє прогнозувати його об'ємні деформації. **Наукова новизна.** Уперше встановлені особливості структуроутворення модифікованої цементної системи. Вони полягають у тому, що кристали гідрату хлороксиду магнію швидко ростуть у просторі між гідратними новоутвореннями клінкерних мінералів. Механічне зчеплення, що виникає в результаті цього, обумовлює розвиток початкової міцності й жорсткості. Оскільки вільному росту кристалів перешкоджає брак простору, кристали взаємно проростають, утворюючи щільну структуру, яка обумовлює зростання міцності. Розроблений органо-мінеральний модифікуючий комплекс забезпечує дисперсне армування цементної матриці бетону. **Практична значимість.** Отримані залежності структурних напружень дозволяють аналізувати їх вплив на структуру модифікованого бетону, а саме: встановити ймовірність утворення навколо частинок заповнювача зони пластичної течії, зони мікротріщиноутворення матеріалу, період початку тріщиноутворення, умови виникнення мікротріщин, зміну модуля пружності матеріалу від виникнення в його структурі мікротріщин. Дисперсне модифікування цементної матриці дозволяє одержати довговічні бетони спеціального призначення з проектними експлуатаційними властивостями. Запропонована технологія дисперсного модифікування в'яжучої речови-

doi: 10.15802/stp2018/146434 © D. V. Rudenko, 2018

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2018, № 5 (77)

ни, встановлені особливості механізму структуроутворення модифікованої цементної системи, а також використання принципу конгруентності комплексу технологічних впливів фізико-хімічним процесам гідратації клінкерних мінералів дозволили розробити наукові основи технології бетонів спеціального призначення. Це сприяє розширенню напрямків використання модифікованих бетонів у різних видах будівельного виробництва.

Ключові слова: модифікований бетон; дисперсне модифікування; структуроутворення; цементна система; структурні характеристики; довговічність

Д. В. РУДЕНКО[1*]

[1*]Каф. «Управление проектами, здания и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49000,
тел. +38 (098) 214 04 85, эл. почта veberc@ukr.net, ORCID 0000-0003-0827-042X

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Цель. В работе нужно разработать научные основы технологии монолитного бетона нового поколения для сооружений специального назначения за счет управления процессами структурообразования модифицированной цементной системы в естественных условиях твердения. **Методика**. Кинетика взаимодействия цементной системы и заполнителей оценивалась методами микрокалориметрии. Измерения проводились непрерывно в течение 24 часов после приготовления смеси. Регистрировались дифференциальная и интегральная характеристики тепловыделения твердеющей системы. Исследование реологических свойств бетонных смесей осуществлялось на смесях подвижностью 10...15 см. Микротвердость контактных слоев исследовалась на бетонных кубиках размерами от 20×20×20 до 50×50×50 мм. При определении структурных характеристик применялись рентгенофазовый и дифференциально-термический анализы цементной матрицы бетона. Инфракрасная спектроскопия применялась с целью определения влияния физико-химического модифицирования на цементную систему. Ползучесть при растяжении исследовалась в широком диапазоне нагрузки от 0,2 до 0,8 R_p. **Результаты**. Установлено, что причиной изменения свойств бетона естественного твердения является изменение его гигрометрического и термического состояния, а также гармонические колебания этих факторов окружающей среды. Гигрометрия бетона зависит от термовлажностных условий среды, вида и состава бетона, массивности бетонных элементов. Анализ этих факторов и экспериментальные данные позволили установить экспоненциальную зависимость изменения гигрометрического состояния монолитного бетона естественного твердения. Изменение влажностного состояния бетона позволяет прогнозировать его объемные деформации. **Научная новизна.** Впервые установлены особенности структурообразования модифицированной цементной системы. Они заключаются в том, что кристаллы гидрата хлороксида магния быстро растут в пространстве между гидратными новообразованиями клинкерных минералов. Механическое сцепление, возникающее в результате этого, обусловливает развитие начальной прочности и жесткости. Так как свободному росту кристаллов препятствует недостаток пространства, кристаллы взаимно прорастают, образуя плотную структуру, способствуя росту прочности. Разработанный органо-минеральный модифицирующий комплекс обеспечивает дисперсное армирование цементной матрицы бетона. **Практическое значение**. Полученные зависимости структурных напряжений позволяют анализировать их влияние на структуру модифицированного бетона, а именно: установить вероятность образования вокруг частиц заполнителя зоны пластического течения, зоны микротрещинообразования материала, период начала трещинообразования, условия возникновения микротрещин, изменение модуля упругости материала от возникновения в его структуре микротрещин. Дисперсное модифицирование цементной матрицы позволяет получить долговечные бетоны специального назначения с проектными эксплуатационными свойствами. Предложенная технология дисперсного модифицирования вяжущего вещества, установленные особенности механизма структурообразования модифицированной цементной системы, а также использование принципа конгруэнтности комплекса технологических воздействий физико-химическим процессам гидратации клинкерных минералов позволили разработать научные основы технологии бетонов специального назначения. Это способствует расширению направлений использования модифицированных бетонов в различных видах строительного производства.

Ключевые слова: модифицированный бетон; дисперсное модифицирование; структурообразование; цементная система; структурные характеристики; долговечность

doi: 10.15802/stp2018/146434

© D. V. Rudenko, 2018

REFERENCES

1. Bolshakov, V. I., Yelisieieva, M. O., & Shcherbak, S. A. (2014). Contact strength of mechanoactivated fine concretes from granulated blast-furnace slags. *Science and Transport Progress, 5(53),* 138-149. doi: 10.15802/stp2014/29975 (in Russian)
2. Pshinko, O. M., Krasniuk, A. V., Hromova, O. V. (2015). *Vybir materialiv dlia remontu ta vidnovlennia betonnykh ta zalizobetonnykh konstruktsii transportnykh sporud z urakhuvanniam kryteriiu sumisnosti: Monohrafiia.* Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukranian)
3. Rabinovich, F. N. (2004). *Kompozity na osnove dispersnoarmirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktsii: monografiya*. Moscow: ASV. (in Russian)
4. Rudenko, D. V. (2016). Concrete based on modified disperse cement system. *Science and Transport Progress, 4(64),* 169-175. doi: 10.15802/stp2016/78008 (in Ukrainian)
5. Rudenko, D. V. (2016). Research of the stress state of a modified in-situ concrete. *Science and Transport Progress, 6(66),* 166-174. doi: 10.15802/stp2016/90515 (in Ukrainian)
6. Rudenko, D. V. (2015). Physico-chemical modification of monolithic concrete cement system. *Science and Transport Progress, 6(60),* 174-182. doi: 10.15802/stp2015/57103 (in Ukrainian)
7. Shyshkin, O. O. (2015). Nanomodyfikovanyi reaktsiino-poroshkovyi beton. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, 31,* 106-111. (in Ukrainian)
8. Shumakov, I. V., Mikautadze, R. I., & Lyakhov, I. I. (2018). Optimization Trends in Forecasting the Duration of Construction. *Scientific Bulletin of Civil Engineering, 91(1),* 115-121. doi: 10.29295/2311-7257-2018-91-1-115-121 (in Russian)
9. Shumakov, I. V. (2016). Perspektyvnistj tekhnoghennykh terytorij dlja misjkogho cyviljnogho budivnyctva. *Naukovyj visnyk budivnyctva, 3(85),* 73-77. (in Ukrainian)
10. Aitcin, P. C. (2003). The Art and Science of Durable High-Performance Concrete. *Nelu Spiratos Symposium on Superplasticizers: Proceedings of a Symposium Honouring Dr. N. Spiratos (Bucharest, Romania, June 2003)* (pp. 69-88). Bucharest. (in English)
11. Collepardi, M. & Singh, N. B. (2006). The New Concrete. Milan: Grafishe Tintoretto. (in English)
12. Holland, T. C. (1998). High-Performance Concrete: As High as It Gets. *The Concrete Producer, 16(7),* 501-505. (in English)
13. Lee, M.-G., Wang, Y.-C., & Chiu, C.-T. (2007). A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. *Construction and Building Materials, 21(1),* 182-189. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.024 (in English)
14. Lee, C. Y., Lee, H. K., & Lee, K. M. (2003). Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash–cement systems. *Cement and Concrete Research, 33(3),* 425-431. doi: 10.1016/s0008-8846(02)00973-0 (in English)
15. Middendorf, B. (2006). Nanoscience and Nanotechnology in Cementations Materials. *Cement International, 4,* 80-86. (in English)
16. Rudenko, D. (2013). Properties of the phase components of the modified cement system. *Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, 13(4).* 218-224. (in English)
17. Rudenko, N. (2010). The Development of Conception of New Generation Concretes. *Teka. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. XB,* 128-133. (in English)
18. Sanytsky, M. (2016). Chemical processes causing dissolution of calcium cement minerals. *Будівельні матеріали і вироби, 4,* 34-37. (in English)
19. Sanytsky, M. (2016). Department of building production: educational activity and scientific research. *Internationalizing higher education and research in civil engineering and architecture. Proceedings of the Exploratory Visit Grant of «Internationalizing Higher Education» program supported by British Council Ukraine*. (pp. 70-73). Rivne. (in English)
20. Shishkin, A., Netesa, M., & Scherba, V. (2017). Effect of the iron-containing filler on the strength of concrete. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/6(89),* 11-16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109977 (in English)

Received: June 21, 2018
Accepted: Oct. 08, 2018

doi: 10.15802/stp2018/146434 © D. V. Rudenko, 2018

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

В. В. СКАЛОЗУБ, І. В. КЛИМЕНКО
МЕТОД ПЛАНУВАННЯ НЕДЕТЕРМІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ 7

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

М. М. БІЛЯЄВ, О. В. БЄРЛОВ, І. В. КАЛАШНІКОВ, В. А. КОЗАЧИНА
РОЗРАХУНОК ЗОНИ «УРАЗЛИВОСТІ» ОБ'ЄКТА ЗА МОЖЛИВОГО ТЕРАКТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ХІМІЧНОГО АГЕНТА 19

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Б. Є. БОДНАР, О. Б. ОЧКАСОВ, Є. Б. БОДНАР, Т. С. ГРИШЕЧКИНА, М. В. ОЧЕРЕТНЮК
МОДЕЛЮВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РЕМОНТУ ЛОКОМОТИВІВ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ 28

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Т. В. БУТЬКО, В. М. ПРОХОРОВ, Д. М. ЧЕХУНОВ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СОРТУВАЛЬНИМИ СТАНЦІЯМИ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ НА ОСНОВІ БАГАТОЦІЛЬОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ 41

В. Я. НЕГРЕЙ, К. М. ШКУРІН
СИНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ ОДНОГРУПОВИХ ПОЇЗДІВ 53

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

С. С. ЗДАНЕВИЧ, Р. П. ПОГРЕБНЯК, С. В. ЗДАНЕВИЧ
СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ І РАЦІОНАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ МЕХАНІЗМІВ КОСОВАЛКОВИХ ТРУБОПРАВИЛЬНИХ МАШИН 65

О. М. КОРНЕЛЮК
СПОСОБИ ЗАВДАННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ І ГЕОМЕТРІЇ ГРЕБНОГО ГВИНТА У FLOW VISION 74

П. С. НОСОВ, І. В. ПАЛАМАРЧУК, М. С. САФОНОВ, В. І. НОВИКОВ
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЯВІВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА У КОМАНДИ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ 82

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

О. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, С. І. ЛЕВИЦЬКА
СТІЙКІСТЬ РУХУ ЗАЛІЗНИЧНИХ ЕКІПАЖІВ, ЩО ОПИСУЮТЬ РІВНЯННЯ ЛАГРАНЖА І РОДУ 93

В. А. ТАТАРІНОВА, Я. КАЛІВОДА, Л. О. НЕДУЖА
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛОКОМОТИВА 104

А. О. ШВЕЦЬ
ВПЛИВ ПОЗДОВЖНЬОГО ТА ПОПЕРЕЧНОГО ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ ВАГИ ВАНТАЖУ В ПІВВАГОНАХ НА ЇХ ДИНАМІЧНІ ПОКАЗНИКИ 115

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Д. В. РУДЕНКО
ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНОГО БЕТОНУ ДЛЯ СПОРУД СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ 129

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

В. В. СКАЛОЗУБ, И. В. КЛИМЕНКО
МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАРКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 7

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. В. БЕРЛОВ, И. В. КАЛАШНИКОВ, В. А. КОЗАЧИНА
РАСЧЕТ ЗОНЫ «УЯЗВИМОСТИ» ОБЪЕКТА ПРИ ВОЗМОЖНОМ ТЕРАКТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО АГЕНТА 19

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

Б. Е. БОДНАРЬ, А. Б. ОЧКАСОВ, Е. Б. БОДНАРЬ, Т. С. ГРИШЕЧКИНА, М. В. ОЧЕРЕТНЮК
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ РЕМОНТА ЛОКОМОТИВОВ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ 28

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТА И ЭКОНОМИКИ

Т. В. БУТЬКО, В. Н. ПРОХОРОВ, Д. Н. ЧЕХУНОВ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОРТИРОВОЧНЫМИ СТАНЦИЯМИ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ 41

В. Я. НЕГРЕЙ, К. М. ШКУРИН
СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГРУППНЫХ ПОЕЗДОВ 53

НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

С. С. ЗДАНЕВИЧ, Р. П. ПОГРЕБНЯК, С. В. ЗДАНЕВИЧ
СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОСОВАЛКОВЫХ ТРУБОПРАВИЛЬНЫХ МАШИН ... 65

О. Н. КОРНЕЛЮК
СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ И ГЕОМЕТРИИ ГРЕБНОГО ВИНТА В FLOW VISION 74

П. С. НОСОВ, И. В. ПАЛАМАРЧУК, М. С. САФОНОВ, В. И. НОВИКОВ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА У КОМАНДЫ МОРСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА 82

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, С. И. ЛЕВИЦКАЯ
УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ, ОПИСЫВАЕМОГО УРАВНЕНИЯМИ ЛАГРАНЖА I РОДА 93

В. А. ТАТАРІНОВА, Я. КАЛИВОДА, Л. А. НЕДУЖАЯ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЛОКОМОТИВА 104

А. А. ШВЕЦ
ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО И ПОПЕРЕЧНОГО СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ГРУЗА В ПОЛУВАГОНАХ НА ИХ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ 115

ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Д. В. РУДЕНКО
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ ДЛЯ СООРУЖЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 129

CONTENTS

TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

V. V. SKALOZUB, I. V. KLYMENKO
METHOD FOR PLANNING NON-DETERMINED OPERATION PROCESSES OF RAILWAY TECHNICAL SYSTEM PAR 7

TRANSPORT ECOLOGY

M. M. BILIAIEV, O. V. BERLOV, I. V. KALASHNIKOV, V. A. KOZACHYNA
CALCULATION OF «VULNERABILITY» ZONE IN CASE OF TERRORIST ATTACK WITH CHEMICAL AGENTS 19

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

B. E. BODNAR, O. B. OCHKASOV, E. B. BODNAR, T. S. HRYSHECHKINA, M. V. OCHERETNYUK
SIMULATION OF LOCOMOTIVE REPAIR ORGANIZATION BY THE METHODS OF QUEUE SYSTEMS THEORY 28

TRANSPORT AND ECONOMIC TASKS MODELING

T. V. BUTKO, V. M. PROKHOROV, D. M. CHEKHUNOV
INTELLIGENT CONTROL OF MARSHALLING YARDS AT TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS BASED ON MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION 41

V. Y. NEGREY, K. M. SHKURYN
SYNERGETIC APPROACH TO THE CALCULATION OF ONE-GROUP TRAIN FORMATION PLAN 53

NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODEL. MACHINES AND MECHANISMS

S. S. ZDANEVICH, R. P. POGREBNYAK, S. V. ZDANEVICH
STRUCTURAL ANALYSIS AND RATIONAL DESIGN OF MECHANISMS OF CROSS-ROLL TUBE STRAIGHTENING MACHINES 65

O. N. KORNELYUK
METHODS OF PRESETING BOUNDARY CONDITIONS AND GEOMETRY OF THE SCREW-PROPELLER IN THE FLOW VISION 74

P. S. NOSOV, I. V. PALAMARCHUK, M. S. SAFONOV, V. I. NOVIKOV
MODELING THE MANIFESTATIONS OF THE HUMAN FACTOR OF THE MARITIME CREW 82

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

A. G. REIDEMEISTER, S. I. LEVYTSKA
STABILITY OF MOTION OF RAILWAY VEHICLES DESCRIBED WITH LAGRANGE EQUATIONS OF THE FIRST KIND 93

V. A. TATARINOVA, Y. KALIVODA, L. O. NEDUZHA
RESEARCH OF LOCOMOTIVE MECHANICS BEHAVIOR 104

A. O. SHVETS
INFLUENCE OF THE LONGITUDINAL AND TRANSVERSE DISPLACEMENT OF THE CARGO GRAVITY CENTER IN GONDOLA CARS ON THEIR DYNAMIC INDICATORS 115

TRANSPORT CONSTRUCTION

D. V. RUDENKO
PROPERTIES OF MODIFIED CONCRETE FOR SPECIAL PURPOSE STRUCTURES 129

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. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;

4) Оригінал експертного висновку.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету**;
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть пропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість**. Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання**;**
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,
49010
e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: **http://stp.diit.edu.ua/**

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наукове видання

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА
№5 (77) 2018
(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова
Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова
Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60 × 84 1/8. Ум. друк. арк. 16,74. Тираж 100 пр. Зам. №02/05

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Адреса редакції, видавця:
вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна
Тел.: +38 (056) 371-51-05
E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua
Друк:
Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.

♦ ♦ ♦ ♦ ♦

Научное издание

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА
№ 5 (77) 2018
(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова
Компьютерная верстка – О. В. Поминова
Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60 × 84 1/8. Ус. печат. лист. 16,74. Тираж 100 экз. Зак. №02/05

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна
Адрес редакции, издателя:
ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днипро, 49010, Украина
Тел.: +38 (056) 371-51-05
E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua
Печать:
Издательство «Герда», 49000, г. Днепр, пр. Д. Яворницкого, 60
Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.

♦ ♦ ♦ ♦ ♦

Scientific Edition

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS
No. 5 (77) 2018
(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova
Desktop publishing – O. V. Pominova
Redaction – S. P. Lahdan

Format 60 × 84 1/8. Conventional printed sheet 16,74. Circulation 100. Order no. 02/05

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan
Address of editor and editorial office
Lazaryan St.,2, r.267, Dnipro, 49010, Ukraine
Tel.: +38 (056) 371-51-05
E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua
Printing
Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online) | Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2018. 5 (77). 1-144