



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№6(78)

.. 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

№ 6 (78) 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 і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2018

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пшінько О. М., доктор технічних наук
Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., ДНУЗТ (Україна); Бобровський В. І., ДНУЗТ (Україна); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Бондар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Головкова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., ДНУЗТ (Україна); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Пітман Р., Група економічного аналізу Антимонопольного відділу (США); Ракша С. В., ДНУЗТ (Україна); Сладковські А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., ДНУЗТ (Україна); Шинкаренко В. І., ДНУЗТ (Україна).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідectво 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 26.12.2018 р., протокол № 6

Видавець Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпро)
Свідectво 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»

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

№ 6 (78) 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 и тяга поездов
Транспортное строительство

Днепро

2018

Учредитель:
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ 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:

Аврамовис З. З., Белградский университет (Сербия); Бела И., Институт логистики (Венгрия); Беляев Н. Н., ДНУЖТ (Украина); Бобровский В. И., ДНУЖТ (Украина); Богдывичус М., Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса (Литва); Бондар Б. Е., ДНУЖТ (Украина); Бондаренко И. А., ДНУЖТ (Украина); Вакуленко И. А., ДНУЖТ (Украина); Головкова Л. С., ДНУЖТ (Украина); Ефременко В. Г., Приазовский государственный технический университет (Украина); Жуковицкий И. В., ДНУЖТ (Украина); Каливода Я., Чешский технический университет в Праге (Чехия); Капица М. И., ДНУЖТ (Украина); Капустян В. Е., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Украина); Кершис Р., Каунасский технологический университет (Литва); Кузнецов В. Г., ДНУЖТ (Украина); Марущак П. А., Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя (Украина); Питтман Р., Группа экономического анализа Антимонопольного отдела, (США); Ракша С. В., ДНУЖТ (Украина); Сладковски А., Силезский технологический университет, (Польша); Суглер Дж., Варшавская школа экономики (Польша); Тюткин А. Л., ДНУЖТ (Украина); Шинкаренко В. И., ДНУЖТ (Украина)

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 26.12.2018 г., протокол № 6

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»

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. 6 (78) 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:

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., DNURT (Ukraine); Bobrovskiy, V. I., DNURT (Ukraine); Bodnar B. E., DNURT (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Bondarenko I. O., DNURT (Ukraine); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., DNURT (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., DNURT (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., DNURT (Ukraine); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Pittman R., Economic Analysis Group (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Śladowski A., Politechnika Śląska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (Ukraine)

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in 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 26.12.2018, Protocol no. 6
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»

КОЛОНКА РЕДАКТОРА

Шановні читачі, автори, колеги!

Ми розпочинаємо цей номер вшануванням пам'яті Всеволода Арутюновича Лазаряна (1909–1978), видатного вченого-механіка, спеціаліста в галузі динаміки рухомого складу залізниць, заслуженого діяча науки і техніки УРСР, доктора технічних наук, академіка АН СРСР, лауреата Державної премії УРСР в галузі науки і техніки, генерал-директора дороги та будівництва III рангу, ректора Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту (ДІІТ, 1941–1958), автора понад 300 наукових праць та винаходів.

З ім'ям академіка В. А. Лазаряна пов'язано створення й розвиток наукової школи транспортної механіки на базі ДІІТу, що дала путівку в життя сотням учених: кандидатів і докторів технічних наук.

Досить згадати лише декілька знакових для наукового світу напрямків, які реалізовувалися завдяки зусиллям академіка Лазаряна В. А.: організація руху довгосоставних поїздів підвищеної маси на основних напрямках залізниць, організація унікальних (на той момент) теоретичних й експериментальних досліджень високошвидкісного (до 250 км/ч) транспорту, а також формування проектних рішень для швидкісних залізничних ліній «Центр-Південь», забезпечення розрахункової та експериментальної частини на реалізацію залізничної складової, так званого, БЖРК (бойового залізничного ракетного комплексу), який передбачав не тільки транспортування міжконтинентальних балістичних ракет із ядерними зарядами, а й забезпечував пуск таких ракет в польових умовах безпосередньо із залізничної колії. Найбільш значущі наукові роботи все-таки пов'язані з проблемами механіки залізничного транспорту: поздовжня динаміка поїзда, динаміка вагонів, взаємодія рухомого складу залізниць та шляху.

Покажемо і те, що на базі ДІІТу академіком Лазаряном В. А. був створений в 50-ті роки минулого століття перший в Дніпропетровському регіоні Обчислювальний центр, програмно-апаратне забезпечення якого дозволило вирішувати масштабні наукові завдання для залізничного транспорту.

За час роботи В. А. Лазаряном підготовано 20 докторів та більше 100 кандидатів технічних та фізико-математичних наук. Саме вони та вже їх учні, неформальний творчий колектив дослідників різних поколінь, продовжили й продовжують справу свого лідера – розвиток наукової школи транспортної механіки.

У цьому номері журналу «Наука та прогрес транспорту» ми публікуємо спогади професора Казакевича Михайла Ісааковича, видатного вченого в області аеродинаміки мостів та інженерних конструкцій, які підкреслюють масштабність особистості В. А. Лазаряна та його славетних учнів – професорів М. Г. Бондаря та Є. П. Блохіна.

У цьому номері журналу «Наука та прогрес транспорту» ми публікуємо спогади професора Казакевича Михайла Ісааковича, видатного вченого в області аеродинаміки мостів та інженерних конструкцій, які підкреслюють масштабність особистості В. А. Лазаряна та його славетних учнів – професорів М. Г. Бондаря та Є. П. Блохіна.

Мямлін С. В., д.т.н., професор

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

УДК 001:[378.4:656.2]

М. И. КАЗАКЕВИЧ

Каф. «Мосты и туннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 61, эл. почта mkozakevich19@gmail.com, ORCID 0000-0003-3396-1775

ВОСПОМИНАНИЯ О НАУЧНОЙ ШКОЛЕ АКАДЕМИКА В. А. ЛАЗАРЯНА

Только сейчас, в эпоху высокоскоростного железнодорожного транспорта, приходит осознание величия пионерных исследований 50-летней давности академика В. А. Лазаряна, его учеников-соратников, их востребованности, актуальности в эволюционном развитии железных дорог в мире. Работа представляет собой воспоминания автора о выдающихся представителях научной школы транспортной механики (в т. ч. в направлении динамики и устойчивости движения железнодорожных составов) – академике В. А. Лазаряне, академике Н. Г. Бондаре, профессоре Е. П. Блохине. Именно они и уже их ученики, неформальный творческий коллектив исследователей разных поколений, продолжили и продолжают дело своего лидера – академика В. А. Лазаряна.

Ключевые слова: научная школа транспортной механики; академик В. А. Лазарян; академик Н. Г. Бондарь; профессор Е. П. Блохин; ДИИТ

Человеческая память всегда бережно хранит самые яркие явления и события*. Именно таким воспоминаниям посвящены мои заметки о Всеволоде Арутюновиче Лазаряне. Будучи очень успешным учеником академика А. Н. Динника, он создал и развивал на протяжении всей своей долгой научной деятельности знаменитую научную школу транспортной механики (в т. ч. направление динамики и устойчивости движения железнодорожных составов) [1, 4, 6, 7, 12, 14–17, 22, 24].

О масштабах личности В. А. Лазаряна и значимости его заслуг для механики моя первая история.

История 1. В 1975 году мне предстояло доложить свою докторскую диссертацию по аэродинамике мостов знаменитому в научной среде СССР механику, известному своими энциклопедическими знаниями, – академику Яко-

ву Гилелевичу Пановко, работающему в тот период заведующим кафедрой теоретической механики Ленинградского кораблестроительного института.

Приехав к нему, я застал его в рабочем кабинете за беседой с неизвестным мне посетителем весьма преклонного возраста. В тот же момент раздался телефонный звонок, и Я. Г. Пановко, извинившись перед нами, вышел встретить академиков К. В. Фролова и В. В. Болотина. Им предстояло по поручению Президиума Академии наук СССР решить судьбу премии АН СССР имени академика Б. Г. Галёркина.

В кабинете Якова Гилелевича мы, его гости, безмолвно сидели не менее 10 минут, как вдруг мой vis-a-vis обратился ко мне с вопросом, откуда я приехал. Я вкратце рассказал ему о цели моего приезда и совершенно неожиданно услышал

*Стилистика автора сохранена

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

его безапелляционные рассуждения об отсутствии в Днепропетровске серьезных имен в области механики. После некоторой паузы он продолжил свои рассуждения, перечисляя некоторые имена, и еще более эмоционально подтвердил свое мнение об отсутствии, как он сказал, «настоящих» механиков в нашем городе, который он неоднократно посещал по приглашению генерального конструктора КБ «Южное» академика М. К. Янгеля. Что я ему мог возразить, только вступая в научный мир? В то же время я смутно догадывался, что такие оценки мог позволить себе незаурядный ученый. Последовавшая пауза была «разорвана» мощными восклицаниями: «Какой же я глупец! Как же, как же, – у вас есть выдающийся ученый-механик, с мировым именем, даже больше – ему нет равных в мире по продольной динамике подвижных систем. Это Лазарьян!» (фамилия была произнесена именно с таким твердым звучанием слога – «рьян»). Эти слова были для меня неописуемым откровением: в нашем ДИИТе (Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта) работает выдающаяся личность, а я слушал его лекции по сопротивлению материалов и даже не догадывался о масштабах его известности.

Ответ на этот естественный вопрос я узнал в тот момент, когда в кабинет вернулся Я. Г. Пановко, пригласил своего гостя присоединиться к коллегам из Москвы и спросил: «Чем Вы, Анатолий Исаакович, так возбуждены?»

По произнесенному имени я понял, что моим собеседником был легендарный и авторитетный ученый – механик А. И. Лурье, автор (совместно с Л. Г. Лойцянским) классического, непревзойдённого университетского курса по теоретической механике.

В ответ на вопрос Я. Г. Пановко тот повторил свои личные оценки заслуг В. А. Лазаряна. Яков Гилелевич не менее эмоционально согласился. А я, в свою очередь, вспомнил его восторженные слова, сказанные, когда он уезжал из Днепропетровска в 1967 году, где оппонировал на защите моей кандидатской диссертации по теории нелинейных колебаний: «Всеволод Арутюнович Лазарян – это настоящая глыба». Именно академику В. Лазаряну принадлежат масштабные фундаментальные исследования,

не только теоретические (как аналитические, так и модельные – компьютерные и аналоговые), но и натурные испытания динамики и устойчивости движения экспериментального состава в начале 70-х годов, проводившиеся впервые если не в мировой практике, то в СССР при высоких скоростях до 250 км/ч.

И это был не предел скорости, поскольку состояние железнодорожного полотна, особенно на искусственных сооружениях, на протяженном испытательном участке Приднепровской железной дороги не позволяло дальше ее увеличивать.

Это надо знать, это надо помнить, этим надо гордиться.

Только сейчас, в эпоху высокоскоростного и даже сверхскоростного железнодорожного транспорта, приходит осознание величия пионерных исследований 45-летней давности академика Всеволода Арутюновича Лазаряна, его учеников-соратников, востребованности, актуальности этих исследований в эволюционном развитии железных дорог мира.

История 2. Следующая история посвящена одному из самых успешных из всей многочисленной плеяды учеников академика В. А. Лазаряна – моему учителю как в науке, так и в жизни, академику Николаю Герасимовичу Бондарю, основателю известной в нашей стране научной школы динамики мостов [5, 8, 18, 23].

Искрометный ум, бескомпромиссность и безупречность Н. Г. Бондаря как ученого, так и руководителя способствовали его высокой репутации в научной сфере. Глубина исследований, будь то теория колебаний, математическая физика или динамика мостов, проникновение в физические процессы взаимодействия пролетных строений мостов с подвижной нагрузкой, позволили Н. Г. Бондарю совместно со своими учениками создать новое научное направление в современном мостостроении. Оно оказалось особенно востребованным в наш век высоких скоростей на железнодорожном транспорте.

Достигнутые в науке результаты были столь убедительными, что послужили серьезным аргументом избрания Н. Г. Бондаря сразу действительным членом Академии наук Украины, минуя этап очень почетной, но все же промежуточной, а в подавляющем большинстве слу-

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

чаев и конечной ступени – члена-корреспондента. Это редчайший случай в практике НАНУ.

Впервые я увидел Николая Герасимовича, когда поступил в 1961 году на факультет «Мосты и тоннели» Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (ДИИТ). Он был тогда нашим деканом. Профессор Н. Г. Бондарь произвел на меня неизгладимое впечатление. Перед новобранцами института предстал статный, красивый, элегантный ...

Я подражал ему во всем, он был моим кумиром. И это состояние моей души в общении с Николаем Герасимовичем на протяжении всей жизни не покидало меня.

Вспоминая многочисленные эпизоды наших встреч, я приведу отдельные истории, раскрывающие его темперамент, интуицию, удивительную способность разбираться в людях.

В период моей учебы в институте Николай Герасимович с большим азартом включился в исследования некоторых очень актуальных разделов математической физики, а именно в теорию нелинейных колебаний и общую теорию устойчивости. Он создал новый метод математического анализа и получил неожиданные результаты исследований. Для дальнейшего развития этого метода он стал привлекать студентов, на которых обратил внимание. Так я попал в круг его учеников. Поэтому не удивительно, что он задал мне вместо дипломного проекта, традиционного для выпускников нашего факультета, тему научного исследования в качестве дипломной работы.

Спустя пару лет Николай Герасимович предложил поступить к нему в аспирантуру, решив для этого ряд важных препятствий. Я настолько увлекся научными изысканиями, что на одном дыхании за два года справился с поставленными передо мною задачами.

Таким образом образовался ресурс времени в один год, и Николай Герасимович предложил мне решить проблему переходных режимов колебаний нелинейных систем его новым методом. Суть заключалась в том, что масштабную проблему уже решил академик Юрий Алексеевич Митропольский, директор Института математики Академии наук Украины, но другим методом, известным в мировой научной лите-

ратуре как метод малого параметра с дробными степенями, разработанными им совместно с академиком Николаем Николаевичем Боголюбовым, гениальным математиком и физиком с мировым именем.

Погрузившись в эту проблему, я понял, что, во-первых, она мне «не по зубам», метод я не постиг; во-вторых, академик Ю. А. Митропольский за ее решение получил очень престижную по тем временам Ленинскую (Государственную) премию.

Все это я изложил, как мог, моему учителю. Предположил, что, возможно, его метод не позволит справиться с поставленной мне задачей. К тому же я позволил усомниться, зачем это делать, если проблема уже решена, признана мировым научным сообществом, замечена и отмечена властью.

Сейчас понимаю, что, по-видимому, обидел его. Я впервые увидел моего учителя в гневе. Николай Герасимович сказал, что я ему отныне не ученик и не должен нигде писать о нем как своем руководителе. Но препятствовать мне в защите диссертации он не будет.

И мы разошлись, не примирившись и не найдя взаимопонимания. Я уехал на Кавказ, где в течение двух месяцев покорял горные вершины, а Николай Герасимович, как позднее выяснилось с его слов, решил мне доказать ...

В сентябре он вызвал меня к себе и сказал, что «убил» два месяца, но согласился с моими оценками и восстановил мой status-quo, «наградив» меня новой задачей. Но это уже другая история, касающаяся меня.

Сколько же надо мужества, чтобы признать свою ошибку перед учеником. Это настоящий эталон порядочного человека и чистоты научного помысла.

Подобная история приключилась позднее при обсуждении на семинаре Николая Герасимовича кандидатской диссертации моего друга Э. Н. Кваши, ученика профессора Днепропетровского инженерно-строительного института (ДИСИ) А. П. Прусакова. Диссертация содержала решение одной интересной проблемы, которое Н. Г. Бондарь не воспринял и поэтому защиту отменил. Такой поворот событий затрагивал мою научную репутацию, и я обратился к Николаю Герасимовичу, занимавшему пост проректора по науке ДИИТа, и убедил его дать

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

мне возможность выхода на электронные цифровые вычислительные машины (ЭЦВМ) ДИИТа и решить эталонную задачу Дуффинга. Эмма Тененбаум предложил мне в помощь студента третьего курса факультета «Вычислительной техники» С. Ф. Редько (впоследствии – научного сотрудника Института технической механики НАН Украины). Когда мы втроем принесли результаты компьютерных расчетов, Николай Герасимович сразу все понял, снял все свои возражения, и Э. Н. Кваша успешно защитил свою диссертацию. Более того, наш результат был несколько новый и оригинальный, что я осмелился обратить на него внимание академика Ю. А. Митропольского. Наша совместная статья, как сообщил мне Юрий Алексеевич, для сохранения приоритета украинской науки, была опубликована в его журнале «Математическая физика». Николай Герасимович первым поздравил нас с публикацией в таком престижном научном журнале.

Многие годы мы регулярно встречались, обменивались информацией научного, околонаучного, политического и бытового содержания. Я показывал мои научные результаты в области теории нелинейных колебаний и аэродинамики сооружений. Многие из них Николай Герасимович рекомендовал для опубликования в «Докладах Академии наук Украины».

Постепенно наши профессиональные отношения становились все более доверительными.

С моей подачи он увлекся горами и на протяжении многих лет отдыхал со своей супругой Верой Ивановной в горах Кавказа, на спортивной базе альпинистов в ущелье Адыл-су.

Ему нравилась атмосфера азарта, дружбы, увлеченности спортом, которая царила тогда в молодежной среде, и весьма скромные условия отдыха его несколько не смущали.

Каждый раз, возвращаясь из Кавказа, он при встрече с нашим коллегой, доцентом Александром Семеновичем Зюзиным, легендарным спортсменом, заслуженным мастером спорта СССР по альпинизму, увлеченно рассказывал, в каких ущельях и на каких ледниках он побывал на сей раз.

Общение с Николаем Герасимовичем всегда доставляло огромное наслаждение. О чем бы ни шла беседа, его речь была всегда содержатель-

на. С ним было интересно и инженеру, и филологу, и чиновнику, и генералу.

Среди его друзей были многие выдающиеся люди; круг его общения был широк. В то же время Николай Герасимович никогда не позволял себе панибратства, а также сближения с людьми сомнительной репутации.

Соблюдая традиции ДИИТовского городка, он очень любил принимать гостей, был при этом всегда внимателен, остроумен и доброжелателен.

С огромным удовольствием я вспоминаю мои, с женой и детьми, визиты к Николаю Герасимовичу и Вере Ивановне, а также их визиты к нам. Наши застолья в кругу друзей были непринужденными, а Николай Герасимович был в центре внимания и блистал эрудицией и умом, юмором. И сейчас я счастлив, что наши семьи были дружны, что мы всю жизнь поддерживали теплые отношения с детьми, внуками и правнучкой Николая Герасимовича и Веры Ивановны, а они хорошо знали наших детей.

Когда позади уже многие годы и испытания как для каждого из нас, так и для всей страны, такие люди, как Николай Герасимович, навсегда остаются в памяти тех, кому посчастливилось их знать.

История 3. Перегруженная событиями, фактами и впечатлениями моя память сохраняет самые приятные воспоминания еще об одном из ярких и весьма преуспевших учеников академика В. А. Лазаряна – о Евгении Петровиче Блохине [2, 3, 13, 19–21].

До прихода в начале 90-х годов по приглашению ректора ДИИТа той поры профессора В. А. Каблукова в институт, в мою alma mater, наши отношения были на уровне «шапошного» знакомства. Но они сразу стали более чем производственными – очень взаимоуважительными.

Вначале я Е. П. Блохина как первого проректора легко убедил в том, что профессор высшей школы, который является активно действующим ученым, регулярно публикуется в отечественных журналах и за рубежом, участвует в работе различных научных конференций и форумов, ученых советов и ассоциаций, в подготовке молодых научных кадров и т. п., не должен иметь официальную педагогическую нагрузку свыше 600–650 часов в год.

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

Когда я приступил к описанию штрихов к портрету Е. П. Блохина, очень ярко и эффектно в моей памяти всплыли его эмоциональность, когда-то весьма актерская, его живой ум, образованность и умение услышать собеседника, его аргументы в профессиональном споре, не совпадающие с другой точкой зрения.

Однажды в начале нового учебного года я обнаружил, что два разных потока из разных факультетов учебная часть, вроде бы объективно, объединила в общий поток. Но при этом была предложена в расписании бесконечно длинная и плоская, как гладильная доска, аудитория. Не сомневаюсь, что учебная часть руководствовалась в таком объединении потоков серьезными мотивами. Но у меня были совершенно обоснованные возражения, которые я апеллировал первому проректору института.

Евгений Петрович мои возражения не принял, поэтому мне пришлось пригласить его ознакомиться с проблемами на месте предстоявших мне лекций. Мы вошли в пустовавшую после занятий аудиторию, и я попросил Евгения Петровича сесть за заднюю парту, а сам отправился к доске и при двух сценариях поведения лектора – спиной и лицом к пустой аудитории – начал общаться с ним в размеренном для лекций темпе.

Он сразу все понял, встал и сказал, что такой вариант не может удовлетворить ни студентов, ни лектора, ни, как следствие, и ректорат. Все в результате вернулось в прежнее состояние с двумя потоками.

Еще одна, более впечатляющая, история.

У руководства института в силу некоторых объективных обстоятельств возникла идея сократить количество курсовых проектов у мостовиков. Для обсуждения этой проблемы меня пригласил Е. П. Блохин и, не вдаваясь в подробности и детали, спросил, какими из этих проектов можно «пожертвовать».

Мне удалось его убедить хотя бы на несколько дней отложить это обсуждение, чтобы я подготовился.

На следующий день я принес ему «Отчет Тимошенко» – отчет о поездке прославленного ученого, нашего бывшего соотечественника С. П. Тимошенко, по заданию правительства США посетившего СССР в 60-е годы с целью изучения опыта подготовки научных и инже-

нерных кадров. В тот период уровень высшего образования в СССР считался одним из лучших в мире.

«Отчет С. П. Тимошенко» в переводе на русский язык академиком Э. И. Григорьевым по рукам моих коллег, и только в 90-е годы был издан в МИИТе профессором кафедры строительной механики Н. Н. Шапошниковым, хорошо известным Е. П. Блохину лично.

На удивление, как тот «рояль в кустах», в этот момент брошюра С. П. Тимошенко была в моем распоряжении, и я дал ее Евгению Петровичу для ознакомления. На следующий день он посетовал, что так был увлечен моим «сюрпризом», что пожертвовал сном и на одном дыхании с большим интересом и вниманием прочел этот «сюрприз».

Дело в том, что С. П. Тимошенко, занимая высокие посты в крупнейших университетах и знаменитых компаниях США, поддерживал дружеские отношения со многими ведущими учеными СССР и не случайно был избран для такой миссии правительством США. Он был хорошо информирован о достижениях наших ученых-механиков, о чем писал позже в своих воспоминаниях. Поэтому свое пребывание в СССР он построил таким образом, чтобы ознакомиться с конкретными программами подготовки специалистов в Киевском политехническом институте, Московском государственном университете (МГУ) и в Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта (ЛИИЖТ).

В первом из них он изучал программу инженеров-механиков, во втором – механиков-теоретиков.

ЛИИЖТ он выбрал не случайно, поскольку, по его мнению, самый высокий уровень подготовки инженеров строительного профиля в СССР был у мостовиков. Этот выбор, по-видимому, подсознательно нес воспоминания его научных связей до выезда из СССР.

Каждая из программ подготовки специалистов в СССР сопровождалась серьезным анализом. В частности, возвращаясь к теме о курсовых проектах мостовиков, С. П. Тимошенко сделал главный акцент в программе подготовки инженеров-мостовиков в СССР на широкий спектр курсовых проектов при непереносимом разнообразии расчетных схем, материалов

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

и технологий расчетов. Венцом подготовки специалистов он считал выполнение, в обязательном порядке, комплексного дипломного проекта, включая расчет опор и фундаментов, все этапы проектирования и строительства.

Такова была 100-летняя традиция подготовки мостовиков. В подтверждение мыслей С. П. Тимошенко и в пользу моей позиции по недопущению сокращения количества курсовых проектов, на которых формируется полноценный инженер, я привел Евгению Петровичу историю начального становления инженера и ученого Евгения Оскаровича Патона.

После завершения обучения в одном из университетов Германии Е. О. Патон решил обосноваться в России и предложил свои услуги в качестве инженера-мостовика Министерству путей сообщений. Однако оказалось, что его диплома, судя по вкладышу предметов и оценок, было недостаточно, и ему предложили пройти годичный курс обучения для самостоятельного выполнения десяти курсовых и дипломного проектов.

Е. О. Патон поступил в Санкт-Петербургский институт инженеров путей сообщений, в течение одного года выполнил предложенную ему программу, успешно защитил дипломный проект и получил место в Ми-

нистерстве путей сообщений России. Через некоторое время, в 1905 году он переехал в Киев и свою дальнейшую судьбу связал с Киевским политехникумом (ныне Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»). Любопытно, что судьбы двух замечательных людей пересеклись в Киеве, и в своих воспоминаниях С. П. Тимошенко с большой теплотой и сердечностью описывает участие в его судьбе Е. О. Патона.

Здесь полезно напомнить, что когда Евгению Оскаровичу предложили переехать в Днепропетровск и создать кафедру и факультет мостов в ДИИТе, он деликатно отказался, но в знак признательности и в качестве подарка передал ДИИТу свою «учебную» мостовую ферму для проведения практических занятий по испытаниям конструкций. До сих пор мостовая ферма – это памятник выдающемуся ученому и инженеру-мостовику Е. О. Патону.

Наша история в этом сюжете закончилась словами Евгения Петровича Блохина: «Пока я первый проректор ДИИТа, ни один курсовой проект у мостовиков не будет отменен». Свое слово он сдержал! Что будет дальше – проживём, увидим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Академик Лазарян Всеволод Арутюнович / редкол. С. В. Мямлин, Е. П. Блохин, И. В. Клименко, В. В. Карпенко ; Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2009. – 45 с. – (Серия «Профессора ДИИТа»).
2. Блохин Евгений Петрович // Кто есть кто в высшей школе : в 5 т. – Москва, 1992. – Т. 2. – С. 98.
3. Блохин, Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) : монография / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – Москва : Транспорт, 1982. – 222 с.
4. Блохин, Е. П. Ученый, педагог, организатор науки и образования (К 100-летию со дня рождения Академика Всеволода Арутюновича Лазаряна) / Е. П. Блохин // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 30. – С. 9–11.
5. Бондарь, Н. Г. Некоторые автономные задачи нелинейной механики / Н. Г. Бондарь. – Київ : Наукова думка, 1969. – 302 с.
6. Всеволод Арутюнович Лазарян : [библ. указатель] / сост. И. Г. Барбас, О. М. Ратникова, С. И. Филиппюк ; вступ. статья С. И. Конашенко, Л. М. Резникова, Н. М. Хачапуридзе ; Акад. Наук УССР. – Киев : Наукова думка, 1980. – 71 с.
7. Гузь, О. М. Лазарян Всеволод Арутюнович / О. М. Гузь, В. Ф. Ушкалов // Вісник АН УРСР. – 1978. – № 6. – С. 88–89.
8. Динамика железнодорожных мостов / под ред. Н. Г. Бондаря. – Москва : Транспорт, 1965. – 412 с.
9. Конашенко, С. Ученый, педагог, организатор науки: (К 70-летию со дня рождения В. А. Лазаряна) / С. Конашенко, П. Бодяпов // За кадры трансп. – 1979. – 11 окт.
10. Коротенко, М. Л. Блохін Євген Петрович / М. Л. Коротенко // Енциклопедія Сучасної України : у 25 т. – Київ, 2004. – Т. 3. – С. 83.

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

11. Лазарян Всеволод Арутюнович // История Академии наук Украинской ССР. – Киев, 1979. – С. 707.
12. Лазарян, В. А. Динамика вагонов / В. А. Лазарян. – Москва : Транспорт, 1964. – 256 с.
13. Лазарян, В. А. Применение математических машин непрерывного действия к решению задач динамики подвижного состава железных дорог / В. А. Лазарян. – Москва, Трансжелдориздат, 1963. – 217 с.
14. Лазарян, В. А. Техническая теория изгиба / В. А. Лазарян. – Київ : Наукова думка, 1976. – 204 с.
15. Николай Герасимович Бондарь: (К шестидесятилетию со дня рождения) // Вопросы динамики мостов и теории колебаний : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 1982. – С. 3–14.
16. Профессор Блохин Евгений Петрович : [библ. указатель] / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск : Изд-во ДНУЖТ, 2013. – 102 с. – (Серия «Профессора ДИИТа»).
17. Расчет грузовых вагонов на прочность при ударах : учеб. пособие для вузов / Е. П. Блохин, И. Г. Барбас, Л. А. Манашкин, О. М. Савчук ; под ред. Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1989. – 230 с.
18. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов : монография / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин, Е. Л. Стамблер [и др.] ; под ред. Е. П. Блохина. – Москва : Транспорт, 1986. – 263 с.
19. Савин, Г. Н. Всеволод Арутюнович Лазарян: (К шестидесятилетию со дня рождения) / Г. Н. Савин, А. Д. Коваленко, А. П. Филиппов // Прикладная механика. – 1969. – № 10. – С. 137–138.
20. Складановская, М. Г. Призвание – наука (90-летию со дня рождения Николая Герасимовича Бондаря посвящается) / М. Г. Складановская, А. С. Распопов, В. Л. Рыкина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 33. – С. 7–9.
21. Myamlin, S. V. Development of Scientific School of Transport Mechanics: Artistic Legacy of YE. P. Blokhin / S. V. Myamlin, T. A. Kolesnykova // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 1 (49). – С. 7–18. doi: 10.15802/stp2014/22657

М. І. КАЗАКЕВИЧ

Каф. «Мости та тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 61, ел. пошта mkozakevich19@gmail.com, ORCID 0000-0003-3396-1775

СПОГАДИ ПРО НАУКОВУ ШКОЛУ АКАДЕМІКА В. А. ЛАЗАРЯНА

Тільки зараз, в епоху високошвидкісного залізничного транспорту, приходить усвідомлення величчї піонерних досліджень 50-річної давнини академіка В. А. Лазаряна, його учнів-соратників, їх затребуваності, актуальності в еволюційному розвитку залізниць у світі. Робота являє собою спогади автора про видатних представників наукової школи транспортної механіки (в т. ч. в напрямку динаміки та стійкості руху потягів) – академіка В. А. Лазаряна, академіка М. Г. Бондаря, професора Є. П. Блохіна. Саме вони і вже їх учні, неформальний творчий колектив дослідників різних поколінь, продовжили та продовжують справу свого лідера – академіка В. А. Лазаряна.

Ключові слова: наукова школа транспортної механіки; академік В. А. Лазарян; академік М. Г. Бондар; професор Є. П. Блохін; ДПТ

М. І. KAZAKEVICH

Dep. «Bridges and Tunnels», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 61, e-mail mkozakevich19@gmail.com, ORCID 0000-0003-3396-1775

MEMORIES OF SCIENTIFIC SCHOOL OF ACADEMICIAN V. A. LAZARYAN

Only now, in the era of high-speed railway transport, there is a realization concerning the greatness of pioneering research 50 years ago of Academician V. A. Lazaryan, his fellow students, their demand and relevance in the evolutionary development of railways in the world. The work is the author's memoirs about the outstanding repre-

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2018/155008

© М. І. Казакевич, 2018

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

sentatives of the scientific school of transport mechanics (including in the direction of the dynamics and stability of the trains movement) – Academician V. A. Lazaryan, Academician M. H. Bondar, Professor Y. P. Blokhin. They and their students, an informal creative team of researchers of different generations, continued and continue the work of their leader – Academician V. A. Lazaryan.

Keywords: scientific school of transport mechanics; Academician V.A. Lazaryan; Academician N.G. Bondar; Professor E.P. Blokhin; DNURT

REFERENCES

1. Myamlin, S. V., Blokhin, Ye. P., Klimenko, I. V., & Karpenko, V. V. (Eds). (2009). *Akademik Lazaryan Vsevolod Arutyunovich*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Russian)
2. Blokhin Yevgeniy Petrovich. (1992). In *Kto est kto v vysshey shkole*. (Vol. 2). Moscow. (in Russian)
3. Blokhin, Ye. P., & Manashkin, L. A. (1982). *Dinamika poezda (nestatsionarnye prodolnye kolebaniya)*. Moscow: Transport. (in Russian)
4. Blokhin, Ye. P. (2009). Uchenyy, pedagog, organizator nauki i obrazovaniya (K 100-letiyu so dnya rozhdeniya Akademika Vsevoloda Arutyunovicha Lazaryana). *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 30, 9-11. (in Russian)
5. Bondar, N. G. (1969). *Nekotorye avtonomnye zadachi nelineynoy mekhaniki*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
6. Barbas, I. G., Ratnikova, O. M., & Filippuk, S. I. (Eds). (1980). *Vsevolod Arutyunovich Lazaryan: [bibliograficheskii ukazatel]*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
7. Huz, O. M., & Ushkalov, V. F. (1978). Lazarian Vsevolod Arutiunovich. *Visnyk AN URSR*, 6, 88-89. (in Ukrainian)
8. Bondar, N. G. (Ed). (1965). *Dinamika zheleznodorozhnykh mostov*. Moscow: Transport. (in Russian)
9. Konashenko, S., & Bodyapov, P. (1979, October 11). Uchenyy, pedagog, organizator nauki: (K 70-letiyu so dnya rozhdeniya V. A. Lazaryana). *Za kadry transporta*. (in Russian)
10. Korotenko, M. L. (2004). Blokhin Yevhen Petrovych. In *Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy*. (Vol. 3). Kyiv. (in Ukrainian)
11. Lazaryan Vsevolod Arutyunovich. (1979). In *Istoriya Akademii nauk Ukrainskoy SSR*. Kiev. (in Russian)
12. Lazaryan, V. A. (1964). *Dinamika vagonov*. Moscow: Transport. (in Russian)
13. Lazaryan, V. A. (1963). *Primenenie matematicheskikh mashin nepreryvnogo deystviya k resheniyu zadach dinamiki podvizhnogo sostava zheleznykh dorog*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
14. Lazaryan, V. A. (1976). *Tekhnicheskaya teoriya izgiba*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
15. Nikolay Gerasimovich Bondar: (K shestidesyatiletiyu so dnya rozhdeniya). (1982). In *Voprosy dinamiki mostov i teorii kolebaniy*, 3-14. (in Russian)
16. *Professor Blokhin Yevgeniy Petrovich: [bibliograficheskii ukazatel]*. (2013). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Russian)
17. Blokhin, Ye. P., Barbas, I. G., Manashkin, L. A., & Savchuk, O. M. (1989). *Raschet gruzovykh vagonov na prochnost pri udarakh: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Transport. (in Russian)
18. Blokhin, Ye. P., Manashkin, L. A., & Stambler, Ye. L. (1986). *Raschety i ispytaniya tyazhelovesnykh poezdov: monografiya*. Moscow: Transport. (in Russian)
19. Savin, G. N., Kovalenko, A. D., & Filippov, A. P. (1969). Vsevolod Arutyunovich Lazaryan: (K shestidesyatiletiyu so dnya rozhdeniya). *Prikladnaya mekhanika*, 10, 137-138. (in Russian)
20. Skladanovskaya, M. G., Raspopov, A. S., & Rykina, V. L. (2010). Prizvanie – nauka (90-letiyu so dnya rozhdeniya Nikolaya Gerasimovicha Bondarya posvyashchaetsya). *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 33, 7-9. (in Russian)
21. Myamlin, S. V., & Kolesnykova, T. A. (2014). Development of scientific school of transport mechanics: artistic legacy of YE. P. Blokhin. *Science and Transport Progress*. 1(49), 7-18. doi: 10.15802/stp2014/22657 (in English)

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.222.4

В. И. БОБРОВСКИЙ^{1*}, Р. Г. КОРОБЬЕВА^{2*}, В. О. БАЛАНОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (068) 444 63 95, эл. почта 1973bvi@gmail.com, ORCID 0000-0001-8622-2920

^{2*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта rgkobyova@outlook.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

^{3*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта vobalanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6137-3420

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Цель. Основной целью статьи является совершенствование имитационной модели железнодорожного направления для оценки использования пропускной способности отдельными поездами. **Методика.** В работе рассмотрены вопросы оценки пропускной способности железных дорог Украины, Европейского Союза, США. Отмечено, что реформирование рынка железнодорожных перевозок вызовет рост требований к качеству оценки пропускной способности, используемой поездами различных перевозчиков. В качестве основного метода для оценки пропускной способности в работе использованы методы тяговых расчетов, организации движения на железнодорожном транспорте и имитационного моделирования. **Результаты.** Разработана имитационная модель железнодорожного направления, которая отражает как структуру, так и взаимодействие отдельных её элементов. Модель включает: поездную модель, модель железнодорожной инфраструктуры, модель управления движением, информационную модель. Моделирование функционирования железнодорожного направления осуществляют поэтапно. На первом этапе выполняют моделирование движения одиночных поездов. На втором этапе выполняют согласование занятия железнодорожной инфраструктуры станций и перегонов поездами. Отправление поездов на перегон осуществляют при возможности обеспечения допустимых интервалов между данным, а также предшествующими и последующими поездами, разработанная модель реализована в виде программы «График движения». **Научная новизна** работы состоит в том, что в ней предложена усовершенствованная имитационная модель железнодорожного направления, которая отражает процесс пропуска поездов по участкам и через железнодорожные станции и позволяет оценивать влияние степени использования пропускной способности на продолжительность движения поездов. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты позволяют оценить влияние поездов, следующих по расписанию, на условия пропуска поездов, следующих без расписания движения.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; график движения; пропускная способность; имитационное моделирование

Введение

Железнодорожный транспорт является основным перевозчиком грузов и одним из основных перевозчиков пассажиров в Украине.

Инфраструктура железных дорог Украины была создана во времена СССР для обеспечения потребностей его экономики. В то же время были разработаны и методы оценки ее пропускной способности, которые не претерпели

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

существенных изменений до настоящего времени. Однако происходящие сейчас изменения связанные с имплементацией Директив Европейского Союза, которые регламентируют организацию рынка железнодорожных перевозок, требуют совершенствования методов оценки пропускной способности железных дорог.

Цель

Основной целью статьи является совершенствование имитационной модели железнодорожного направления для оценки использования пропускной способности отдельными поездами.

Методика

В работе рассмотрены вопросы оценки пропускной способности железных дорог, используемых на железных дорогах Украины, Европейского Союза, США. Отмечено, что реформирование рынка железнодорожных перевозок вызовет рост требований к качеству оценки пропускной способности, используемой поездами различных перевозчиков. В качестве основного метода для оценки пропускной способности в работе использованы методы тяговых расчетов, организации движения на железнодорожном транспорте и имитационного моделирования.

Результаты

Оценку пропускной способности железных дорог Украины выполняют в соответствии с инструкцией [5]. В данном документе действительной пропускной способностью железнодорожного участка на перегонах называется максимальное количество грузовых поездов (пар поездов) установленной массы и длины, которое может быть пропущено через этот участок за единицу времени в соответствии с его технической оснащенностью и принятым способом организации движения. Величина пропускной способности определяется с помощью аналитического выражения:

$$n_{гр} = n_{нал}^{пар} - \varepsilon_{пс}^{ск} n_{пс}^{ск} - \varepsilon_{пс} n_{пс} - \varepsilon_{пр} n_{пр} - (\varepsilon_{уск} - 1) n_{уск} - (\varepsilon_{сб} - 1) n_{сб}, \quad (1)$$

где $n_{нал}^{пар}$ – наличная пропускная способность при параллельном графике движения поездов; $n_{пс}^{ск}, n_{пс}, n_{пр}, n_{уск}, n_{сб}$ – количество поездов, соответственно, скорых пассажирских, пассажирских, пригородных, укоренных грузовых и сборных; $\varepsilon_{пс}^{ск}, \varepsilon_{пс}, \varepsilon_{пр}, \varepsilon_{уск}, \varepsilon_{сб}$ – коэффициенты съема грузовых поездов, соответственно, скорыми пассажирскими, пассажирскими, пригородными, укоренными грузовыми и сборными поездами.

Несмотря на длительный период применения выражения (1) для оценки пропускной способности железных дорог, оно имеет ряд недостатков. Во-первых, величина коэффициентов съема грузовых поездов поездами различных категорий зависит от соотношения скоростей движения этих поездов, параметров железнодорожных линий и взаимной прокладки поездов на графике. Необходимо отметить, что существует большое количество научных работ, содержащих на оценку величины коэффициентов съема для различных категорий поездов [1, 7, 11], а также их сочетаний. Однако рост количества вариантов расчета коэффициентов съема приводит к тому, что трудозатраты, связанные с аналитическим расчетом пропускной способности железнодорожных участков, приближаются к трудозатратам на ее графическое определение на основании построения максимальных графиков движения. Во-вторых, даже в пределах одной категории параметры поездов существенно отличаются. Так, поезда отличаются массой, числом вагонов, техническим состоянием локомотивов, уровнем подготовки локомотивной бригады и др. [9, 10]. Указанные факторы приводят к тому, что скорости движения разных поездов в потоке отличаются, что также вызывает уменьшение пропускной способности.

Необходимо отметить, что в Украине Укрзализныця является одновременно и оператором инфраструктуры, и единственным перевозчиком. Стоимость ее услуг регламентирует государство. В этих условиях расчет пропускной способности выполняют в основном на этапе построения графика движения поездов с целью оценки достаточности имеющихся технических средств для освоения плановых

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

объемов перевозок. В случае недостатка пропускной способности железнодорожной инфраструктуры в процессе выполнения перевозок диспетчерский аппарат использует различные организационные мероприятия для ее увеличения, что, как правило, достигается за счет ухудшения показателей использования подвижного состава, но не вызывает экономических расчетов между участниками перевозочного процесса.

В настоящее время одним из основных направлений реформирования отрасли железнодорожных перевозок является разделение деятельности по эксплуатации инфраструктуры и выполнению перевозок. В этом случае выделение пропускной способности является услугой, которую предоставляет оператор инфраструктуры перевозчикам, что повышает требования к оценке пропускной способности, используемой поездами различных перевозчиков.

После реформирования функционирование железных дорог Украины будет происходить в условиях, близких к работе железных дорог Европейского Союза и США, где инфраструктуру используют разные перевозчики.

В Европейском Союзе реализована модель вертикального разделения рынка железнодорожных перевозок. В этой модели пропускную способность операторы предоставляют перевозчикам её как услугу железнодорожной инфраструктуры. Другой особенностью работы железных дорог Европейского Союза, характерной для большинства государств – его членов, является преобладание пассажирских перевозок и организация движения по расписанию как грузовых, так и пассажирских поездов.

Основными методами оценки пропускной способности железных дорог при этом являются используемый в Великобритании метод CUI [15, 19], а также разработанный МСЖД и принятый 19 государствами метод UIC 406 [15, 16]. Оба метода основываются на сжатии расписаний, при котором выполняется перенос действующих ниток графика в пределах рассматриваемого временного интервала U таким образом, чтобы межпоездные интервалы были сокращены до минимально допустимых значений. Степень заполнения пропускной способности оценивают соотношением времени занятия ин-

фраструктуры при сжатом графике и продолжительности интервала U .

При повышении степени заполнения пропускной способности усиливается влияние задержек поездов одних перевозчиков на пунктуальность графика движения поездов других перевозчиков, а также влияние на величину задержек поездов сбоев, вызванных отказами элементов инфраструктуры и мероприятиями, связанными с ее содержанием. В этой связи в странах, где движение всех поездов выполняется по расписанию, значительное количество исследований посвящено построению графиков движения, устойчивых к помехам [13, 14], а также изменению расписания движения поездов в случае сбоев [18].

Сравнение подходов к оценке пропускной способности на железных дорогах Украины и государств ЕС выполнено в [12]. Однако необходимо отметить дополнительную черту, отличающую условия работы железных дорог Украины от железных дорог государств ЕС, которая состоит в том, что на железных дорогах ЕС организовано движение поездов по расписанию от станций формирования до станций расформирования. В то же время на отечественных железных дорогах пропуск поездов по расписанию преимущественно рассматривают только в пределах отдельных участков с целью оптимизации использования локомотивов. Выход на рынок независимых перевозчиков приведет к необходимости организации пропуска их поездов на всем маршруте следования по расписанию [8]. В этой связи возникает задача оценки пропускной способности железнодорожных направлений, учитывающей взаимосвязь процессов, происходящих на участках и технических станциях.

Условия функционирования железных дорог США имеют существенные отличия от условий работы железных дорог Европейского Союза. Характерной особенностью железных дорог США является преобладание грузовых перевозок над пассажирскими. При этом железнодорожная инфраструктура, как правило, принадлежит частным, вертикально интегрированным железнодорожным компаниям, которые содержат сеть и оказывают услуги по перевозке грузов. Учитывая, что основной грузопоток желез-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

ных дорог формируют массовые грузы, то накопление поездов происходит до достижения ими максимальной массы или длины, а их движение осуществляется без соблюдения жесткого расписания. При этом конфликтные ситуации разрешает оперативно диспетчерский персонал. Перевозки пассажиров в США выполняет компания AMTRAK, обеспечивающая дальнейшее сообщение, а также ряд компаний, выполняющих местные и пригородные пассажирские перевозки. Особенностью пассажирских перевозок в США является то, что, как правило, их выполняют на инфраструктуре грузовых железных дорог. В этих условиях актуальной является задача исследования влияния неоднородности транспортного потока на расходы железных дорог, связанные с его пропуском по инфраструктуре. В качестве критерия для оценки уровня заполнения пропускной способности элемента транспортной инфраструктуры используют разницу времени проследования поезда при движении в потоке по сравнению с чистым временем проследования поездом данного элемента. Для оценки пропускной способности в США разработан ряд эмпирических, аналитических и имитационных моделей [17]. Учитывая сложность транспортного процесса, наличие значительного числа взаимосвязей между отдельными поездами в потоке, основным методом, применяемым для оценки пропускной способности железных дорог в США, является метод имитационного моделирования. Одним из наиболее часто используемых программных продуктов при этом является Rail Traffic Controller (RTC). Программный комплекс RTC включает следующие основные модули:

- модуль формирования случайного расписания движения поездов;
- модуль моделирования движения поездов;
- модуль разрешения конфликтных ситуаций.

Выбор очередности пропуска поездов при этом осуществляют в соответствии с заданной системой приоритетов.

Учитывая то, что грузовые железнодорожные перевозки в Украине связаны в основном с доставкой массовых грузов, значительную долю грузовых поездов как в настоящее время,

так и после реформирования отрасли будут отправлять без соблюдения жесткого расписания. Поэтому характер использования пропускной способности железнодорожной инфраструктуры в Украине будет иметь больше общих черт с работой железных дорог США, чем железных дорог стран Европейского Союза. В этих условиях в качестве основного метода оценки пропускной способности железных дорог целесообразно использовать имитационное моделирование.

Проблемы моделирования движения поездов исследуют в большом количестве научных работ как в Украине, так и в других постсоветских государствах, имеющих сходные с Украиной принципы организации движения поездов.

По железнодорожным путям поезда следуют не независимо, а в потоке. При этом скорость движения отдельного поезда является случайной величиной, зависящей как от его параметров, так и от параметров движения смежных поездов. В [10] установлено существование оптимальной загрузки перегона поездами, превышение которой приводит к падению величины пропускной способности.

В работе [2] рассмотрена задача построения имитационной модели развязки железнодорожных линий на подходе к станции. Функциональная модель развязки имеет иерархическую структуру и разделена на три уровня. На метаровне модель развязки рассматривают как СМО, предназначенную для обслуживания (пропуска) потоков поездов на примыкающих линиях. На макроуровне в качестве элементов в модель развязки включены две взаимосвязанные функциональные модели: модель движения потока поездов и модель системы регулирования движения поездов и их пропуска через пункты пересечения (система автоблокировки на перегонах и электрической централизации в пунктах пересечения/слияния). На микроуровне осуществляется имитационное моделирование движения отдельных поездов, которое реализовано на основе решения дифференциальных уравнений движения [2]. Система управления светофорами формализована с использованием конечных автоматов. В [3] отмечено, что железнодорожная развязка является управляемой СМО. Поэтому для оценки пока-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

зателей работы развязки предложено использовать два режима – автоматический со специализированным управляющим алгоритмом и интерактивный, где приоритет пропуска поездов через развязку устанавливает лицо, выполняющее моделирование.

В [6] представлена имитационная модель работы железнодорожного направления, которое рассматривают как многофазную, многоканальную систему массового обслуживания, в которой обрабатывают заявки двух типов – пассажирские и грузовые поезда. При этом пассажирские поезда имеют приоритет над грузовыми. Разработанная модель позволяет оценивать время пропуска поездов по участку в зависимости от структуры поездопотока.

Таким образом, основным методом исследования процессов движения потоков поездов на железнодорожных направлениях и оценки пропускной способности железнодорожной инфраструктуры является имитационное моделирование. Разработанные модели позволяют адекватно моделировать существующие процессы движения потоков поездов и определять величину действительной и необходимой пропускной способности. Однако уже в настоящее время процессы реструктуризации Укрзализныци привели к созданию Украинской железнодорожной скоростной компании, которая является перевозчиком пассажиров; также создан центр транспортного сервиса «Лиски», одной из целей которого является организация перевозок грузов в составе контейнерных поездов, движущихся по расписанию. Дальнейшее реформирование рынка железнодорожных перевозок приведет к созданию независимых перевозчиков грузов и пассажиров. В этих условиях возникает проблема распределения пропускной способности железнодорожной инфраструктуры между перевозчиками, что требует исследования вопросов использования пропускной способности отдельными поездами и оценки влияния отдельных поездов на условия пропуска других поездов.

Железнодорожное направление в модели рассматривают как сложную, динамическую, стохастическую и эргатическую систему массового обслуживания, состоящую из множества различных элементов, которые в процессе ра-

боты влияют друг на друга. Модель функционирования железнодорожного направления (МФН) должна отражать как структуру, так и взаимодействие отдельных ее элементов. В этой связи МФН включает:

- поездную модель, в которой представлены характеристики поездов, следующих по направлению;

- модель железнодорожной инфраструктуры, в которой представлены данные о геометрических параметрах перегонов и станций, описана система управления движением поездов на перегонах и станциях, а также содержатся данные о занятии поездами путей перегонов и станций;

- модель управления движением, которая обеспечивает выбор порядка занятия элементов инфраструктуры отдельными поездами;

- информационную модель, которую использует выполняющее моделирование лицо для контроля текущего состояния железнодорожного направления и подачи управляющих команд.

Отдельный поезд в модели представлен структурой данных

$$t_n = \{n_n, q_n, m_n, f_n, v_n, k_n, r_n, s_{no}, s_{nn}, t_n, \rho_n, T_p, T_c\},$$

где n_n – номер поезда; q_n, m_n – соответственно масса и число вагонов в поезде; f_n – тип локомотива или моторвагонного подвижного состава; v_n – скорость движения поезда; k_n – уровень приоритета пропуска поезда; r_n – режим движения поезда; s_{no}, s_{nn} – соответственно номер станции отправления и назначения поезда; t_n – время появления поезда в модели; ρ_n – коэффициент реализации мощности локомотива; T_p – расписание движения поезда; T_c – матрица значений времени движения поезда между станциями направления.

Параметры q_n, m_n и ρ_n моделируют как случайные величины с заданными законами распределения.

Расписание движения поезда задают в виде вектора T_p , каждый элемент которого описывают структурой:

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\mathbf{T}_p = \{s, t_o, t_{np}, \mathbf{f}_c\},$$

где s – станция, на которой предусматривают остановку поезда; t_o – предусмотренное расписанием время отправления поезда со станции; t_{np} – минимальная продолжительность простоя поезда на станции; \mathbf{f}_c – параметры случайной величины продолжительности технического обслуживания поезда на станции.

Модель железнодорожной инфраструктуры представлена двусвязным списком R_{ii} элементов инфраструктуры r_{ii} . При этом каждый элемент списка представлен структурой

$$r_{ii} = \{\mathbf{D}_{ii}, p_{ii}, n_{ii}\},$$

где \mathbf{D}_{ii} – список параметров инфраструктуры; p_{ii}, n_{ii} – предшествующий и следующий элементы инфраструктуры.

В качестве элементов инфраструктуры рассматриваются перегоны b_i и станции s_j , представляющие собой множества участков путей w . При этом каждый отдельный путь представляется структурой

$$w = \{n_k, d_k, l_k, i_k, r_{bk}, r_{tk}, v_k, d_{n1}, d_{n2}\}.$$

где n_k – номер пути; d_k – номер рельсовой цепи; l_k, i_k – длина и уклон участка пути; r_{bk}, r_{tk} – радиусы вертикальной кривой и кривой в плане; v_k – ограничение скорости движения; d_{n1}, d_{n2} – номера первой и второй рельсовых цепей участка удаления.

Перегоны b_i в модели представляются списками участков путей

$$b_i = \{\mathbf{w}_i\}.$$

Станции s_j – это множества станционных путей \mathbf{b}_i , каждый из которых представлен списком участков путей, а также номера бригад пунктов технического обслуживания $\mathbf{p}_{птоi}$

$$s_j = \{\mathbf{b}_i, \mathbf{p}_{птоi}\}.$$

Для моделирования движения отдельного поезда используют дифференциальное уравнение второго порядка $S'' = f(t, S, S')$, в котором

в качестве независимой переменной выбрано время t :

$$S'' = \frac{d^2 S}{dt^2} = g'(f_k - w_k - b_t) \cdot 10^{-3},$$

где g' – ускорение силы тяжести с учетом инерции вращающихся масс; f_k – удельная касательная сила тяги локомотива; w_k – общее удельное сопротивление движению поезда; b_t – удельная тормозная сила поезда.

Моделирование функционирования железнодорожного направления осуществляют поэтапно.

На первом этапе выполняют моделирование движения одиночных поездов и заполняются матрицы \mathbf{T}_c , каждый элемент которых соответствует продолжительности движения поездов между станциями с учетом затрат времени на разгон и торможение.

На втором этапе выполняют согласование занятия железнодорожной инфраструктуры станций и перегонов поездами. Прокладку поездов на графике осуществляют в порядке увеличения параметров k_{pi} .

Отправление поездов на перегон осуществляют при возможности обеспечения допустимых интервалов между данным, а также предшествующими и последующими поездами.

Каждую станцию в модели рассматривают как двухфазную многоканальную систему массового обслуживания с отказами. Входящий и исходящий потоки при этом образуют поезда, прибывающие на станцию и отправляющиеся с неё. Аппаратами обслуживания в первой фазе являются бригады ПТО, во второй – перегон, на который отправляют поезд.

При необходимости обслуживания поезда на станции бригадой ПТО его продолжительность моделируют как случайную величину в соответствии с параметрами \mathbf{f}_c .

Очередь образуют поезда, простаивающие на станционных путях в ожидании обслуживания бригадой ПТО и отправления на перегон.

В качестве основных типов поездов, обращающихся на сети, выбрали:

– пассажирские и грузовые поезда, которые следуют по жесткому расписанию;

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

– грузовые поезда, которые следуют без расписания движения.

Расписание движения поездов первого типа формирует выполняющее моделирование лицо. Момент поступления в модель i -го поезда второго типа ($i = 1 \dots N, N$ – число поездов второго типа) устанавливают как:

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i,$$

где t_{i-1} – момент поступления в модель предыдущего поезда второго типа ($t_0 = -I_{\min}$); Δt_i – случайный интервал времени между данным и предыдущим поездами; I_{\min} – минимальный интервал поступления поездов в модель.

Величину интервала Δt поступления поездов моделируют как:

$$\Delta t_i^* = \frac{I_{\min} - M[\Delta t_i]}{k} \ln \prod_{j=1}^k R_j + I_{\min},$$

где R_j – случайное число, равномерно распределенное в интервале $[0, 1]$; $M[\Delta t_i]$ – математическое

ожидание интервала между i -м поездом и предыдущим; k – параметр Эрланга.

Математическое ожидание интервала между поездами на каждом шаге определяют как:

$$M[\Delta t_i] = \frac{T_m - t_{i-1}}{N - i + 1},$$

где T_m – период моделирования.

После расчета значения Δt_i^* для i -го поезда величину интервала окончательно корректируют из условия возможности поступления оставшихся $N - i$ поездов:

$$\Delta t_i = \min(\Delta t_i^*, T_m - t_{i-1} - (N - i)I_{\min}).$$

Критерием для оценки степени использования пропускной способности направления может быть средняя продолжительность задержки грузового поезда, следующего без расписания.

Предложенная модель реализована в виде программы «График движения», главное окно которой представлено на рис. 1.

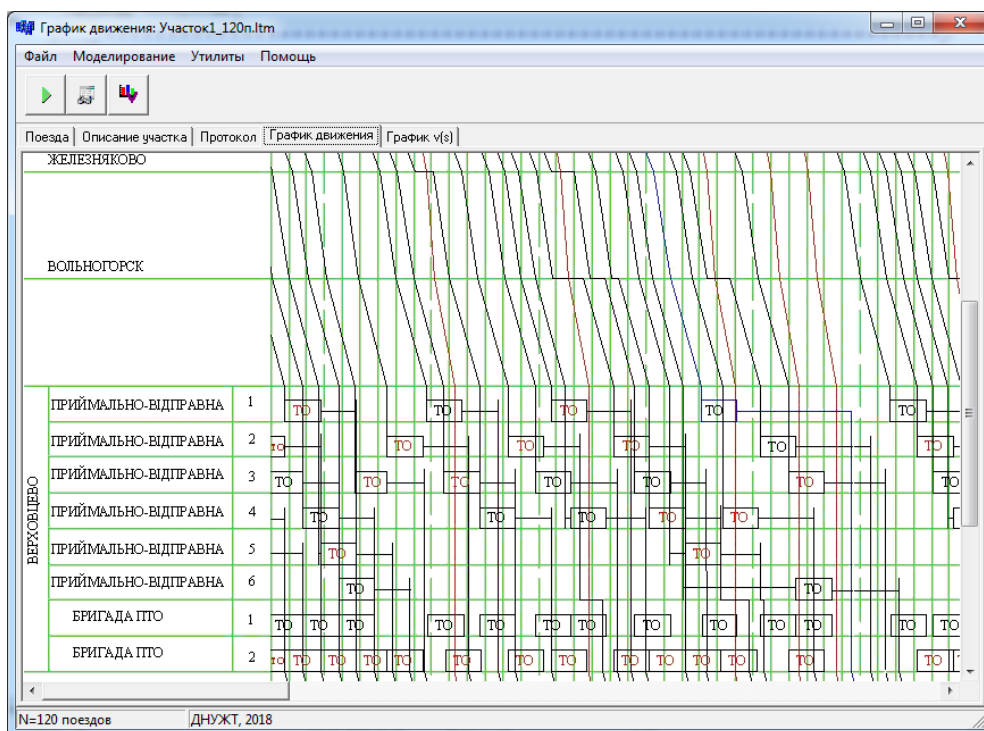


Рис. 1. Главное окно программы «График движения»

Fig. 1. Main window of the «Traffic Schedule» program

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Исходными данными для моделирования служат характеристики железнодорожной линии и потока поездов. Результатами моделирования являются графики скорости движения поездов $v(s)$, расходы топлива (электроэнергии), величина работы механических сил R_m , сил сопротивления R_c и торможения R_t по каждому поезду, график движения поездов, а также продолжительность их движения по направлению. Расчет показателей осуществлен в соответствии с методикой, изложенной в [4].

В качестве примера рассмотрена двухпутная железнодорожная линия длиной 120 км, на которой расположена одна участковая и 12 грузовых и промежуточных станций. На участковой станции работают две бригады ПТО, которые выполняют техническое обслуживание транзитных грузовых поездов. По расписанию выполняют пропуск 15 пассажирских и 4 грузовых поездов. Для оценки влияния степени заполнения пропускной способности участка на условия движения поездов выполнена серия имитационных экспериментов с разработанной моделью. В результате получена зависимость $t_d(N)$, характеризующая дополнительные потери времени при движении поезда в потоке по сравнению с чистым временем движения поезда. Указанная зависимость приведена на рис. 2.

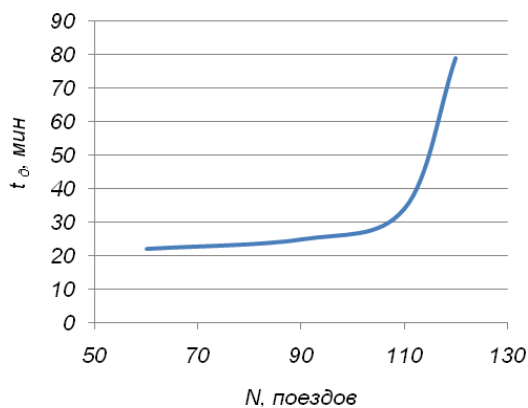


Рис. 2. Зависимость дополнительного времени при движении поезда в потоке по сравнению с чистым временем движения поезда от числа поездов

Fig. 2. The dependence of extra time when a train moves in the flow compared to the net time of train movement on the number of trains

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы состоит в том, что в ней предложена усовершенствованная имитационная модель железнодорожного направления, которая отражает процесс пропуска поездов по участкам и через железнодорожные станции и позволяет оценивать влияние степени использования пропускной способности на продолжительность движения поездов.

Полученные в ней результаты позволяют оценить влияние поездов, следующих по расписанию на условия пропуска поездов, следующих без расписания движения.

Выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Реформирование рынка железнодорожных перевозок в Украине вызывает необходимость распределения пропускной способности железнодорожной инфраструктуры между перевозчиками, что требует исследования вопросов использования пропускной способности отдельными поездами и оценки влияния отдельных поездов на условия пропуска других поездов.

2. Предложенная модель железнодорожного направления позволяет имитировать пропуск потока поездов разных категорий через железнодорожные станции и участки и оценивать продолжительность движения в потоке поездов.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Биленко, Г. М. Аналитическая оценка коэффициентов съема грузовых поездов «поездами-сороходами» при различных схемах прокладки на графике / Г. М. Биленко, Е. А. Попова // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 1. – С. 43–51.
2. Бобровский, В. И. Имитационная модель развязки линий в железнодорожном узле / В. И. Бобровский // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 1999. – Вип. 38 : Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті. – С. 35–42.
3. Бобровский, В. И. Моделирование системы управления пропуском поездов через пересечения / В. И. Бобровский // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 1998. – Вип. 33 : Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті. – С. 71–79.
4. Бобровский, В. И. Оценка расходов на передвижение поездов в проектируемых развязках железнодорожных линий с использованием имитационного моделирования / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – № 2. – С. 48–51.
5. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України : ЦД 0036. – Київ : Транспорт України, 2002. – 376 с.
6. Карасёв, С. В. Оценка задержек поездов на железнодорожной сети методом моделирования в условиях случайного образования заявок на перевозку / С. В. Карасёв, М. Е. Корягин // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщения. – 2018. – № 2 (45). – С. 43–51.
7. Козаченко, Д. М. Дослідження коефіцієнтів зйому в умовах прискореного та швидкісного руху пасажирських поїздів / Д. М. Козаченко, О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова // Вісник Академії митної служби України. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 110–116.
8. Козаченко, Д. М. Моделювання роботи залізничного напрямку / Д. М. Козаченко, Г. Я. Мозолевич, О. В. Власюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 28. – С. 144–148.
9. Левин, Д. Ю. Оптимизация потоков поездов / Д. Ю. Левин. – Москва : Транспорт, 1988. – 175 с.
10. Попова, Е. А. Аналитическая оценка коэффициентов съема грузовых поездов «поездами-тихоходами» при их прокладке с обгонами / Е. А. Попова // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 4. – С. 47–52.
11. Прохорченко, А. В. Проблеми розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах ринкових відносин / А. В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – № 4. – С. 36–41.
12. Резервы времени при организации движения грузовых поездов по расписанию / Д. Н. Козаченко, Н. И. Березовый, В. О. Баланов, В. В. Журавель // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 105–115. doi: 10.15802/stp2015/42170
13. Fischetti, M. Fast Approaches to Improve the Robustness of a Railway Timetable / M. Fischetti, D. Salvagnin, A. Zanette // Transportation Science. – 2009. – Vol. 43. – Iss. 3. – P. 321–335. doi: 10.1287/trsc.1090.0264
14. Gibson, S. Developments in Transport Policy: The Evolution of Capacity Charges on the UK Rail Network / S. Gibson, G. Cooper, B. Ball // Journal of Transport Economics and Policy. – 2002. – Vol. 36. – No. 2. – P. 341–354.
15. Pouryousef, H. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe / H. Pouryousef, P. Lautala, T. White // Journal of Modern Transportation. – 2015. – Vol. 23. – Iss. 1. – P. 30–42. doi: 10.1007/s40534-015-0069-z
16. Robust railway station planning: An interaction between routing, timetabling and platforming / T. Dewilde, P. Sels, D. Catrysse, P. Vansteenwegen // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2013. – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 68–77. doi: 10.1016/j.jrtpm.2013.11.002
17. Rotoli, F. Capacity Assessment of Railway Infrastructure: Tools, Methodologies and Policy Relevance in the EU Context : JRC Technical Report / F. Rotoli, E. N. Cawood, A. Soria ; European Commission. – Seville, 2016. – 62 p.
18. Törnquist, J. N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances / J. Törnquist, J. A. Persson // Transportation Research. Part B: Methodological. – 2007. – Vol. 41. – Iss. 3. – P. 342–362. doi: 10.1016/j.trb.2006.06.001
19. UIC leaflet 406 R. Capacity [Електронний ресурс] / UIC International Union of Railways. – 2e éd. – [s. l.], 2013. – 56 p. – Режим доступа: <http://clc.am/gqq1zw> – Загл. с экрана. – Проверено: 09.01.2019.

В. І. БОБРОВСЬКИЙ^{1*}, Р. Г. КОРОБЬОВА^{2*}, В. О. БАЛАНОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Транспортні вузли», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (068) 444 63 95, ел. пошта 1973bvi@gmail.com, ORCID 0000-0001-8622-2920

^{2*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта rgkorobyova@outlook.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

^{3*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта vobalanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6137-3420

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗНИЦЬ

Мета. Основною метою статті є вдосконалення імітаційної моделі залізничного напрямку для оцінки використання пропускної здатності окремими поїздами. **Методика.** У роботі розглянуті питання оцінки пропускної здатності залізниць України, Європейського Союзу, США. Відзначено, що реформування ринку залізничних перевезень призведе до зростання вимог до якості оцінки пропускної здатності, яку використовують поїзди різних перевізників. Як основний метод для оцінки пропускної здатності використані методи тягових розрахунків, організації руху на залізничному транспорті й імітаційного моделювання. **Результати.** Розроблено імітаційну модель залізничного напрямку, яка відображає як структуру, так і взаємодію окремих її елементів. Модель містить: поїзну модель, модель залізничної інфраструктури, модель управління рухом, інформаційну модель. Моделювання функціонування залізничного напрямку здійснюють поетапно. На першому етапі проводять моделювання руху одиночних поїздів. На другому етапі виконують узгодження зайнятості залізничної інфраструктури станцій і перегонів поїздами. Відправлення поїздів на перегін здійснюють за можливості забезпечення допустимих інтервалів між даним, а також попередніми й наступними поїздами; розроблена модель реалізована у вигляді програми «Графік руху». **Наукова новизна** роботи полягає в тому, що в ній запропоновано вдосконалену імітаційну модель залізничного напрямку, яка відображає процес пропуску поїздів по ділянках і через залізничні станції й дозволяє оцінювати вплив ступеня використання пропускної здатності на тривалість руху поїздів. **Практична значимість.** Отримані в роботі результати дозволяють оцінити вплив поїздів, що прямують за розкладом, на умови пропуску поїздів, що прямують без розкладу руху.

Ключеві слова: залізничний транспорт; графік руху; пропускна здатність; імітаційне моделювання

V. I. BOBROVSKIY^{1*}, R. G. KOROBKOVA^{2*}, V. O. BALANOV^{3*}

^{1*}Dep. «Transport Nodes», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (068) 444 63 95, e-mail 1973bvi@gmail.com, ORCID 0000-0001-8622-2920

^{2*}Dep. «Operation Management», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 70, e-mail rgkorobyova@outlook.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

^{3*}Dep. «Operation Management», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 70, e-mail vobalanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6137-3420

SIMULATION MODEL FOR EVALUATING THE CARRYING CAPACITY OF RAILWAYS

Purpose. The main purpose of the article is to improve the simulation model of railway direction to evaluate the use of carrying capacity by separate trains. **Methodology.** The paper deals with the evaluation of the carrying capacity of railways used at the railways of Ukraine, the European Union, and the USA. It is noted that the reform of the railway transportation market will cause an increase in the quality requirements for the evaluation of the carrying capacity used by trains of various carriers. As the main method for evaluating the carrying capacity in the work, the methods of traction calculations, the organization of movement at railway transport and simulation modeling were

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

used. **Findings.** The authors developed a simulation model of the railway direction, which reflects both the structure and the interaction of its individual elements. The model includes train model, model of railway infrastructure, model of traffic management, information model. Simulation of the direction functioning is carried out by stages. At the first stage, the movement simulation of single trains is performed. At the second stage, occupation coordination of the railway infrastructure of stations and runs by trains is carried out. Departure of trains to the run is carried out with the possibility of ensuring the permissible intervals between the data, as well as the previous and subsequent trains, the developed model is implemented in the form of the «Traffic Schedule» program. **Originality** of the work lies in the fact that it proposes an improved simulation model of the railway direction, which reflects the process of trains passing through the sections and railway stations and makes it possible to evaluate the influence of the carrying capacity use degree on the train movement duration. **Practical value.** The results obtained in this work allow us to estimate the influence of trains that run according to schedule on the conditions for passing the trains that run without schedule.

Keywords: railway transport; time-schedule; carrying capacity; simulation modeling

REFERENCES

1. Bilenko, G. M., & Popova, E. A. (2010). Analytical estimation of group of freight trains' coefficient by quick-running trains at various schemes of their routing on the train diagram. *Science and Technology in Transport*, 1, 43-51. (in Russian)
2. Bobrovskiy, V. I. (1999). Imitatsionnaya model razvyazki liniy v zheleznodorozhnom uzle. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 38, 35-42. (in Russian)
3. Bobrovskiy, V. I. (1998). Modelyrovanye systemy upravleniya propuskom poezdov cherez peresecheniya. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 33, 71-79. (in Russian)
4. Bobrovskiy, V. I. (1999). Otsenka raskhodov na peredvizhenie poezdov v proektiruemyykh razvyazkakh zheleznodorozhnykh liniy s ispolzovaniem imitatsionnogo modelirovaniya. *Information and Management Systems of Railway Transport*, 2, 48-51. (in Russian)
5. *Instruktsiia z rozrakhunku naiavnoi propuskoii spromozhnosti zaliznyts Ukrainy.* (2002). Kyiv: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)
6. Karasev, S. V., & Koryagin, M. Y. (2018). Estimation of Train Delays on the Railway Network by Modeling on the Conditions of Stochastic Train Flow. *The Siberian Transport University Bulletin*, 2(45), 43-51. (in Russian)
7. Kozachenko, D. M., Papakhov, O. Y., & Lohvinova, N. O. (2014). Doslidzhennia koefitsientiv ziomu v umovakh pryskorenoho ta shvydkisnogo rukhu pasazhyrskykh poizdiv. *Visnyk Akademii mynoi sluzhby Ukrainy. Seriya: Tekhnichni nauky*, 2, 110-116. (in Ukrainian)
8. Kozachenko, D. M., Mozolevych, H. Y., & Vlasiuk, O. V. (2009). Simulation of Rail Directions Work. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 28, 143-148. (in Ukrainian)
9. Levin, D. Y. (1988). *Optimizatsiya potokov poezdov.* Moscow: Transport. (in Russian)
10. Popova, E. A. (2009). Analytical estimation of group of freight trains' coefficient by slow-acting trains at their operation with overtaking. *Science and Technology in Transport*, 4, 47-52. (in Russian)
11. Prokhorchenko, A. V. (2014). Problemy rozrakhunku propuskoii spromozhnosti zaliznychnoi infrastruktury v umovakh rynkovykh vidnosyn. *Information and Management Systems of Railway Transport*, 4, 36-41. (in Ukrainian)
12. Kozachenko, D. M., Berezovyi, M. I., Balanov, V. O., & Zhuravel, V. V. (2015). Time Reserves During the Organisation of Freight Train Movement on Schedule. *Science and Transport Progress*, 2(56), 105-115. doi: 10.15802/stp2015/42170 (in Russian)
13. Fischetti, M., Salvagnin, D., & Zanette, A. (2009). Fast Approaches to Improve the Robustness of a Railway Timetable. *Transportation Science*, 43(3), 321-335. doi: 10.1287/trsc.1090.0264 (in English)
14. Gibson, S. (2002). Developments in Transport Policy: The Evolution of Capacity Charges on the UK Rail Network. *Journal of Transport Economics and Policy*, 36(2), 341-354. (in English)
15. Pouryousef, H., Lautala, P., & White, T. (2015). Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*, 23(1), 30-42. doi: 10.1007/s40534-015-0069-z (in English)
16. Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., & Vansteenwegen, P. (2013). Robust railway station planning: An interaction between routing, timetabling and platforming. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 3(3), 68-77. doi: 10.1016/j.jrtpm.2013.11.002 (in English)

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

17. Rotoli, F., Cawood, E. N., & Soria, A. (2016). *Capacity Assessment of Railway Infrastructure: Tools, Methodologies and Policy Relevance in the EU Context: JRC Technical Report*. Seville. (in English)
18. Törnquist, J., & Persson, J. A. (2007). N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(3), 342-362. doi: 10.1016/j.trb.2006.06.001 (in English)
19. *UIC leaflet 406 R. Capacity: UIC International Union of Railways*. (2013). Retrieved from <http://clc.am/gqq1zw> (in English)

Поступила в редколлегию: 08.08.2018

Принята к печати: 30.11.2018

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», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskogo str., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756-34-57 e-mail berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}State Enterprise «Design and Exploration Institute of Railway Transport of Ukraine «Ukrzaliznichproekt», Konarev 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

ANTI-TERROR ENGINEERING IN THE CASE OF POSSIBLE TERRORIST ATTACKS WITH CHEMICAL AGENTS

Purpose. This work aims to develop a method of local outdoor reduction of the concentration of a chemically hazardous substance, which entered the atmosphere through a cafe roof vent. It also involves the creation of a numerical model for calculating the chemical contamination zone that allows assessing the effectiveness of the screens used to minimize its level. **Methodology.** To solve this problem, we used the velocity potential equation that allowed to determine the air flow velocity field, and the equation of convective diffusion dispersion of a chemically hazardous agent in the atmospheric air emitted through the ventilation system in case of a terrorist attack. The simulation took into account the uneven velocity field of the wind flow, atmospheric diffusion, emission rate of a chemically hazardous agent. In the numerical integration of the velocity potential equation, we used the Liebmann method. For the numerical solution of the equation of convective diffusion dispersion of the impurity, an implicit alternate-triangular difference splitting scheme was used. **Findings.** The developed numerical model allowed assessing the effectiveness of building screens used to reduce the concentration of a hazardous substance and minimize the risk of toxic damage to people outdoor during an initiated emission of a chemical agent. The constructed numerical model can be implemented on computers of low and medium power, which allows it to be widely used for solving problems of the class under consideration when developing an anti-terror engineering strategy. **Originality.** An effective numerical model for calculating the outdoor chemical contamination zone during a possible terrorist attack using a chemical (biological) agent has been proposed. The model can also be applied to assess the effectiveness of some protective measures aimed at reducing the air pollution level during a terrorist attack. **Practical value.** The developed numerical model can be used to organize protective actions near social objects of a possible chemical attack by a terrorist.

Keywords: terrorist attack; chemical air pollution of the atmosphere; anti-terror engineering; numerical simulation

Introduction

Acts of terrorism with the use of chemical (biological) agents in the streets of cities are not a groundless threat. One of the variants to emit a hazardous chemical agent into the atmosphere, which is sufficiently hidden from an observer, can

be its discharge into the ventilation system of various cafes, which are located in city streets (Fig. 1). Emission of polluted air from the ventilation system of a cafe is usually carried out on the roof. Scientifically, it is the emission from a low source.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

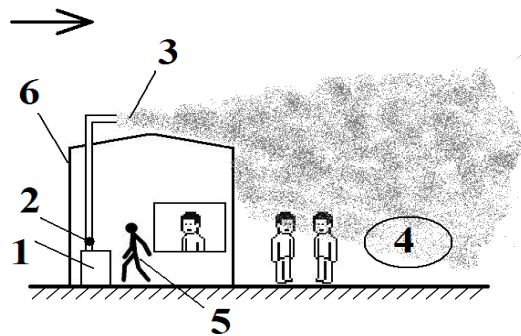


Fig. 1. Scheme of outdoor chemical air contamination at initiated entry of hazardous substances in a cafe ventilation system:

- 1 – process equipment; 2 – place of hazardous substance entry into the ventilation system;
- 3 – polluted air discharging device on the cafe roof;
- 4 – outdoor chemical contamination zone;
- 5 – initiator of hazardous substance discharge into the ventilation system; 6 – cafe building

With such an emission of a chemical agent through a ventilation system, a sufficiently large area of chemical contamination can form behind the building. For example, Fig. 2 shows a photo of the contamination zone near the mini-cafe. Emission is combustion process products from the kitchen. It is clearly seen that the pollution zone covers not only the sidewalk, but also part of the roadway. If people get into this chemical contamination zone, the risk of their toxication is extremely high. We emphasize that people will definitely fall into the contamination zone, because cafes are public places. In addition, such a scenario of a terrorist attack ensures unexpectedness and secrecy. In this regard, the question arises about the development of engineering methods to protect people from damage by reducing the concentration of a hazardous substance in the street during a possible terrorist attack.

The theoretical solution to this problem is quite complicated. When emitting a chemical agent from a low source, it is necessary, first, to take into account the influence of the building on the formation of the chemical contamination zone. Secondly, it is important that the mathematical model would also make it possible to calculate the effectiveness of the use of specific engineering solutions to reduce the intensity of chemical contamination of the air environment near the facility. To estimate the level of air pollution in case of a possible terrorist act, for example, Gaussian



Fig. 2. Air contamination zone near the cafe:
1 – polluted air discharging device on the cafe roof;
2 – visible boundary of the contamination zone
(Heroev Avenue, Dnipro)

models can be used as a zero approximation. But these models do not allow to take into account the influence of the building and various engineering elements on the formation of chemical contamination zones, that is, they cannot be used to assess the effectiveness of various anti-terror methods. The normative methods used in Ukraine for solving problems of assessing the size of chemical contamination zones (for example, the OND-86 technique), for this reason, also cannot be applied. The only theoretical method for solving problems of this class is CFD modeling. Within this scientific direction, specialized software packages «ANSYS Fluent», «FAST», etc. have been created. These packages are a powerful tool for solving a wide class of problems. It should be noted that the cost of licensed packages for research is very high, so access to such packages is limited. It is also known that the use of these packages requires the use of powerful computers and large consumption of computer time when solving a practical problem – several days to calculate one variant of the problem. This is a definite obstacle, as the organizations of a special focus conduct numerous serial calculations.

Purpose

This work aims to develop a method of local outdoor reduction of the concentration of a chemically hazardous substance, which entered the atmosphere through a cafe roof vent. It also involves the creation of a numerical model for evaluating

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

the effectiveness of engineering methods for air contamination protection during a terrorist attack with a highly toxic chemical agent.

Methodology

The process of dispersing a highly toxic chemical agent outdoor can be described on the basis of the following equation (profile task) [2–5, 7, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + Q \delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \quad (1) \end{aligned}$$

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

The boundary conditions for equation (2) are written as [3]: at $t = 0$, $C = 0$. At the boundaries where the air flow enters the calculation area, $C = C_{in}$, here C_{in} is the known value. We assume that $C_{in} = 0$. In the area where the air flow exits the computational domain, in the numerical model we set a «soft» boundary condition of the form: $C_{i+1,j} = C_{i,j}$, here $C_{i+1,j}$ is the pollutant concentration in the boundary (last) cell.

Aerodynamics model. To apply equation (1) in the case of dispersion of a chemical (biological) agent in the presence of a building, it is necessary to know the uneven velocity field of the wind flow. To determine the wind flow velocity field $u = f(x, y)$, $v = f(x, y)$, we will use the ideal fluid irrotational flow model [5]:

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

where P – velocity potential.

The components of the air flow velocity vector are determined by the dependence of the form:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (3)$$

For equation (2) there are such boundary conditions:

– on solid boundaries we set the condition of the form:

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

where n – unit outer normal vector to the boundary;

– on the boundary of the airflow exit from the computational domain, we set the boundary condition $P = \text{const}$;

– on the boundaries where the inflow of air occurs, we set the boundary condition of the form: $\frac{\partial P}{\partial n} = V$, where V – the known wind flow velocity.

Numerical solution to the task. For the numerical integration of the modeling equations we will use finite-difference solution methods.

We will carry out the approximation of derivatives, following [2, 5]. Approximation of the time derivative is carried out as follows:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

The first derivatives are approximated by correlations [5]:

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

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]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1};$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

For approximation of the second derivatives, we use the dependencies [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \end{aligned}$$

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

Taking into account the above designations of difference operators, we write the difference analogue of equation (1):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + \\ + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + \\ + Q_{ij} \delta_{ij}. \quad (4) \end{aligned}$$

We perform the splitting of the difference equation (4). The splitting equations at each step are written as follows:

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

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^{n+k} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n), \quad (5) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c), \quad (6) \end{aligned}$$

– in the third step ($k = n + \frac{3}{4}; c = n + \frac{1}{2}$) we apply the dependence (6);

– in the fourth step ($k = n + 1; c = n + \frac{3}{4}$) we use the dependence (5).

The desired value of the function C at each fractional step (5), (6) is determined by the point-to-point computation formula.

In the last step, we solve the equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q \delta(x - x_0) \delta(y - y_0).$$

To solve this equation, the Euler method is used.

For the numerical solution of equation (2), we use the Liebmann method. The approximate equation for the velocity potential in this case is written in the form:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0.$$

The value of the velocity potential P_{ij} is calculated in the centers of the difference cells by the formula:

$$P_{i,j} = \left[\frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right] / A,$$

$$\text{where } A = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right).$$

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

Findings

The developed CFD model was used to solve the following model problem. We consider the emission of highly toxic chemical agent through the ventilation system, the outlet of which is located on the cafe roof. The sketch of the computational domain is shown in Fig.3.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

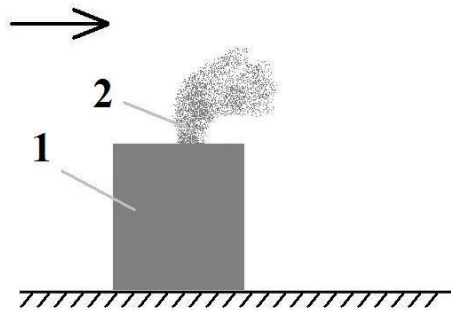


Fig. 3. Sketch of emission of a chemical agent on the café roof (no protection element):
1 – café building; 2 – point of chemical agent emission

To minimize the air contamination level near the café, as an anti-terrorist method, we use the installation of a vertical (Fig. 4) or inclined screen (Fig. 6) on the roof.

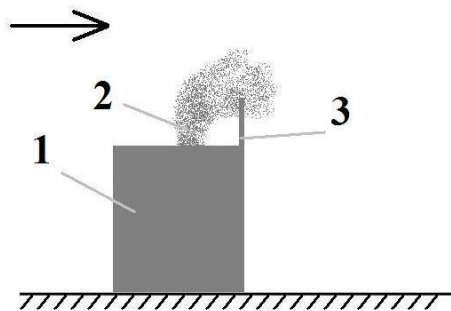


Fig. 4. Sketch of computational region (vertical screen on the café roof is a protection measure, scenario №2):
1 – café building; 2 – point of high toxic chemical emission;
3 – vertical screen

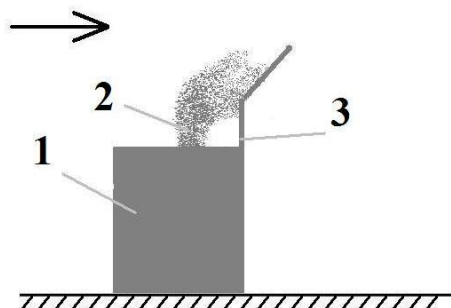


Fig. 5. Sketch of computational region (inclined screen on the café roof is a protection measure, scenario №3):
1 – café building; 2 – point of high toxic chemical emission;
3 – inclined screen

It is necessary to evaluate the effectiveness of the used screens to minimize the air contamination level near the café.

The air contamination zone near the café for each working scenario is shown in Fig. 6–8.

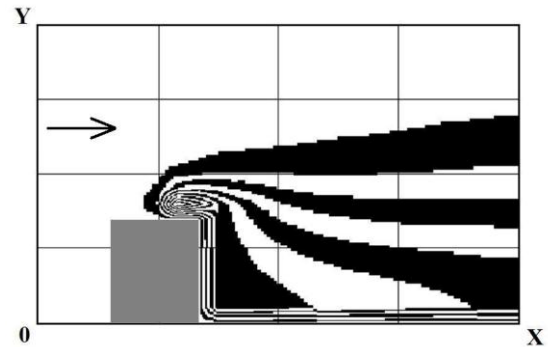


Fig. 6. Isolines of toxic chemical concentration near café building (no protection measures are used, scenario №1)

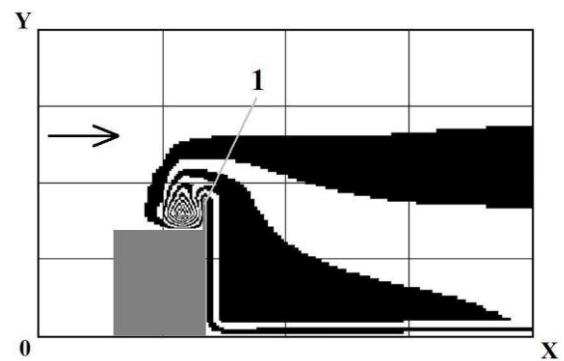


Fig. 7. Isolines of toxic chemical concentration near café building (vertical screen on the roof is a protection measure, scenario №2):
1 – vertical screen

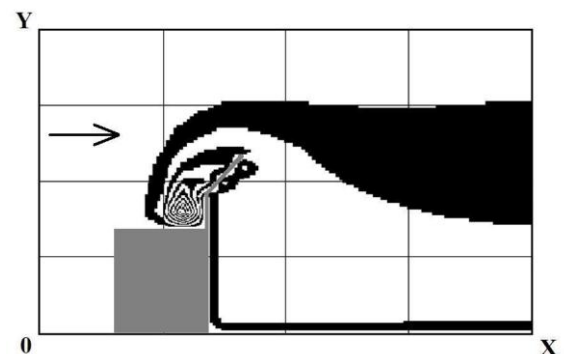


Fig. 8. Isolines of toxic chemical concentration near café building (inclined screen on the roof is a protection measure, scenario №3)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Fig. 8 shows that the use of the inclined screen makes it possible to take a stream of contaminated air away from the cafe. For a more detailed analysis of the effectiveness of the used screens, the Ta-

ble 1 shows the concentration of the contaminant at different distances from the building, the level of 1.7 m – the height of a person for all the scenarios under consideration.

Table 1

**Dimensionless concentration of toxic chemical
at different distance from the cafe building**

Distance from the café building, m	Concentration, scenario # 1	Concentration, scenario # 2	Concentration, scenario #3
2.5 m	1.26	0.98	0.78
4.5 m	1.16	0.93	0.75
5.5 m	1.12	0.91	0.74
9.5 m	1.02	0.86	0.70
11.5 m	0.98	0.83	0.68

As can be seen from the Table 1, the use of screens on the building roof allows to reduce the concentration of a chemically hazardous substance outdoor and thereby minimize the risk of toxic damage to people during the terrorist attack. Obviously, for the case under consideration, it is more effective to use the inclined screen (scenario No. 3).

It should be noted that the task solution time is about 5 seconds.

Originality and practical value

The numerical model has been developed that allows to determine the effectiveness of engineering methods for minimizing the outdoor air contamination level in the event of an initiated (terrorist attack) pollution with a highly toxic chemical agent.

The distinctive feature of the constructed model is the use of the equation of convective-diffusive dispersion of a chemical agent together with the equation for calculating the wind flow velocity field near the building (potential flow model).

Computer time spent on the implementation of the developed numerical model is a few seconds.

Studies conducted on the basis of numerical simulation have shown that the use of screens on the roof of a building can reduce the air contamination level in a certain area near the building.

Conclusions

The numerical model has been developed for assessing the air contamination level near the building in the event of the chemical agent emission on its roof. The model makes it possible to assess the effect of screens on the protection of atmospheric air against contamination during such an emission. The basis for solving the problem is numerical simulation based on the equations describing the dispersion of impurities and aerodynamics.

Further improvement of this approach should be carried out in the direction of developing a three-dimensional numerical model focused on solving the tasks of this class.

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.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гулько, 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 [Електронний ресурс] // Croner-i. – Режим доступа: <https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transport-operations?product=139> – Загл. с экрана. – Проверено : 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 [Електронний ресурс] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Режим доступа: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Загл. с экрана. – Проверено : 14.06.2018.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, Jan Bitta // The Science for Population Protection. – 2015. – No. 2.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. В. БЕРЛОВ^{2*}, І. В. КАЛАШНІКОВ^{3*}, В. А. КОЗАЧІНА^{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, 24 а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}ДП «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект», вул. Конарева, 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

АНТИТЕРОРИСТИЧНИЙ ІНЖИНІРИНГ ПРИ МОЖЛИВОМУ ТЕРАКТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ХІМІЧНОГО АГЕНТА НА ВУЛИЦІ

Мета. Дана робота передбачає розробку методу локального зниження на вулиці концентрації хімічно небезпечної речовини, яка надійшла в атмосферу через вентиляційний викид на даху кафе, а також створення чисельної моделі для розрахунку зони хімічного зараження, яка дозволяє оцінити ефективність застосування екранів, що мінімізують його рівень. **Методика.** Для вирішення поставленого завдання використано

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2018/154034

© М. М. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna, 2018

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

рівняння для потенціалу швидкості, на базі якого визначено поле швидкості повітряного потоку, і рівняння конвективно-дифузійного розсіювання хімічно небезпечного агента в атмосферному повітрі, викинутого в разі теракту через систему вентиляції. При моделюванні були враховані нерівномірне поле швидкості вітрового потоку, атмосферна дифузія, інтенсивність викиду хімічно небезпечного агента. При чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості використаний метод Лібмана. Для чисельного рішення рівняння конвективно-дифузійного розсіювання домішки використана неявна поперемінно-трикутна різницева схема розщеплення. **Результати.** На основі розробленої чисельної моделі подана оцінка ефективності застосування екранів на будівлі для зниження концентрації небезпечної речовини та мінімізації ризику токсичного ураження людей на вулиці при ініційованому викиді хімічного агента. Побудована чисельна модель може бути реалізована на комп'ютерах малої та середньої потужності, що дозволяє широко використовувати її для вирішення завдань даного класу при розробці стратегії антитерористичного інжинірингу. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективну чисельну модель для розрахунку зони зараження людей на вулиці при можливому теракті з використанням хімічного (біологічного) агента. Модель також може бути застосована для оцінки ефективності деяких захисних заходів, спрямованих на зниження рівня забруднення повітряного середовища під час теракту. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути використана для організації захисних заходів біля соціальних об'єктів можливої хімічної атаки терориста.

Ключові слова: теракт; хімічне забруднення атмосфери; антитерористичний інжиніринг; чисельне моделювання

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, А. В. БЕРЛОВ², 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, 24 а, Днипро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}ГП «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта «Укрзалізничпроект», 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

АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ТЕРАКТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО АГЕНТА НА УЛИЦЕ

Цель. Данная работа предусматривает разработку метода локального снижения на улице концентрации химически опасного вещества, которое поступило в атмосферу через вентиляционный выброс на крыше кафе, а также создание численной модели для расчета зоны химического заражения, позволяющей оценить эффективность применения экранов, минимизирующих его уровень. **Методика.** Для решения поставленной задачи использовано уравнение для потенциала скорости, на базе которого определено поле скорости воздушного потока, и уравнение конвективно-диффузионного рассеивания химически опасного агента в атмосферном воздухе, выброшенного в случае теракта через систему вентиляции. При моделировании были учтены неравномерное поле скорости ветрового потока, атмосферная диффузия, интенсивность выброса химически опасного агента. При численном интегрировании уравнения для потенциала скорости использован метод Либмана. Для численного решения уравнения конвективно-диффузионного рассеивания примеси использована неявная поперемінно-треугольная разностная схема расщепления. **Результаты.** На основе разработанной численной модели дана оценка эффективности применения экранов на здании для снижения концентрации опасного вещества и минимизации риска токсичного поражения людей на улице при инициированном выбросе химического агента. Построенная численная модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать ее для решения задач рассматриваемого класса при разработке стратегии антитеррористического инжиниринга. **Научная новизна.** Предложена эффективная численная модель для расчета зоны заражения людей на улице при возможном теракте с использованием химического (биологического) агента. Модель также может быть применена для оценки эффективности некоторых защитных мероприятий, направленных на снижение уровня загрязнения воздушной

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

среды при теракте. **Практическая значимость.** Разработанная численная модель может быть использована для организации защитных мероприятий возле социальных объектов возможной химической атаки террориста.

Ключевые слова: теракт; химическое загрязнение атмосферы; антитеррористический инжиниринг; численное моделирование

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: Uchebnoye 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 tekhnogennoho 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. *Croner-i*. 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. (2017). *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. *The Science for Population Protection*, 2. (in English)

Received: July 30, 2018

Accepted: Nov. 14, 2018

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 658.7(476.2)

О. А. ХОДОСКИНА^{1*}, В. Д. АНАСОВИЧ^{2*}

^{1*}Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 730 35 91, эл. почта for_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638

^{2*}Каф. «Экономика транспорта», Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +37 (529) 931 88 07, эл. почта 3_steamakk_3@mail.ru, ORCID 0000-0002-9902-332X

ОПТИМИЗАЦИЯ СНАБЖЕНЧЕСКО-СБЫТОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ

Цель. Снабжение представляет очень важную сферу деятельности промышленного предприятия. Поэтому целью настоящей работы является подробное изучение и анализ возможных путей совершенствования снабженческой деятельности. **Методика.** В процессе исследования использованы методы сравнения, научного поиска, анализа и синтеза для изучения снабженческо-сбытовой деятельности промышленного предприятия. **Результаты.** В статье рассмотрены основные логистические принципы и сфера их применения на примере снабженческой деятельности промышленного предприятия по производству мягкой мебели. Произведена оценка нескольких потенциальных поставщиков материальных ресурсов и внедрения методики обоснования оптимального выбора поставщика. В качестве объекта рассмотрения выбрано промышленное предприятие, основным видом деятельности которого является производство мягкой мебели. Рассмотрены некоторые из его основных поставщиков по схожим видам продукции – бумаги перфорированной. Произведена их сравнительная оценка по основным влияющим параметрам – расположение, качество и ассортимент предлагаемых материальных ресурсов. При этом использован метод экспертных оценок. При помощи методики обоснования оптимального выбора поставщика и с учетом основных принципов логистики из предлагаемых вариантов по результатам выполненных расчетов определен оптимальный вариант поставки материалов для осуществления производства и выбран поставщик, работа с которым наиболее выгодна для рассматриваемого предприятия. Также рассмотрены варианты предоставления скидки постоянному поставщику и влияние ее на снижение затрат. **Научная новизна.** На основании изучения методических источников и научных разработок в области снабженческой логистики предложены пути оптимизации снабженческо-сбытовой деятельности конкретного предприятия. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы для оценки нескольких потенциальных поставщиков материальных ресурсов конкретного предприятия и обоснования оптимального выбора наилучшего из них с учетом логистических принципов. Это позволит уменьшить расходы предприятия, связанные с организацией поставок необходимых для производства материальных ресурсов. Также это открывает для предприятия пути повышения общей эффективности его деятельности за счет оптимизации работы с поставщиками.

Ключевые слова: сбыт; снабжение; логистические принципы; поставщики; логистическое моделирование сбыта

Введение

Сегодня применение логистики является повсеместным – практически во всех сферах народного хозяйства используются элементы логистического подхода. И тем более сложно

представить осуществление сбытовой, снабженческой деятельности предприятий без рассмотрения логистических потоков, управления ими, использования принципов логистики. Успех большинства производственных пред-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

приятый в промышленной сфере имеет прямую взаимосвязь с продуктивностью функционирования отдела снабжения и сбыта [4, 6]. Для эффективной организации снабженческо-сбытовой деятельности предприятия необходимо согласовать и синхронизировать функционирование служб, отвечающих за эти направления работ – в первую очередь «снабженцев», маркетологов и логистов.

Для качественной организации работы службы снабжения на предприятии нужно выполнять следующие требования:

- обеспечение непрерывного потока продукции (сырья, комплектующих) и предоставления услуг, необходимых для жизнедеятельности предприятия;
- управление запасами (сведение уровня инвестиций, связанных с запасами продукции, и затрат на их поддержание к минимуму);
- поддержание уровня качества обслуживания потребителей;
- работа с поставщиками (поиск компетентных поставщиков);
- стандартизация (покупка стандартной продукции там, где это возможно);
- достижение минимальной общей стоимости обслуживания (процесс закупки требует наличия продукции и обслуживания по наименьшей стоимости);
- обеспечение конкурентного преимущества предприятия;
- развитие отношений и достижение гармоничных, продуктивных и рабочих отношений с сотрудниками других функциональных подразделений предприятия ;
- обеспечение снабжения при снижении уровня накладных расходов [1].

Вопросы снабжения традиционно находятся в зоне особого внимания со стороны руководства компаний [3, 5]. В последние годы значительно возросло влияние эффективности управления системой снабжения на проблему поддержания собственной конкурентоспособности предприятий. Одним из лучших и проверенных способов повышения рентабельности, поддержки высокого качества производимой продукции и стимулирования инноваций является снижение стоимости закупаемых материалов и услуг. Чтобы добиться этого, необходим

целостный подход к управлению взаимоотношениями с поставщиками, который позволил бы связать стратегию снабжения с реализацией, усилил участие поставщиков в работе компании.

Цель

Снабжение по сути является вопросом выбора – по цене, качеству, условиям оплаты и доставки нужного товара (сырья, комплектующих и т. п.), предлагаемого во многих случаях достаточно широким кругом продавцов. В зависимости от конкретных требований, предъявляемых к сырью, комплектующим и другим товарам, формируется набор качественных характеристик, которые и определяют в конечном итоге выбор поставщика. От уровня организации процесса снабжения, своевременности поступления материальных ресурсов в производство в требуемом ассортименте, количестве и должного качества в значительной мере зависят равномерный и ритмичный выпуск готовой продукции и эффективность деятельности предприятия. Поэтому целью настоящей работы является подробное изучение снабженческой деятельности и анализ возможных путей ее совершенствования.

Методика

В процессе исследования использованы методы сравнения, научного поиска, анализа и синтеза для изучения снабженческо-сбытовой деятельности промышленного предприятия.

Результаты

Рациональная организация снабжения в значительной мере зависит от реализации представленных ниже логистических принципов данного вида деятельности [2]:

1) плановость – поставки продукции осуществляют на основе плановых графиков с учетом разнообразия требуемого ассортимента ряда для организации производственного процесса;

2) ритмичность – поставки сырьевых ресурсов или комплектующих нужно осуществлять через относительно одинаковые промежутки

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

времени с учетом графика производства конкретных видов продукции;

3) оперативность – предполагает осуществление процесса снабжения комплектующими (сырьем) в зависимости от изменения потребности в них у предприятия;

4) экономичность – подразумевает минимизацию затрат рабочего времени, материальных и денежных ресурсов на доставку продукции;

5) централизация – снабжение предприятия как потребителя требуемыми материальными ресурсами осуществляют поставщики своими силами и средствами;

6) технологичность – характеризуется использованием современных технологий закупок и поставок.

Указанные логистические принципы характерны не только для такой важной части деятельности предприятия, как организация снабжения, но также и для области сбыта. Ведь основной целью любого субъекта хозяйствования является получение прибыли, что достигается в первую очередь через сбыт готовой продукции, сбыт является одним из циклов производственно-хозяйственной деятельности предприятия, который определяет результаты хозяйствования, общую эффективность производства и частные показатели эффективности (в зависимости от целей производимого анализа).

От правильной организации снабжения, реализации функций снабженческой деятельности во многом зависит эффективность функционирования предприятия, повышение его конкурентоспособности на рынке.

В современных условиях хозяйствования реализация производимой предприятием продукции происходит в условиях жесткой конкуренции продавцов. Для достижения успеха от предприятия требуется преодоление многих проблем, связанных со сбытом своей продукции: выбор секторов и сегментов рынка, ассортимента производимой продукции, выбор регионов продаж, а также эффективность организации и технологии производства. Анализ как отечественной, так и зарубежной сбытовой деятельности показывает, что логистическое моделирование сбыта может способствовать обеспечению необходимого уровня эффективности сбытовой деятельности при соблюдении опре-

деленных принципов, которые называют принципами логистического моделирования [11, 13].

К основным принципам логистического моделирования сбыта, базирующимся также на соблюдении основного правила логистики (нужный товар необходимого качества в необходимом количестве в нужное время и в нужное место нужному потребителю с нужным уровнем затрат), можно отнести следующие [8]:

1. Системность. Важнейшим принципом, позволяющим смоделировать сложный по экономической природе процесс сбыта, является принцип системности. Система сбыта – это не произвольное сочетание элементов, а сопряжение взаимосвязанных и взаимообусловленных частей целого. В соответствии с этим принципом любая логистическая модель сбыта должна включать всю совокупность элементов (подсистем ориентированных на достижение общесистемных целей).

2. Целостность предполагает наличие в системе сбыта свойств, которых нет ни у одного из составляющих ее элементов. К примеру, ни склад, ни транспортный цех, ни цех упаковки, ни отдел сбыта по отдельности не в состоянии осуществить законченный процесс сбыта, то есть удовлетворить платежеспособный спрос покупателей путем максимизации доходов фирмы.

3. Иерархичность. Принцип иерархичности дает возможность осуществить многоуровневую организацию системы сбыта, снять возможные противоречия и конфликты в распределении полномочий между элементами. Последовательная реализация этого принципа предполагает, что в рамках установленной компетенции каждая подсистема самостоятельна в определении способов и средств решения поставленных перед нею задач.

4. Функциональность. Принцип функциональности обуславливает существование у системы сбыта и каждого из ее элементов своего функционального назначения. Именно распределение функций предопределяет организационную структуру службы сбыта, а не наоборот. Иначе говоря, в логистическом моделировании сбыта всем структурным подразделениям подыскивают функции, а под определенную совокупность функций создают (моделируют) структурные подразделения.

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

5. *Целенаправленность*. Принцип целенаправленности означает, что как процесс моделирования, так и процесс функционирования логистических моделей сбыта должен быть подчинен определенным целям.

6. *Управляемость*. Принцип управляемости можно интерпретировать как соответствие сложности управляющей подсистемы сложности процесса управления сбытом.

7. *Адекватность*. Принцип адекватности – это максимальное отображение в логистической модели сбыта реально протекающих сбытовых процессов.

8. *Наблюдаемость*. Принцип наблюдаемости основывается на том, что логистическое моделирование сбыта охватывает весь диапазон существующих моделей – от формальных математических до экспертных.

9. *Альтернативность*. Принцип альтернативности подразумевает наличие альтернативной системы сбыта в свете меняющихся каналов и неустойчивости рыночной конъюнктуры.

10. *Комплексность*. Принцип комплексности предусматривает обязательное отображение в логистических моделях взаимосвязей всех элементов системы между собой и внешней средой, взаимного влияния друг на друга.

Из вышесказанного следует, что для повышения эффективности снабженческо-сбытовой деятельности предприятия целесообразно прибегнуть к интегрированию логистических принципов, реализация которых ведет к уменьшению объемов всех видов запасов, снижению неравномерности материальных потоков, а следовательно, к сокращению затрат на хранение и перемещение материальных ресурсов и готовой продукции [7, 9, 10, 12]. Также повышается сбалансированность в управлении хозяйственной деятельностью организации.

В качестве примера для приложения указанных принципов можно рассмотреть снабженческо-сбытовую деятельность реального предприятия – ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс». Это коммерческое предприятие с частной формой собственности, входит в состав концерна Белорусского производственно-торгового концерна лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности

«БЕЛЛЕСБУМПРОМ», специализируется на производстве мягкой мебели.

Предприятие осуществляет: производство, ремонт и реставрирование бытовой мебели; производство готовых текстильных изделий за исключением одежды; производство различных деревянных изделий; производство изделий из проволоки; оптовую и розничную торговлю широким ассортиментом производимых товаров; перевозки грузовым сухопутный транспорт (включая внутригородские перевозки автомобильным транспортом, международные перевозки грузовым автомобильным и железнодорожным транспортом). На предприятии постоянно осуществляют механизацию и автоматизацию трудоемких процессов, проводят техническое оснащение производства современным высококачественным оборудованием. Это, в свою очередь, отражается и на снабженческо-сбытовой политике – приводит к поиску новых поставщиков товарно-материальных ресурсов, новых каналов продвижения и сбыта производимой продукции.

В обязанности отдела сбыта входит реализация первоочередных снабженческих и сбытовых функций, в частности, грамотная организация закупок материальных ресурсов. Важность выбора поставщика объясняется не только функционированием на современном рынке большого количества поставщиков одинаковых материальных ресурсов, но и тем, что он должен быть надежным партнером товаропроизводителя в реализации его стратегии организации производства [2]. Поэтому рассмотрим практическое применение вышеуказанных принципов на примере выбора поставщика из нескольких присутствующих на данном рынке.

На сегодняшний день рассматриваемое предприятие закупает бумагу перфорированную для автоматизированного настольно-раскройного комплекса (АНРК) в ЧПУП «Фоллето», г. Минск. Однако в связи высокими ценами и наличием потенциальных поставщиков с более удобным географическим положением актуальность имеющегося поставщика ставится под вопрос. В качестве альтернативного поставщика рассмотрим предприятие «Корпусная мебель «Skif», г. Гомель [1]. Проведем сравнительный анализ указанных по-

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

ставщиков по основным значимым позициям с использованием метода рейтинговых оценок (табл. 1). Поскольку у обоих предприятий-поставщиков производимая продукция одинакового качества, стоит учесть различия, т. е. расстояние между поставщиками и заказчиками, установленную цену.

Таблица 1

Расчет критериев оценки поставщиков методом рейтинговых оценок (в баллах)

Table 1

Calculation of criteria for evaluating suppliers by rating method (in points)

Критерии оценки поставщиков	ЧПТУП «Фоллето»	«Корпусная мебель «Skif»
Цена продукта	7	8
Удаленность склада	2	10
Контроль сроков поставки	7	10
Качество продукции	9	9
Условия доставки	8	9
Сумма минимального заказа	9	9
Условия работы и платежей	9	8
Средний балл	7,3	9

Расходы на транспортировку закупок в требуемом объеме от поставщика ЧПТУП «Фоллето» больше на 35,35 руб., чем аналогичные расходы «Корпусная мебель «Skif».

ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» закупает бумагу в объеме 800 кг. Следовательно, при стоимости единицы продукции 1,6 руб. у ЧПТУП «Фоллето» и 1,45 руб. у «Корпусная мебель «Skif» затраты на одну закупку будут составлять 1 280 и 1 160 руб. соответственно, что означает следующее: затраты на закупку у ЧПТУП «Фоллето» больше на 120 руб., чем затраты на закупку у «Корпусной мебели «Skif». По методу балльных оценок видно, что средний балл у ЧПТУП «Фоллето» меньше на 1,7, чем у «Корпусная мебель «Skif».

Таблица 2

Расчет совокупных расходов, связанных с поставкой товаров

Table 2

Calculation of total expenses related with the delivery of goods

Наименование показателя	ЧПТУП «Фоллето»	Корпусная мебель «Skif»
Количество километров, км	304	7
Стоимость бензина за 1 л, руб.	1,19	1,19
Необходимое количество топлива на 100 км, л	10	10
Необходимое количество топлива, л	30,4	0,7
Транспортные расходы, руб.	36,18	0,83

Сумма общих затрат на поставку бумаги перфорированной для АНРК составляет 1 316,18 руб. и 1 160,83 руб. для ЧПТУП «Фоллето» и «Корпусная мебель «Skif» соответственно. При заказе у «Корпусная мебель «Skif» экономический эффект составит 155,35 руб.

Рентабельность от внедрения мероприятия:

$$R = (\mathcal{E} / 3) \cdot 100 \quad (1)$$

где \mathcal{E} – экономический эффект от внедрения мероприятия, руб.; 3 – затраты на внедрения мероприятия, руб.

$$R = (155,35 / 1\,316,18) \cdot 100 = 11,8\%$$

Эффект от изменения общей величины логистических затрат вследствие оптимизации процессов товародвижения:

$$\Delta Z_{\text{л}} = Z_{\text{баз}} - Z_{\text{пр}} \quad (2)$$

где $Z_{\text{баз}}$, $Z_{\text{пр}}$ – сумма логистических затрат по базовому и проектному вариантам функционирования системы соответственно (учтены только виды затрат, подвергающиеся изменению в процессе оптимизации), руб.

$\Delta Z_{\text{л}} = 1\,316,18 - 1\,160,83 = 155,35$ руб. в месяц.

Из вышеизложенного можно заключить, что применение логистики позволяет существенно повысить эффективность торговли. Логистический эффект от замены поставщика ЧПТУП «Фоллето» на «Корпусная мебель «Skif» достигается путем сокращения запасов в цепях товародвижения (за счет высокой степени согласованности между участниками в вопросах своевременного пополнения запасов) и сокращения транспортных расходов (достигается благодаря высокой согласованности в вопросах использования транспорта).

Также предложено установить более выгодные взаимоотношения с СОАО «БелНордСтайл» путем договоренности о предоставлении скидки на закупаемые материалы на взаимовыгодной основе. Основные принципы применения скидок, выполнение которых должно обеспечить эффективность всей системы скидок, следующие:

- во-первых, применение системы скидок должно привести к положительному экономическому эффекту, то есть скидки не должны восприниматься как неизбежное зло, с которым приходится мириться предприятию. Напротив, они должны служить сохранению уровня прибыльности, а лучше – его повышению;

- во-вторых, предоставляемая скидка должна вызывать реальный интерес и стремление к выполнению оговоренных условий;

- в-третьих, система скидок должна быть проста и понятна клиентам и сотрудникам компании. Наличие в одной системе одновременно большого количества разных видов скидок может создать путаницу и непонимание у покупателя и значительно затруднить работу отдела продаж.

Рассмотрим существующие виды скидок:

1. Функциональные скидки предоставляют тем продавцам, которые выполняют часть функций реализации продукции поставщика. При помощи такого вознаграждения должны быть покрыты торговые расходы.

2. Скидки за количество. Снижение цены в этом случае предлагают покупателям больших количеств при каждой поставке. Скидки за количество должны стимулировать покупку

больших количеств в рамках одного заказа. Тем самым поставщик может снизить затраты, приходящиеся на заказ, и уменьшить затраты по оформлению заказов. Эти скидки предоставляются в стоимостном или натуральном выражении (поставка дополнительного количества). Скидкой за количество является также бонус, который чаще всего предоставляют один раз в год за определенное количество купленного товара. База для расчета бонуса – достигнутый в конце каждого года уровень продаж определенному покупателю в натуральном или стоимостном выражении.

3. Временные скидки предоставляют, если заказы поступают в определенные моменты или в точно определенные периоды. Тем самым достигается по возможности равномерное распределение объемов сбыта поставщика в течение года. Эти скидки предоставляют также, чтобы продать определенные старые модели.

4. Скидки за «верность» предоставляют за долготельные хозяйственные связи. Если клиент покупает определенные продукты в течение установленного периода у одного поставщика, он также может получить скидку за «верность».

5. Скидки за оплату наличными предлагают с целью ускорения процесса получения платежей. Их можно предоставить за быструю оплату счетов. Скидки за оплату наличными используют так же, как и сконто (скидка при досрочном платеже).

6. Специальные скидки. Существует много видов специальных скидок, например, скидка персоналу, работающему на предприятии. Скидка может быть установлена также определенным группам лиц, в том числе по профессиональному признаку, тогда говорят о скидках федеральным и местным чиновникам, членам союзов или за дальнейшую обработку товара.

Так как ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» тесно сотрудничает с СОАО «БелНордСтайл» и закупает большое количество материалов именно у этого поставщика, целесообразно будет пересмотреть их договоренности на поставку с внесением скидки за количество, которую будут предоставлять раз в год.

Эффект от изменения общей величины логистических затрат вследствие внедрения мероприятия также рассчитываем по формуле 2:

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

$\Delta Z_{\text{л}} = 196\,344 - (196\,344 - 9\,817,2) = 9\,817,2$
руб. в год.

На первый взгляд может показаться, что предоставлять такую скидку СОАО «БелНордСтайл» не выгодно. Однако ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» является платежеспособным предприятием и своевременно расплачивается за поставляемые материалы. Со своей стороны ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» подпишет договор с СОАО «БелНордСтайл» на поставку на целый год, что будет являться гарантом сотрудничества.

Научная новизна и практическая значимость

Следует отметить, что на рассматриваемом предприятии предлагаемый анализ снабженческо-сбытовой деятельности носит достаточно поверхностный характер. В связи с этим применение современных методических разработок и подходов является для него особенно важным, а применение логистических принципов при организации снабжения материальными ресурсами и сбыта производимой продукции вносит элемент новизны, так как осуществление такой работы на научной основе для предприятия ранее не осуществлялось. Поэтому на основании изучения методических источников и научных разработок в области снабженческой логистики предложены пути оптимизации снабженческо-сбытовой деятельности предприятия.

На основании результатов проведенного исследования могут быть разработаны рекомендации по оценке нескольких потенциальных поставщиков материальных ресурсов для конкретного предприятия и обоснованию оптимального выбора наилучшего из них с учетом логистических принципов. Это позволит

уменьшить расходы предприятия, связанные с организацией поставок необходимых для производства материальных ресурсов. Также это открывает для предприятия пути повышения общей эффективности его деятельности за счет оптимизации работы с поставщиками.

Выводы

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что с учетом применения основных логистических принципов при организации снабженческо-сбытовой деятельности ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» выгоднее сменить поставщика и начать сотрудничать с «Корпусная мебель «Skif». Главное преимущество работы с «Корпусная мебель «Skif» заключается в том, что предприятие будет тратить меньшее количество финансовых ресурсов на транспортировку, а также меньше времени на заключение договоров, при этом будет получать материалы высокого качества по приемлемой цене. Это облегчит деятельность отдела снабжения и позволит предприятию сократить затраты на материальные ресурсы.

Прогноз влияния изменений транспортных затрат говорит о том, что предприятие получает основу для планирования логистических мероприятий. Главное преимущество первого мероприятия – значительное сокращение времени и затрат на поставку благодаря близкому расположению поставщика.

При возникновении сомнений со стороны потенциальных поставщиков по поводу возможностей предоставления скидки (СОАО «БелНордСтайл») необходимо обратить внимание на платежеспособность ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» и надежность данного предприятия, обусловленную своевременными оплатами поставок материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анасович, В. Д. Логистика в оптимизации снабженческо-сбытовой деятельности промышленного предприятия на примере ОАО «Гомельская мебельная фабрика «Прогресс» / В. Д. Анасович // Сб. студ. науч. работ. – Гомель, 2018. – Вып. 23. – С. 207–212.
2. Аникин, Б. А. Коммерческая логистика : учебник / Б. А. Аникин, А. П. Тяпухин. – Москва : Проспект, 2015. – 432 с.

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

3. Бервинова, Н. Взаимосвязь логистики снабжения с логистикой производства / Н. Бервинова // Экономика и социум: проблемы и перспективы взаимодействия : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Саратов, 28 февр. 2013 г.). – Саратов, 2013. – С. 25–27.
4. Владимирова, А. С. Логистика, виды логистики и глобальные системы / А. С. Владимирова, Ю. И. Василюк // Актуальные вопросы экономических наук. – 2016. – № 51. – С. 108–112.
5. Ибрагимова, К. Р. Управление транспортной и складской логистикой на предприятии «ТЕХНОХИМ» / К. Р. Ибрагимова // Стратегические ориентиры развития экономических систем в современных условиях : межвуз. сб. ст. / под общ. ред. Н. А. Дубровиной. – Самара, 2016. – Вып. 4. – С. 67–70.
6. Коршунов, В. А. Производственная логистика в контексте общей логистики / В. А. Коршунов // Вестник образовательного консорциума Среднерусский университет. Серия: Экономика и управление. – 2014. – № 4. – С. 86–90.
7. Левин, Б. Институт логистики и цепей поставок (или логистики и систем поставок) / Б. Левин, Л. Миротин // Логистика. – 2016. – № 12 (121). – С. 51–54.
8. Неруш, А. Ю. Логистика : учебник / А. Ю. Неруш, Ю. М. Неруш. – Москва : Юрайт, 2015. – 560 с.
9. Сомов, Д. В. Управление закупочной логистикой, актуальность применения методов закупочной логистики в фармацевтике / Д. В. Сомов, К. И. Серков // Новая наука: От идеи к результату. – 2017. – № 1-1. – С. 144–148.
10. Титова, Е. Н. Управление логистикой в деятельности современных организаций / Е. Н. Титова // Журнал исследований по управлению. – 2016. – Т. 2, № 5. – С. 1.
11. Hout, J. W. Analyzing thresholds and efficiency with hierarchical Bayesian logistic regression / Joseph W. Hout, Jennifer L. Bittner // Vision Research. – Vol. 148. – P. 49–58. doi: 10.1016/j.visres.2018.04.004
12. Straka, M. The position of distribution logistics in the logistic system of an enterprise / Martin Straka // Acta logistica. – Vol. 4. – Iss. 2. – P. 23–26. doi: 10.22306/al.v4i2.5
13. Suthaharan, S. Characterization of differentially private logistic regression / Shan Suthaharan // ACMSE 2018: Proceedings of the Conference (Richmond, Kentucky, March 29–31, 2018). – Richmond, 2018. doi: 10.1145/3190645.3190682

О. А. ХОДОСКИНА^{1*}, В. Д. АНАСОВИЧ^{2*}

^{1*}Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 730 35 91, ел. пошта for_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638

^{2*}Каф. «Економіка транспорту», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 931 88 07, ел. пошта 3_steamakk_3@mail.ru, ORCID 0000-0002-9902-332X

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОСТАЧАЛЬНО-ЗБУТОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРИНЦИПІВ

Мета. Постачання становить дуже важливу сферу діяльності промислового підприємства. Тому метою цієї роботи є докладне вивчення й аналіз можливих шляхів удосконалення постачальної діяльності. **Методика.** У процесі дослідження використані методи порівняння, наукового пошуку, аналізу і синтезу для вивчення постачально-збутової діяльності промислового підприємства. **Результати.** У статті розглянуті основні логістичні принципи та сфера їх застосування на прикладі постачальної діяльності промислового підприємства з виробництва м'яких меблів. Проведена оцінка декількох потенційних постачальників матеріальних ресурсів і впровадження методики обґрунтування оптимального вибору постачальника. Як об'єкт розгляду вибрано промислове підприємство, основним видом діяльності якого є виробництво м'яких меблів. Розглянуто деякі з його основних постачальників за схожими видами продукції – паперу перфорованого. Проведена їх порівняльна оцінка за основними впливовими параметрами – розташування, якість та асортимент пропонованих матеріальних ресурсів. При цьому використаний метод експертних оцінок. За допомогою методики обґрунтування оптимального вибору постачальника, із урахуванням основних принципів логістики з пропонованих варіантів за результатами виконаних розрахунків визначено оптимальний варіант поставки матеріалів для здійснення виробництва і вибраний постачальник, робота з яким найбільш вигідна

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

для розглянутого підприємства. Також розглянуті варіанти надання знижки постійному постачальнику і вплив її на зниження витрат. **Наукова новизна.** На підставі вивчення методичних джерел і наукових розробок у галузі постачальної логістики запропоновано шляхи оптимізації постачально-збутової діяльності конкретного підприємства. **Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути використані для оцінки кількох потенційних постачальників матеріальних ресурсів конкретного підприємства й обґрунтування оптимального вибору найкращого з них із урахуванням логістичних принципів. Це дозволить зменшити витрати підприємства, пов'язані з організацією поставок необхідних для виробництва матеріальних ресурсів. Також це відкриває для підприємства шляхи підвищення загальної ефективності його діяльності за рахунок оптимізації роботи з постачальниками.

Ключові слова: збут; постачання; логістичні принципи; постачальники; логістичне моделювання збуту

О. А. HODOSKINA^{1*}, V. D. ANASOVICH^{2*}

^{1*}Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirov 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (529) 730 35 91, e-mail for_diplomnic@mail.ru, ORCID 0000-0003-2254-9638

^{2*}Dep. «Economy of Transport», Belarusian State University of Transport, Kirov St., 34, Republic of Belarus, Gomel, 246653, tel. +37 (529) 931 88 07, e-mail, 3_steamakk_3@mail.ru, ORCID 0000-0002-9902-332X

OPTIMIZATION OF SUPPLY AND SALES ACTIVITIES OF THE ENTERPRISE THROUGH THE APPLICATION OF LOGISTIC PRINCIPLES

Purpose. Procurement is a very important field of activity for an industrial enterprise. Therefore, the purpose of this paper is to study it in detail and analyze possible ways to improve supply activities. **Methodology.** In the process of research, methods of comparison, scientific search, analysis and synthesis were used to study the supply and sales activities of an industrial enterprise. **Findings.** The article discusses the main logistic principles and the scope of their application on the example of the supply activities of an industrial enterprise for the production of upholstered furniture. For this purpose, several potential suppliers of material resources were assessed and a methodology for justifying the optimal choice of supplier was introduced. An industrial enterprise whose main activity is the production of upholstered furniture has been chosen as an object of consideration. Some of its main suppliers for similar types of products - perforated paper are considered. A comparative assessment of them was made according to the main influencing parameters - location, quality and assortment of the proposed material resources. In this case, the method of expert evaluation was used. Using the method of substantiating the optimal choice of supplier based on the basic principles of logistics from the proposed options, based on the results of the calculations, an optimal variant of the supply of materials for production is selected and the supplier is selected, the work with which is most beneficial for the enterprise in question. Options for obtaining discounts from a regular supplier and its impact on cost reduction were also considered. **Originality.** Based on the study of methodological sources and scientific developments in the field of logistics, the ways of optimizing the supply and marketing activities of the particular enterprise have been proposed. **Practical value.** Results of the study can be used for the evaluation of several potential suppliers of material resources for a particular enterprise and justification of the optimal choice of the best of them based on the use of logistic principles. This will reduce the cost of the enterprise associated with the organization of supplies necessary for the production of material resources. This opens up ways for an enterprise to increase its overall efficiency by optimizing work with suppliers.

Key words: sales; supply; logistic principles; suppliers; logistic modeling of sales

REFERENCES

1. Anasovich, V. D. (2018). Logistika v optimizatsii snabzhenchesko-sbytovoy deyatel'nosti promyshlennogo predpriyatiya na primere OAO «Gomelskaya mebel'naya fabrika «Progress». *Sbornik studenteskikh nauchnykh rabot*, 23, 207-212. (in Russian)
2. Anikin, B. A., & Tyapukhin, A. P. (2015). *Kommercheskaya logistika: uchebnik*. Moscow: Prospekt. (in Russian)

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

3. Bervinova, N. (2013). Vzaimosvyaz logistiki snabzheniya s logistikoy proizvodstva. *Ekonomika i sotsium: problemy i perspektivy vzaimodeystviya : materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Saratov, 28 fevr. 2013 g.)*, 25-27. (in Russian)
4. Vladimirova, A. S., Vasilyuk, Y. I. (2016). Logistika, vidy logistiki i globalnye sistemy. *Aktualnye voprosy ekonomicheskikh nauk*, 51, 108-112. (in Russian)
5. Ibragimova, K. R. (2016). Upravlenie transportnoy i skladskoy logistikoy na predpriyatii «TYeKhNOKhIM». *Strategicheskie orientiry razvitiya ekonomicheskikh sistem v sovremennykh usloviyakh*, 4, 67-70. (in Russian)
6. Korshunov, V. A. (2014). Proizvodstvennaya logistika v kontekste obshchey logistiki. *Vestnik obrazovatel'nogo konsortsiума Srednerusskiy universitet. Seriya: Ekonomika i upravlenie*, 4, 86-90. (in Russian)
7. Levin, B., & Mirotin, L. (2016). Institute of Logistics and Supply Chains (or Logistics and Supply Chains). *Logistika*, 12(121), 51-54. (in Russian)
8. Nerush, A. Y., & Nerush, Y. M. (2015). *Logistika: uchebnik*. Moscow: Yurayt. (in Russian)
9. Somov, D. V., & Serkov, K. I. (2017). Upravlenie zakupochnoy logistikoy, aktualnost primeneniya metodov zakupochnoy logistiki v farmatsevtike. *Novaya nauka: Ot idei k rezultatu*, 1-1, 144-148. (in Russian)
10. Titova, Y. N. (2016). Upravlenie logistikoy v deyatel'nosti sovremennykh organizatsiy. *Zhurnal issledovaniy po upravleniyu*, 2(5), 1.
11. Houpt, J. W., & Bittner, J. L. (2018). Analyzing thresholds and efficiency with hierarchical Bayesian logistic regression. *Vision Research*, 148, 49-58. doi: 10.1016/j.visres.2018.04.004 (in English)
12. Straka, M. (2017). The position of distribution logistics in the logistic system of an enterprise. *Acta logistica*, 4, 23-26. doi: 10.22306/al.v4i2.5 (in English)
13. Suthaharan, S. (2018). Characterization of differentially private logistic regression. *Proceedings of the ACMSE 2018 Conference on ACMSE'18*. doi: 10.1145/3190645.3190682 (in English)

Поступила в редколлегию: 08.08.2018

Принята к печати: 30.11.2018

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 629.42.083-047.58

B. E. BODNAR¹, O. B. OCHKASOV^{2*}, T. S. HRYSHCHKINA⁴, E. B. BODNAR³¹Dep. «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 0000-0002-7719-7214³Dep. «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 0000-0003-1570-4150⁴Dep. «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

CHOOSING THE SYSTEM OF LOCOMOTIVE MAINTENANCE IN VIEW OF THE EFFECT OF DEPENDENT FAILURES

Purpose. Improving the efficiency of the use of locomotives by choosing a rational maintenance system that takes into account the assessment of the effect of dependent failures on the cost of their life cycle is the main purpose of this paper. **Methodology.** The relevance of introducing LCC (Life Cycle Cost) approaches in locomotive facilities is explained by the introduction of new locomotives with on-board control and diagnostic systems, as well as the development of the theory of traction rolling stock maintenance systems. The cost of a locomotive as a traction unit ceases to be the determining factor. This is because the locomotive maintenance and repair cost for the entire period of its operation is much higher than the initial cost of the locomotive. The paper analyses the existing approaches to managing the cost of the life cycle of locomotives at the stages of selecting, updating, upgrading and operating the traction rolling stock. The necessity of improving the methods for assessing the degree of influence of reliability indicators of locomotive assemblies on the choice of the maintenance system and the cost of the locomotive life cycle is substantiated. **Findings.** It is proposed to use the concept of «the effect of dependent failures» when calculating the cost of locomotive renewal after unscheduled repairs and its life cycle cost. We improved the methods for determining the cost of unscheduled repairs, taking into account dependent failures and the coefficient of assessment of the effect of dependent node failure on the locomotive maintenance system. The proposed coefficient will determine the nodes, the failure of which affects the renewal cost more than their nominal value. It will also help to take into account the probable losses due to node failure during the development and adjustment of the locomotive maintenance system. **Originality.** For the first time, it is proposed to use the concept of the effect of dependent failures to calculate the locomotive renewal cost when performing unscheduled repairs, as well as the locomotive life cycle cost. **Practical value.** The improved calculation method for determining the cost of unplanned repairs with account taken of dependent failures can be used to compare and evaluate different variants of the locomotive maintenance system and to develop the locomotive diagnostic systems.

Key words: life cycle cost; maintenance system; locomotive; dependent failures; renewal costs; unscheduled maintenance

Introduction

The task of minimizing total costs at all stages of the lifecycle of vehicles, improving the reliability and safety of equipment is common to both locomotive developers and operating transport com-

panies. For the rail industry, minimizing such costs increases the competitiveness of products and, consequently, stimulates the expansion of the market and increase in profits. For operating companies, thus, the economic efficiency of using rolling stock rises [10].

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

When substantiating the choice of the most advantageous offer for the supply of traction rolling stock, transport companies, along with comparison of technical characteristics, are increasingly using the LCC (Life Cycle Cost) indicator. Величина капітальних затрат на придбання нового тягового рухомого складу поступово починає замінюватись величиною витрат на всіх етапах життєвого циклу локомотива. The amount of capital costs for the acquisition of a new traction rolling stock gradually begins to be replaced by the cost of all stages of the locomotive life cycle [14, 17, 18].

Actuality of LCC approaches in locomotive services is explained by the introduction of new locomotives with onboard control and diagnostic systems, as well as the development of the theory of traction rolling stock maintenance systems. The cost of a locomotive as a traction unit ceases to be the determining factor. This is due to the fact that maintenance and repair costs for the entire life cycle of a locomotive considerably exceed its initial cost.

The works [3, 5, 9, 11–13, 15, 16, 21] are devoted to the introduction of LCC approaches at the stages of selecting, updating, modernizing and operating the traction rolling stock. Despite a significant number of research results on the use of LCC indicators, the issue of assessing the degree of influence of reliability indicators of locomotive assemblies on the choice of the maintenance system and the cost of the locomotive life cycle remains unsolved.

Purpose

The main purpose of the work is to increase the efficiency of the use of locomotives by choosing a rational maintenance system that takes into account the assessment of the effect of dependent failures on the cost of their life cycle. To achieve this purpose, it is necessary to analyze the existing approaches for managing the locomotive life cycle cost, as well as to develop a method for assessing the degree of influence of reliability indicators of

locomotive nodes on the choice of the maintenance system and the cost of the locomotive life cycle.

Methodology

The most commonly used approach in developing life-cycle cost management systems is the RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety).

Let us consider its embodiment in the railway standards of Europe, Russia and Ukraine.

The main characteristics, definitions and terms relating to RAMS and LCC of rail transport facilities are given in European Standard NF EN 50126-1-2000 [20]. An example of the practical use of the RAMS approach for assessing the safety status of locomotive facilities using an integral indicator is described in [19].

The basic provisions of the RAMS can be used to assess the locomotive operation and maintenance system in terms of reliability, availability, maintainability and safety during their interaction. The proposed approach defines the process based on the life cycle of the whole system, and the tasks in it; allows to effectively monitor and control the interaction between the elements.

Standard EN 50126 [20] presents the system (locomotive) life cycle that is a sequence of phases, each of which solves the corresponding tasks, which cover the entire system service life from the original concept to decommissioning.

The life cycle provides a framework for planning, managing, controlling and monitoring all aspects of the system, including RAMS. Fig. 1 shows the life cycle stages according to this standard.

At each stage of the life cycle, there are certain, related to this stage, tasks: general, tasks of reliability, performance, repairability, as well as also safety-related tasks.

The issues concerning calculations of the system life cycle cost are considered in the second stage, while forming the profile of the system purpose.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

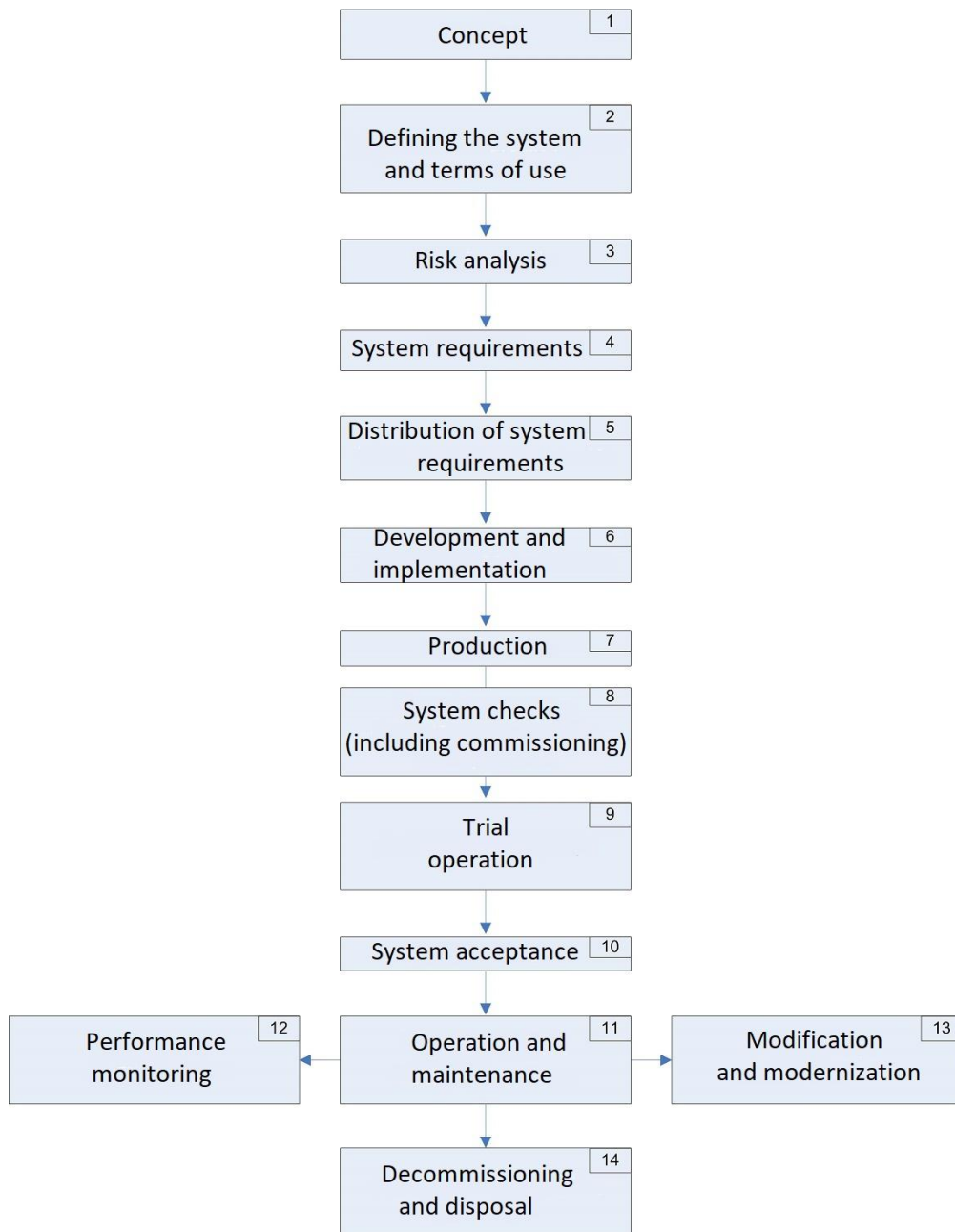


Fig. 1. Life cycle phases of the locomotive

The scheme of the system life cycle costs according to EN 50126 [8, 20] is shown in Fig. 2

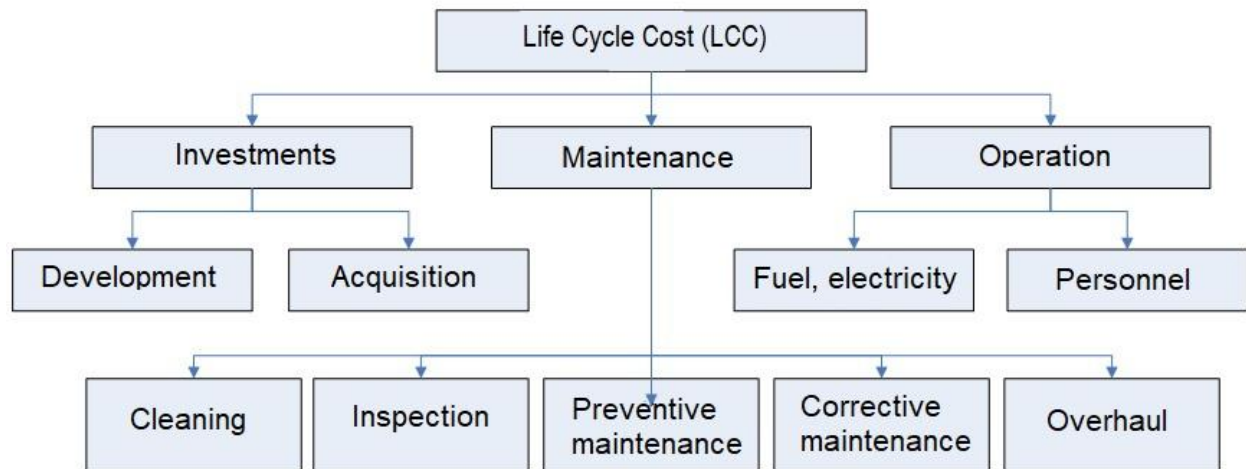


Fig. 2. Scheme of locomotive life cycle costs

The costs incurred during the design phase of the system, as well as those planned during the formation of the requirements for operation and maintenance, constitute a significant part of the locomotive life cycle cost.

It is impossible to determine the exact costs for the entire life cycle. They can be evaluated only with different degree of confidence.

Initial data for the analysis and calculation of the life cycle cost of the traction rolling stock are:

1. During the reliability, availability, maintainability and safety analysis (RAMS analysis):

- Service life;
- Average annual mileage of the locomotive;
- Average time of locomotive operation per year;
- Other quantitative and qualitative indicators of the use of locomotives.

2. When determining the life cycle cost (LCC analysis):

- Specifications / technical manuals from the component or subsystem provider (for example, FIT rate, MTBF rate)
- Identification, collection and use of statistical data (for example, failure rates, repair costs, part

replacement statistics, part wear dynamics, etc.);

- Models for forecasting changes in the technical condition of the locomotive and its subsystems;

Databases and statistical reports on the reliability and operation of locomotives.

The [20] presents two methods for calculation of costs for the life cycle components:

- Calculation of costs for preventive maintenance (analogue of planned preventive repair system);

- Calculation of costs for corrective maintenance (after failures) (analogue of the current state maintenance system).

Let us consider these methods in more detail.

Calculation of costs for preventive maintenance. Preventive maintenance, in accordance with European Standard EN 13306 (2001) [8], is maintenance performed at specified intervals or according to the proposed criteria. It is intended to reduce the likelihood of a failure or deterioration of the functioning of the technical unit.

Calculation of costs CY_MP for preventive maintenance during a life cycle is carried out by the formula:

$$CY_MP = \sum_{i=1}^X N_MP_i \times QT_i \times (CM_MP_i + MH_MP_i \times CMH)$$

where X – total number of elementary technological operations; N_MP_i – number of i -th elementary technological operations, which must be performed throughout the life cycle; QT_i – total number of elements requiring the use of the i -th elementary

technological operation; CM_MP_i – average cost of materials to be used during the use of the i -th elementary technological operation; MH_MP_i – number of working hours required for the imple-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

mentation of the i -th elementary technological operation; CMH – cost of 1 working hour.

This method does not take into account the following time expenditures:

- for organizational, administrative and logistic processes;
- for purchase / delivery of consumables;
- for emptying of wastewater reservoirs;
- in anticipation of service;
- for utilization duration;

– for external and internal cleaning of the vehicle.

Calculation of costs for corrective maintenance. Corrective (unscheduled) service according to [20] is the maintenance performed after the fault recognition. It is designed to restore a locomotive to a technical state in which it can perform the necessary functions.

Calculation of costs for corrective maintenance CY_MC during the life cycle is performed according to the formula:

$$QT = IN_FAI_i \times OT$$

$$CY_MP = \sum_{i=1}^X N_MC_i \times QT_i \times (CM_MC_i + MH_MC_i \times CMH),$$

where QT – number of elements to be restored for the entire life cycle; IN_FAI_i – failure rate of the i -th element; OT – operating time or run-time (depends on failure rate); N_MC_i – number of i -th elementary technological operations to be performed throughout the life cycle; QT_i – number of elements that require the use of the i -th elementary technological operation for renewal; CM_MC_i – average cost of materials for the implementation of the i -th elementary technological operation; MH_MC_i – number of working hours for the implementation of the i -th elementary technological operation; CMH – cost of a working hour.

Basic rules for determining the cost of life cycle of rolling stock and complex technical systems of rail transport on the Russian railways are given in [11]. This method contains the main provisions and formulas for calculating such indicators of the efficiency of rolling stock and complex technical systems of rail transport, as the life cycle cost, the useful economic effect and the limit price of machinery.

The life cycle cost indicator is used in this methodology to evaluate the effectiveness of innovative measures, including those at rail transport.

The term «Life cycle cost» (LCC) of the technical equipment in [11] is defined as the total consumer's cost for the purchase and use of the equipment for the duration of its service.

The life cycle costs of the technical equipment include all consumer costs associated with its acquisition and possession, that is, the purchase price, the associated one-time costs, as well as the

operating costs for the entire life and the costs of disposal.

The [11] proposes to limit the number of life cycle stages of technical equipment by the following stages:

- 1) Development of concepts and definitions;
- 2) Research and development works;
- 3) Manufacturing of technical means;
- 4) Putting technical equipment into operation with accompanying measures to train the personnel, upgrade the repair base, etc.;
- 5) Operation and maintenance;
- 6) Retirement (liquidation, disposal).

The general LCC of a product (of all its six stages) is divided into two main parts:

- 1) Costs associated with the acquisition (stages 1-4);

- Costs related to operation and disposal (stages 5-6).

Initial LCC analysis is carried out at the acquisition stage – comparisons are made with analogues. Then, during the exploitation phase, the monitoring of economic indicators is carried out in order to confirm the initial life cycle costing.

LCC of rolling stock and complex technical systems of rail transport is defined in [11] by the formula:

$$LCC = P_{acq} + \sum_{t=1}^T (O_t + \Delta K_t - D_t) \cdot \alpha_t$$

where P_{acq} – object acquisition price (initial value). At the stage of new locomotive concept development and R&D works (1-2 stages of the life cycle)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

the equipment acquisition price can be presented as its limit price; O_t – annual operating costs; ΔK_t – accompanying one-time costs associated with putting of machinery into operation; D_t – disposal value of the object; α_t – discount coefficient; t – current year of operation; T – final year of operation, established in accordance with the technical requirements or other documentation (including the accounting policy of the enterprise on whose balance the object is located).

The discount coefficient for the constant discount rate is determined by the expression:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^t}$$

$$LCC_i = \sum_{t=t_{ai}}^{t_{ki}} (m_{i_t} \cdot P_{i_t}^a \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{ai}}^{t_{ki}} (K_{i_t}^{cyn} \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{ai}}^{t_{ki}} (m_{i_t} \cdot P_{i_t}^{OV} \cdot \alpha_t) + \\ + \sum_{t=t_{di}}^{t_{ki}} (m_{i_t} \cdot P_{i_t}^M \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{nai}}^{t_{ki}} (m_{i_t} \cdot O_{i_t} \cdot \alpha_t) - \sum_{t=t_{nai}}^{t_{ki}} (m_{i_t} \cdot D_{i_t} \cdot \alpha_t),$$

where i – investment variant number; m_{i_t} – number of traction rolling stock units by the i -th investment variant purchased in year t of the lifecycle; $P_{i_t}^a$ – price of acquisition of the traction rolling stock unit by the i -th investment variant in year t of the life cycle, UAH; $K_{i_t}^{ass}$ – one-time associated costs during implementation of the rolling stock by the i -th investment variant in year t of the life cycle, UAH; $P_{i_t}^{OV}$ – price of overhaul of the traction rolling stock unit by the i -th investment variant in year t of the life cycle, UAH; $P_{i_t}^M$ – price of modernization of the traction rolling stock unit by the i -th investment variant in year t of the life cycle, UAH; O_{i_t} – current expenses for operation and maintenance in a technically sound condition of the rolling stock by the i -th investment variant in year t of the life cycle, UAH; D_{i_t} – disposal value of the traction rolling stock unit by the i -th investment variant in year t of the life cycle, UAH; α_t – discount factor; t_{ai} – year of acquisition of the traction rolling stock by the i -th investment va-

where t – step of the calculation period ($t = 0, 1, 2, \dots, T$); T – time horizon (life cycle duration); E – discount rate.

In [13] it was noted that despite the significant number of research results regarding the use of the LCC economic indicator as one of the main criteria for evaluating and approving investment decisions in the long run, the issue of adaptation of this indicator to the operational features of Ukrainian railways needs further development. The paper proposes to calculate the rolling stock life cycle cost for alternate investment variants in its renewal as follows:

riant; t_{di} – year of disposal of the rolling stock by the i -th investment variant.

Findings

The conducted analysis of the life cycle costing approaches allows us to conclude that none of the considered methods takes into account the effect of failure of one node on the failure of other connected nodes (dependent failures of system elements) of the locomotive. According to researches [4, 6], quite a significant part of failures (and, as a consequence, of unscheduled repairs) occurs due to the dependent failures of elements. Thus, when calculating LCC and costs for all types of maintenance, it is necessary to take into account the effect of dependent locomotive failures.

One of the LCC components is the locomotive maintenance cost. The amount of these costs depends on the reliability indicators and the accepted technical maintenance system. Methods for assessing the economic efficiency of a locomotive maintenance system are given in [2, 3, 7]. In order to improve the methodology for calculating the locomotive maintenance system cost, the authors

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

suggest taking into account the dependent failures of nodes.

According to [3], the cost of unscheduled repairs in a rational system without taking into account dependent failures can be defined as follows:

$$C = C_{\text{unsch}} \cdot H_p$$

where C_{unsch} – average cost of unscheduled repair of the locomotive node; H_p – average number of failures during an hour of the locomotive life cycle.

The average cost of one unscheduled repair C_{unsch} is determined by the expression:

$$C_{\text{unsch}} = C_{\text{sch}} + C_{\text{lh}}(t_{\text{tr}} + t_{\text{dt}}),$$

where C_{sch} – cost of one scheduled repair; C_{lh} – cost of one locomotive-hour; t_{tr} – time of locomotive transportation to the place of repair; t_{dt} – locomotive repair downtime.

In order to calculate the renewal costs during unscheduled repairs, it is necessary to take into account dependent failures of the elements. To cal-

culate the life cycle cost of a locomotive with account taken of the dependent failures of its elements, it is necessary to determine the probabilistic dependencies between the failures of its main nodes, that is, with what probability the failure of each node will affect the failure of other locomotive nodes.

The average cost of one unscheduled repair C_3 , taking into account the dependent failures, is determined by the expression:

$$C_3 = C_{\text{sch}} + \sum_{i \in V} p_i C_{\text{sch}}^i + C_{\text{lh}}(t_{\text{tr}} + t_{\text{dt}})$$

where C_{sch}^i – cost of one scheduled repair of the i -th dependent element; p_i – probability of dependent failure of the i -th element; V – set of dependent elements.

Calculation of the probability of dependent failures can be performed using expert research methods [1], methods of fuzzy logic and neural networks [22]. In general, the probability of occurrence of dependent failures is presented in the Table 1.

Table 1

Probabilities of occurrence of dependent failures

Locomotive equipment	Node 1	Node 2	...	Node i	...	Node N
Node 1		p_{12}		p_{1i}		p_{1N}
Node 2	p_{21}			p_{2i}		p_{2N}
...						
Node i	p_{i1}	p_{i2}				p_{iN}
...						
Node N	p_{N1}	p_{N2}		p_{Ni}		

Table 1 in the columns indicates the names of nodes with primary failures, and in rows – the names of nodes with dependent failures. The elements of this matrix (tables) are filled by experts, which indicate the probability of dependent failures for each node of the locomotive.

For example: p_{12} is the probability that a dependent failure of Node 1 will occur in the event of Node 2 failure. In general:

p_{iN} – probability that a dependent failure of the Node i will occur in the event of the Node N failure.

It is obvious that the probabilities of the type are always equal to one.

To estimate the influence of dependent failures on the locomotive maintenance system and life cycle cost, we propose to use a coefficient P_{df} .

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

This indicator of the dependent failure effect on the after-failure renewal cost is calculated as follows:

$$P_{df} = \frac{C_3}{C_{unsch}} \cdot 100\%$$

Calculation of the coefficient P_{df} for each node of the locomotive can be performed according to the Table 2.

Table 2

Assessment of the effect of dependent failures on the maintenance system

Node group	Node name	Cost of scheduled node repair	Cost of unscheduled node repair	Cost of unscheduled node repair with account of dependent failures	Assessment of the effect of dependent failures
	Node 1	C_{sch}	C_{unsch}	C_3	P_{df}
	Node 2				
	...				
	Node i				

Originality and practical value

For the first time, it is proposed to use the concept of the effect of dependent failures to calculate the locomotive renewal cost when performing unscheduled repairs, as well as the locomotive life cycle cost.

The method of determining the unscheduled repair costs with consideration of dependent failures was improved in the work; and the coefficient of assessing the effect of node dependent failure on the locomotive maintenance system was introduced.

The calculation method can be used to compare and evaluate variants of the locomotive maintenance system and to develop systems for their diagnosis.

Conclusions

The work analyzed the existing approaches to the management of the life cycle cost of locomotives at the stages of their selection, renewal, modernization and operation.

We substantiated the necessity of improving the methods for assessing the degree of effect of reliability indicators of locomotive units on the choice of the maintenance system and its life cycle cost.

We conducted the analysis of modern approaches to managing the locomotive maintenance system.

It is proposed to use the concept of «effect of dependent failures» when calculating the locomotive renewal cost after unscheduled repairs and the locomotive life cycle cost.

The proposed coefficient of the effect of the node dependent failure on the locomotive maintenance system will allow determining the nodes, the failure of which affects the renewal cost more than their nominal value. Also, this coefficient will help to take into account probable losses due to node failure during the development and adjustment of the locomotive maintenance system.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Боднар, Б. Е. Использование метода экспертных оценок при разработке диагностического обеспечения локомотивов / Б. Е. Боднар, А. Б. Очкасов // Проблемы создания новых машин и технологий. – 2001. – № 1 (10). – С. 217–220.
2. Боднар, Є. Б. Оцінка економічної ефективності впровадження раціональної системи ремонту локомотивів / Є. Б. Боднар, О. Б. Очкасов, А. П. Шепотенко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2004. – № 8 (78). – С. 25–28
3. Боднар, Є. Б. Підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом впровадження раціональної системи утримання : дис ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Боднар Євген Борисович ; Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2004. – 161 с.
4. Босов, А. А. Влияние зависимых отказов на безопасность технических систем: анализ транспортных происшествий с 2005 по 2008 гг. / А. А. Босов, Т. С. Гришечкина, Л. Н. Савченко // Локомотив-информ. – 2010. – № 1. – С. 5–9.
5. Гненний, О. М. До питання оцінки та застосування вартості життєвого циклу продукції машинобудування / О. М. Гненний, А. Мохаммадреза // Проблеми економіки транспорту : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 12. – С. 7–13. doi: 10.15802/pte.v0i12.95609
6. Гришечкина, Т. С. Моделирование зависимых отказов элементов сложных технических систем / Т. С. Гришечкина // Тр. Рост. гос. ун-та путей сообщения. – 2015. – № 3. – С. 50–56.
7. 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. – Дніпро, 2017. – Вип. 14. – С. 30–35.
8. ДСТУ EN 13306:2006 (EN 13306:2001, IDT). Технічне обслуговування. Терміни та визначення понять [Electronic resource]. – Available at: <http://clc.am/v7MFBA> – Title from the screen. – Accessed : 03.12.2018.
9. Калабухін, Ю. Є. Концепція життєвого циклу в теоретичному підході до вибору варіанту інвестицій в оновлення парка тягового рухомого складу / Ю. Є. Калабухін, Н. М. Каменева, Д. Д. Зленко // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2018. – № 62. – С. 241–248. doi: 10.18664/338.47:338.45.v0i62.133671
10. Кострикин, К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава [Electronic resource] / К. Кострикин, И. Скок // Ин-т проблем естеств. монополий (ИПЕМ). – Available at: <http://ipem.ru/news/publications/487.html> – Title from the screen. – Accessed : 03.12.2018.
11. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения) [Electronic resource] : утв. распоряжением ОАО РЖД от 27.12.2007 г. № 2459 р. – Available at: <http://clc.am/Ccwfqg> – Title from the screen. – Accessed : 03.12.2018.
12. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог : монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин, А. П. Фалендыш. – Луганск : Ноулидж, 2011. – 174 с.
13. Обновление подвижного состава с учетом жизненного цикла / Н. И. Данько, Д. В. Ломотько, Э. Д. Тартаковский, А. П. Фалендыш, Ю. Е. Калабухин // Ж.-д. трансп. – 2011. – № 12. – С. 42–44.
14. Осяев, А. Т. О системе обслуживания локомотивов за рубежом / А. Т. Осяев, В. А. Никифоров // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 2. – С. 56–62.
15. Оценка жизненного цикла / Э. Д. Тартаковский, А. П. Фалендыш, Ю. Е. Калабухин, С. Г. Грищенко // Локомотив-информ. – 2013. – № 2 (80). – С. 56–60.
16. Проблемы обновления подвижного состава железных дорог Украины и пути их решения с учетом жизненного цикла / Н. И. Данько, Э. Д. Тартаковский, Д. В. Ломотько, А. П. Фалендыш // Залізн. трансп. України. – 2011. – № 3. – С. 22–25.
17. Чигирик, Н. Д. Досвід технічної експлуатації тягового рухомого складу на залізницях країн Європи / Н. Д. Чигирик, А. Л. Сумцов, Ю. В. Білецький // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2015. – № 1 (218). – С. 29–32.
18. A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems / B. Egamberdiev, K. Lee, J. Lee, S. Burnashev // International Journal of Railway. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 10–14. doi: 10.7782/ijr.2016.9.1.010

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

19. Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock / B. Bodnar, Y. Bolzhearskiy, O. Ochkasov, T. Hryshechka, L. Černiauskaitė // Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : the 12th Intern. Sci. Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys) / Kaunas University of Technology. – Panevėžys, 2018. – P. 45–54.
20. EN 50126. Railway application – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Basic requirements and generic process [Electronic resource]. – Available at: <http://clc.am/qvkB4g> – Title from the screen. – Accessed: 06.12.2018.
21. Kapitsa, M. I. Efficiency of modernization of wheel-motor blocks (wmb) using anti-friction traction motor support bearings (tmsb) / M. I. Kapitsa, O. M. Hnennyi, D. V. Bobyr // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 4 (76). – С. 111–124. doi: 10.15802/stp2018/141178
22. 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.

Б. Є. БОДНАР¹, О. Б. ОЧКАСОВ^{2*}, Т. С. ГРИШЕЧКІНА³, Є. Б. БОДНАР⁴

¹Каф. «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.dit.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

³Каф. «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 36 26 04, ел. пошта grishechka.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

⁴Каф. «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

ВИБІР СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗАЛЕЖНИХ ВІДМОВ

Мета. Основною метою роботи є підвищення ефективності використання локомотивів за рахунок вибору раціональної системи утримання, яка враховує оцінку впливу залежних відмов на вартість їх життєвого циклу. **Методика.** Актуальність застосування підходів LCC (Life Cycle Cost) в локомотивному господарстві пояснюється впровадженням нових локомотивів із бортовими системами управління й діагностування, а також розвитком теорії систем утримання тягового рухомого складу. Вартість локомотива як тягової одиниці перестає бути визначальним фактором. Це пояснюється тим, що витрати на технічне обслуговування та ремонт локомотива за весь період експлуатації значно перевищують його початкову вартість. У роботі проаналізовано наявні підходи управління вартістю життєвого циклу локомотивів на етапах їх вибору, оновлення, модернізації й експлуатації. Обґрунтовано необхідність удосконалення методів оцінки ступеня впливу показників надійності вузлів локомотива на вибір системи утримання й вартість його життєвого циклу. **Результати.** Запропоновано використовувати поняття «вплив залежних відмов» під час розрахунку вартості відновлення локомотива після позапланових ремонтів і вартості його життєвого циклу. Удосконалено методику визначення вартості позапланового ремонту з урахуванням залежних відмов, уведено коефіцієнт оцінки впливу залежної відмови вузла на систему утримання локомотива. Цей коефіцієнт дозволить визначати вузли, відмова яких впливає на вартість відновлення більше, ніж номінальна їх вартість. Також запропонований коефіцієнт допоможе враховувати ймовірні втрати внаслідок відмови вузла під час розробки й коригування системи утримання локомотивів. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано використовувати показник впливу залежних відмов для розрахунку вартості відновлення локомотива під час виконання позапланових ремонтів, а також для розрахунку вартості життєвого циклу локомотива. **Практична значимість.** Удосконалена методика визначення вартості позапланового ремонту з урахуванням залежних відмов може бути використана для порівняння й оцінки різних варіантів системи утримання локомотивів і розробки систем їх діагностування.

Ключові слова: вартість життєвого циклу; система утримання; локомотив; залежні відмови; вартість відновлення; позаплановий ремонт

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2018/154823

© Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Т. С. Гришечкіна, Є. Б. Боднар, 2018

Б. Е. БОДНАРЬ¹, А. Б. ОЧКАСОВ^{2*}, Т. С. ГРИШЕЧКИНА³, Е. Б. БОДНАРЬ⁴

¹Каф. «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

³Каф. «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 grishchekina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

⁴Каф. «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

ВЫБОР СИСТЕМЫ СОДЕРЖАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ

Цель. Основной целью работы является повышение эффективности использования локомотивов за счет выбора рациональной системы содержания, учитывающей оценку влияния зависимых отказов на стоимость их жизненного цикла. **Методика.** Актуальность применения подходов LCC (стоимость жизненного цикла) в локомотивном хозяйстве объясняется внедрением новых локомотивов с бортовыми системами управления и диагностики, а также развитием теории систем содержания тягового подвижного состава. Стоимость локомотива как тяговой единицы перестает быть определяющим фактором. Это объясняется тем, что расходы на техническое обслуживание и ремонт локомотива за весь период эксплуатации значительно превышают его первоначальную стоимость. В работе выполнен анализ существующих подходов управления стоимостью жизненного цикла локомотивов на этапах их выбора, обновления, модернизации и эксплуатации. Обоснована необходимость совершенствования методов оценки степени влияния показателей надежности узлов локомотива на выбор системы содержания и стоимость его жизненного цикла. **Результаты.** Предложено использовать понятие «влияние зависимых отказов» при расчете стоимости восстановления локомотива после внеплановых ремонтов и стоимости его жизненного цикла. Усовершенствовано методику определения стоимости внепланового ремонта с учетом зависимых отказов, введен коэффициент оценки влияния зависимого отказа узла на систему содержания локомотива. Этот коэффициент позволит определять узлы, отказ которых влияет на стоимость восстановления больше, чем номинальная их стоимость. Также предложенный коэффициент поможет учитывать вероятные потери вследствие отказа узла при разработке и корректировке системы содержания локомотивов. **Научная новизна.** Впервые предложено использовать показатель влияния зависимых отказов для расчета стоимости восстановления локомотива при выполнении внеплановых ремонтов, а также для расчета стоимости жизненного цикла локомотива. **Практическая значимость.** Усовершенствованная методика определения стоимости внепланового ремонта с учетом зависимых отказов может быть использована для сравнения и оценки различных вариантов системы содержания локомотивов и при разработке систем их диагностирования.

Ключевые слова: стоимость жизненного цикла; система содержания; локомотив; зависимые отказы; стоимость восстановления; внеплановый ремонт

REFERENCES

1. Bodnar, B. Y., & Ochkasov, A. B. (2001). Ispolzovanie metoda ekspertnykh otsenok pri razrabotke diagnosticheskogo obespecheniya lokomotivov. *Problemy sozdaniya novykh mashin i tekhnologiy*, 1(10), 217-220. (in Russian)
2. Bodnar, Y. B., Ochkasov, O. B., & Shepotenko, A. P. (2004). Otsinka ekonomichnoi efektyvnosti vprovadzhennia ratsionalnoi systemy remontu lokomotyviv. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 8(78), 25-28. (in Ukrainian)
3. Bodnar, Y. B. (2004). *Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti lokomotyviv shliakhom vprovadzhennia ratsionalnoi systemy utrymuvannia*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkiv. (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

4. Bosov, A. A., Grishechkina, T. S., & Savchenko, L. N. (2010). Vliyanie zavisimyykh otkazov na bezopasnost tekhnicheskikh sistem: analiz transportnykh proissheshtviy s 2005 po 2008 gg. *Lokomotiv-inform*, 1, 5-9. (in Russian)
5. Hnennyj, O., & Mohammadreza, A. (2016). To the Question of Evaluation and Use of Life Cycle Cost of Engineering Products. *Problemi Ekonomiki Transportu*, 0(12), 7-13. doi: 10.15802/pte.v0i12.95609 (in Ukrainian)
6. Grishechkina, T. S. (2015). Modelirovanie zavisimyykh otkazov elementov slozhnykh tekhnicheskikh sistem. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*, 3, 50-56. (in Russian)
7. Hryshechkina, T. S. (2017). Mathematical Model of the Rational Maintenance System of Railway Transport Technical Objects. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 14, 30-35. (in Ukrainian)
8. Tekhnichne obsluhovuvannya. Terminy ta vyznachennia poniat. DSTU EN 13306:2006 (EN 13306:2001, IDT). Retrieved from <http://clc.am/v7MFBA> (in Ukrainian)
9. Kalabukhin, Y. Y., Kameneva, N. M., & Zlenko, D. D. (2018). Conception of life Cycle in Theoretical Approach to Choice of Variant of Investments in Update of Hauling Mobile Composition. *Visnyk eko-nomiky transportu i promyslovosti*, 62, 241-248. doi: 10.18664/338.47:338.45.v0i62.133671 (in Ukrainian)
10. Kostrikin, K., & Skok, I. *Stoimost zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava*. Retrieved from <http://ipem.ru/news/publications/487.html> (in Russian)
11. *Metodika opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoy tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta (osnovnye polozheniya)*. Retrieved from <http://clc.am/Ccwfgg> (in Russian)
12. Tartakovskiy, E. D., Grishchenko, S. G., Kalabukhin, Y. Y., & Falendysh, A. P. (2011). *Metody otsenki zhiznennogo tsikla tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: monografiya*. Lugansk: Noulidzh. (in Russian)
13. Danko, V. I., Lomotko, D. V., Tartakovskiy, E. D., Falendysh, A. P., & Kalabukhin, Y. Y. (2011). Obnovlenie podvizhnogo sostava s uchetom zhiznennogo tsikla. *Zheleznodorozhnyy transport*, 12, 42-44. (in Russian)
14. Osyayev, A. T., & Nikiforov, V. A. (2012). On locomotive maintenance system abroad. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 2, 56-62. (in Russian)
15. Tartakovskiy, E. D., Falendysh, A. P., Kalabukhin, Y. Y., & Grishchenko, S. G. (2013). Otsenka zhiznennogo tsikla. *Locomotive-Inform*, 2(80), 56-60. (in Russian)
16. Danko, N. I., Tartakovskiy, E. D., Lomotko, D. V., & Falendysh, A. P. (2011). Problemy obnoveniya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog Ukrainy i puti ikh resheniya s uchetom zhiznennogo tsikla. *Zaliznychnyy transport Ukrainy*, 3, 22-25. (in Russian)
17. Chyhyryk, N. D., Sumtsov, A. L., & Biletskyi, Y. V. (2015). Experience of technical manual traction rolling the railways of Europe. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 1(218), 29-32. (in Ukrainian)
18. Egamberdiev, B., Lee, K., Lee, J., & Burnashev, S. (2016). A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems. *International Journal of Railway*, 9(1), 10-14. doi: 10.7782/ijr.2016.9.1.010 (in English)
19. Bodnar, B., Bolzhelarskyi, Y., Ochkasov, O., Hryshechkina, T., & Černiauskaitė, L. (2018). Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock. Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018): The 12th International Scientific Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys). Panevėžys: Kaunas University of Technology. (in English)
20. EN 50126. Railway application – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Basic requirements and generic process. Retrieved from <http://clc.am/qvKB4g> (in English)
21. Kapitsa, M. I., Hnennyi, O. M., & Bobyr, D. V. (2018). Efficiency of modernization of wheel-motor blocks (wmb) using anti-friction traction motor support bearings (tmsb). *Science and Transport Progress*, 4(76), 111-124. doi: 10.15802/stp2018/141178 (in English)
22. 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)

Received: July 17, 2018

Accepted: Nov. 05, 2018

UDC 656.22.05

H. I. NESTERENKO¹, P. V. BECH², M. I. MUZYKIN^{3*}, S. I. AVRAMENKO⁴¹Dep. «Management of Operational Work», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 70, e-mail mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-1629-0201²Dep. «Management of Operational Work», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 225 38 64, e-mail Bekhpit@gmail.com, ORCID 0000-0002-1782-9224^{3*}Dep. «Life Activity Safety», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 251 53 14, e-mail mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-2938-7061⁴Dep. «Life Activity Safety», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 082 88 27, e-mail fufe18791@gmail.com, ORCID 0000-0002-5832-6949**IMPROVEMENT OF SUPERVISORY CONTROL OF TRAIN
MOVEMENT BY MEANS OF INTRODUCTION OF OPERATIONAL
ZONES**

Purpose. The work is aimed to investigate the feasibility of transferring automatic control to low-density stations of the sections (according to the principle of supervisory control of trainline) to the operators at principal stations. **Methodology.** The article analyzes the work of heavy traffic sections of the Ukrainian Railways JSC. It was found out that the information workload of dispatchers who control the train movement at the sections of the main course, constantly exceeds the permissible level. The possibility of using the technology of supervisory control of train movement by the introduction of operational zones has been investigated. **Findings.** The authors found out that the capacity of receiving and departure tracks at the stations of the sections is extremely limited. The occupancy of run-around tracks by the out-of-work trains hinders any regulatory measures at the sections. Trains pass one after another without giving priority, that is, they pass through the section in the order in which they entered it. Due to the limited number of tracks at the pre-section intermediate station, freight trains are placed for run-around by the passenger ones at the distant approaches. This leads to a loss of service speed and reduces the level of utilization of the sections' working capacity. The introduction of operational zones will significantly reduce information flows and facilitate the work of the train dispatchers, create the necessary conditions for creative decision-making on the inter-sectional regulation, and will contribute to increase in the service speed of trains. **Originality.** The article developed a new technology to improve the management of train sections by dividing them into operational zones. In each zone, consisting of two or three run-arounds, the duty officer of the principal station, performing in this case the functions of the train dispatcher, can control the train movement. **Practical value.** It has been proposed to put trains from technical stations that idle due to uneven movement, especially the trains from the terminal stations (division points) of the locomotive circulation sections, to reserve routes of the pre-section intermediate stations. Laying the reserve tracks and their maintenance, taking into account the periodicity of use and reduced permissible speed, can be allowed according to less tight standards for the construction of the roadbed, ballast section, sleeper density, taking into account the use of switches and decommissioned tracks.

Key words: train schedule; dispatch control; freight trains; train delay time; principal station

Introduction

In our country railway transport has a significant influence not only on improving the economic and financial results, but also on the results of other sectors of the economy. Improvement of the system of interaction between railways and production is carried out in the direction of increasing the quality of transportation

process with the expansion of the range of services, which contributes to the growth of transportation volumes. Therefore, in the conditions of competition, the total volumes of railway transportations depend primarily on the production volumes. In addition, they are also influenced by the quality of transport services, which in modern conditions is of particular relevance. Thus, improving the quality of transport

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

services with increase in the list of services significantly expands the customers' circle, contributes to the growth of railways revenues, strengthens the railway transport's positions in the market and positively influences the overall result of economic transformations.

According to the experience of improving the organization of railway operation in different countries, in modern realities, they aim to fully satisfy the requirements of customers regarding the terms of goods delivery due to the high reliability train movement schedule, which is the basis of the transportation process technology [2]. Under conditions of the existence of a multi-level management system of transportations, the separation of management at the level of the transport corridors network becomes necessary. This will make it possible to coordinate the technological and infrastructural capabilities of all units of PJSC «Ukrainian Railways» within the defined railway line in order to form a rational system for the promotion of specialized car traffic volumes [10].

Railway transport directs its efforts to strict adherence to the traffic schedule and the order of use of rolling stock in accordance with the plan for trains formation, technical regulation. On the other hand, large financial-industrial groups, which make up the majority of cargo owners, began to minimize their expenses with the aim of maximizing income, primarily transferring the cargo storage costs to the state-owned company PJSC «Ukrainian Railways» (PJSC «UZ») by using public cars as «wheeled warehouse». The financial-industrial groups began to include railway transport in the management of the sales process (and this is nothing more than the management of freight traffic volumes) and influence its technology [9]. So, whereas previously the department of traffic management exclusively dealt with the issues of the train formation plan, in recent years – with the issues of harmonization of the routes and conditions of goods transportation in individual companies. Due to the sharp decline in production and transportations, the need to compete for custom in the new economic conditions, railway transport has increasingly become to take into account the custom's requirements and adapt to them.

The article [11] emphasizes that competition at transport is a struggle for cargo owners and passengers, obtaining the most beneficial effect on the basis of the use of modern, more efficient technologies, improving the quality of transportations, their reliability and speed of movement of goods and passengers. The expediency of the use of modern dispatch train movement control systems is confirmed by the results of the study, set forth in the article [3]. Also, this study focuses on the fact that the task of constructing and improving the transport technologies and traffic management systems are relevant.

The article [1] studies the influence of various factors on the implementation of the technology of car traffic volume passage under conditions of rigid route schedules based on the criteria for rationalization of fuel and lubricant costs, timely goods' delivery, etc. in order to identify competitive variants of the organization of train traffic volumes. Establishing priorities for the provision of services at the section and the use of the balance methodology makes it possible to rationalize the work of a given railway station or direction [8]. The authors' thoughts on the network effects that arise during the train operation are quite interesting. The authors emphasize that one section cannot be considered as a completely independent part of the entire railway network.

The work [17] uses integration of software products of micro and macro levels of simulation was used, which allows estimating the influence of the primary delay in train movement on the distribution of general delay at the section and improving the research accuracy. The analysis of primary delays and the use of carrying capacity shows that there is a high degree of dependence between periods with a high frequency of delays and bottlenecks in carrying capacity [16]. In the article [12], the authors argue that the train movement schedule is stable if any delay in the train movement of can be compensated by time reserves without the need to activate the work of train dispatcher.

The paper [6] introduces the term «operational reliability» in order to assess the stability of the train schedule. The team of authors in the paper [14] proposed to assess the adherence stability of the train movement schedule, depending on the

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

complexity of operations: the fewer conflicts in the schedule, the higher the stability of the movement schedule. The manual [5] presents the methodology of determining the time reserve for solving conflict situations that occur during the laying of passenger and freight trains' movement on the schedule.

The works [13, 15, 18–19] solve the task of transportations dispatching at the level of management not only to control the train schedule, but also for the purpose of its operational correction. In their research, scientists also attempt to create a standard schedule of train movement on the tactical level of planning.

In the study [4], the authors propose a method for ranking trains and route schedules according to priority. They attempted to develop an automated system «Predicted train schedule» at the Belarusian railway, with the help of which it is possible to predict the schedule for 3 hours. Thus, the authors resolved the task of increasing the operation efficiency of a section by automating the supervisory control of the train work. Research in this direction is quite promising.

In the article [7], the authors developed a method of algorithmic description of the process of making managerial decisions by the train dispatcher in relation to the determining the cross-over stations taking into account the priority of trains. In the future, this algorithm can become the basis for creating a decision support system that will be integrated into the automated work station of the train dispatcher (AWS TD).

In today's realities, train dispatchers (DNCs) operate under heavy load conditions. From time to time, this affects the quality of their decisions during the operational management of train work at the sections. In view of this, it is expedient to develop the measures that will allow transferring the part of the functions of train management to other participants in the transport process; in particular, it may be duty officers at the principal stations.

Purpose

For further development of the technical means of Ukrainian railway transport it is necessary to have several variants of the rational technology of

the main production process – the organization of the train movement.

The purpose of the article is to investigate the expediency of the automatic control transfer of low-density stations of a section (according to the principle of centralized traffic control) to the duty officers at the principal stations.

Methodology

Already, in some areas of the railway network, there is a tension in the work due to a significant reduction of available capacity reserves. The work carried out at the railways in order to maximize the delineation of lines for freight and passenger traffic, will significantly increase the operating voltage on the lines where the concentration of freight and passenger traffic takes place. The growth of transportation volumes in the future will further complicate the transportation on these lines, will worsen the operation of railways, disrupt the rhythm and quality of transport services. Taking into account these circumstances, the development of railway capacity under new conditions should be addressed as an increase in the line power. To do this one should have adequate financial resources, as well as the search for new technologies and reserves at each element of the railway system.

The state of operational activity of railways indicates a violation of the complexity of approach to the capacity development of the lines, stations, use of rolling stock, etc. Today, the construction of train schedules is carried out as follows. At the first stage, according to the established directive documents and taking into account the set priorities and constraints, the passenger and freight lines are laid.

At the second stage (if it exists), it is attempted to optimize the modes of train movement in certain areas and routes to save energy resources, speed of delivery of passengers and goods. At the same time, these goals, as a rule, conflict with each other.

As a result, the railway receives a plan that is far from ideal, both in terms of costs and in terms of the passenger service and operators of freight commercial transportations.

We propose a solution to these problems, which includes:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- application of complex approach to the construction of the schedule of passenger and freight trains;
- accounting of resource-saving modes at the stage of construction of schedules of passenger (first of all, as a type of traffic with fixed schedules and less energy-consuming) and freight trains;
- accounting of electricity billing to optimize traction costs.

Findings

Train sections play an important role in the transportation process. Suffice it to say that 25% of the general time of car turnaround accounts for movement at the sections.

Reduction of the lengths of block-sections makes it possible to reduce the spacing of trains. At some runs one can lay third and fourth main tracks.

In connection with the non-synchronization of train movement, the minimum calculation interval cannot be realized both from departure and from the arrival of trains at the section's final station. In this case, the calculated value of the carrying capacity is not achieved and the average speed of the train traffic flow sharply declines.

The information workload of the dispatchers, who control the train movement at the sections of the main course, constantly exceeds the permissible level. Under these conditions dispatcher apparatus often manages only to fix the train situation. As a result, there are miscalculations in the passage of trains at a section, in the choice of the order of their entering to the junction, which ultimately leads to an even greater decrease in the service speed.

The number of trains that can be simultaneously in motion and at the same time move with the speed set for this section is strictly limited. Accumulation of trains at the sections, which exceeds a certain maximum value reduces the speed of their movement. But in practice, nobody sets this maximum permissible value and nobody is guided by it, which sometimes leads to

unacceptable oversaturation of sections by trains over the established limits.

If the excess of trains is insignificant and the technical stations and stations, capable to cope with the increased size of movement are in front, then, certainly, one should force the transfer of the train traffic volume. If there is no such opportunity during this period, it is necessary to restrict the movement of trains at such a section. To shorten the number of trains, which are simultaneously in motion on lines, to the established limit in exceptional cases can be due to the temporary withdrawal of compositions at intermediate stations of the district.

In exceptional cases it is possible to shorten the number of trains, which are simultaneously moving on lines, to the established limit due to the temporary leaving of trains at intermediate stations of the section.

Stable, reliable operation of intermediate stations for the acceptance of trains can be provided in the presence of free main and one receiving-and-departure track (duplicate element). In case of a failure (train stopping at the station for any reason), it is always possible to let the next trains to pass from this reserve track.

The maximum number of trains left at the station should not exceed the total number of available tracks, minus one track for each direction at each intermediate station. In this case, one can use sidings, branches of enterprises with seasonal work.

Fig. 1 shows a fragment of the graph of traffic delay. At the limited number of (only one) run-around tracks at the pre-section and other intermediate stations due to the delay of not accepting the first train going in a pack, the following trains are placed for run-around at the previous intermediate stations. At this, even in the case of favorable acceptance of trains from the section, in the future there is a loss of carrying capacity Δ_{pas}^{r-a} , caused by nonidentity of the runs and the difference in the time of passage of the freight and passenger trains.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

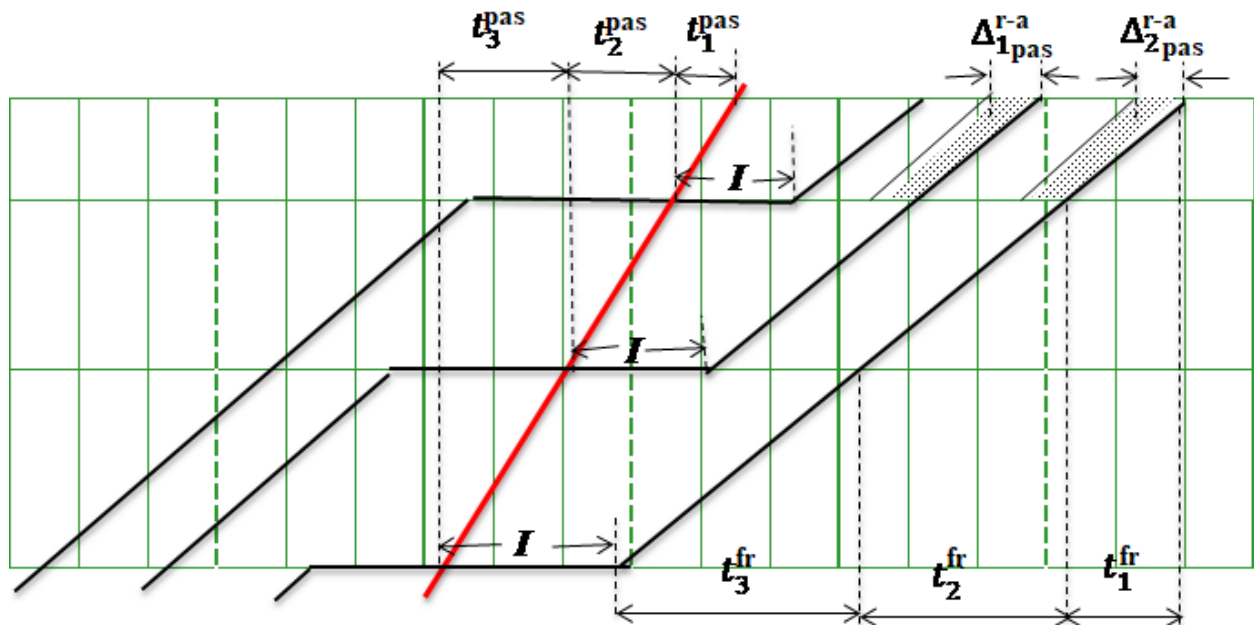


Fig. 1. Delay because of non-acceptance of the first train

Time losses not used for train movement will equal to:

$$\Delta_{1pas}^{r-a} = (I + t_2^{fr} + t_1^{fr}) - (t_2^{pas} + I + t_1^{fr} + I),$$

or

$$\Delta_{1pas}^{r-a} = t_2^{fr} - t_2^{pas} - I, \quad (1)$$

where t_1^{fr} – is the time of freight train movement on the first run (t_2^{fr} – on the second, etc.); t_1^{pas} – is the time of passenger train movement on the first run (t_2^{pas} – on the second, etc.); I – is the succession time.

Accordingly, time losses during the passage of freight train from the third station will equal:

$$\Delta_{2pas}^{r-a} = t_3^{fr} - t_3^{pas} - I. \quad (2)$$

The negative value of the results obtained by formulas (1) and (2) indicates that there will be no time losses and, therefore, carrying capacity.

As a rule, the last runs before the section stations has less time of movement than other runs at the section. It should be pursued further, because most often complications in train movement arise because of their non-acceptance by technical stations.

Fig. 2 shows that if there is a required tracks reserve at the intermediate pre-section station, trains freely pass to it. After passage of passenger train under favorable conditions of its acceptance by station, the run is used without losses of carrying capacity. The general time of train delay is reduced per value of the total value of losses associated with the run-arounds of freight trains by passenger ones.

In practice, a situation shown in Fig. 3 often arises. Due to the non-acceptance by the section station, freight trains are already placed for the run-around by a passenger train, and it is possible to receive a freight train from the section before a passenger one.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

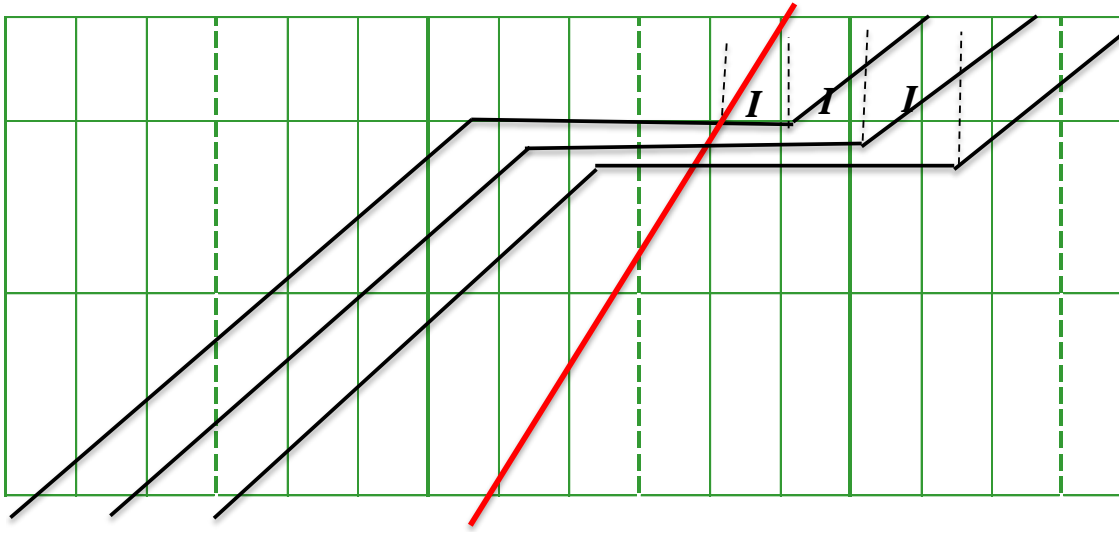


Fig. 2. Availability of the required reserve of tracks

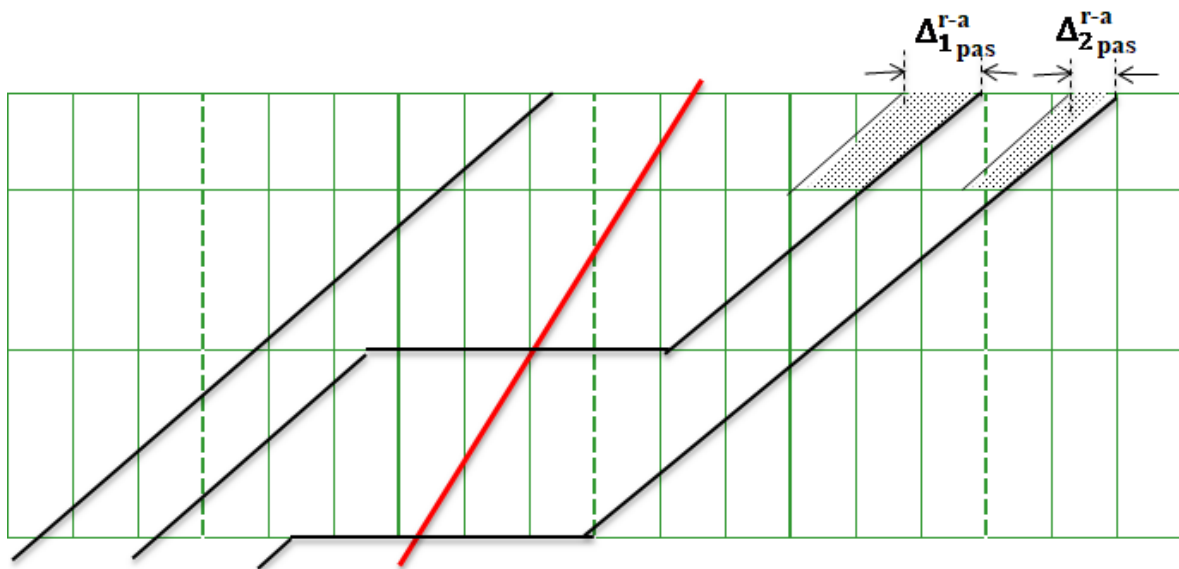


Fig. 3. Possibility of acceptance of a freight train before a passenger one

In this case, as shown in Fig. 3, after passage of a passenger train at the pre-junction station, there are no available trains and, even in case of favorable acceptance, its carrying capacity is not used. The availability of reserve receiving-and-departure tracks at pre-section intermediate stations will create the necessary «support» for trains.

An analysis of the work of freight-loaded sections also indicates the expediency to equip the run-arounds before the technical stations by either-direction automatic block system. In practice, there

is often a need to pass a passenger or other urgent train, but the right run-around track is occupied. Passing along the wrong track takes a lot of time for execution of train documentation. Often, there are no access tracks required for implementation of this regulatory measure at both intermediate and section stations. In this connection, one should foresee double dispatching access tracks on both sides of the pre-section intermediate stations, as well as the floating specialization of the receiving-and-departure tracks. Such rearrangement of the necks of pre-section intermediate stations should

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

be carried out now, without waiting for a comprehensive solution of the issues of improving the train sections reliability.

In future, the automatic control of the low-density stations of the section can be transferred to the principal stations (according to the principle of dispatching centralization). This will make it possible to quickly cover the costs of modernization due to the payroll budget economy, as well as to stimulate the work of the train dispatchers, duty officers at the principal stations of the operational zone.

The organization of the operational zone for controlling the train movement on the ground significantly reduces the information flows and facilitates the work of the section's train dispatchers, will create the necessary conditions for creative decision-making for inter-sectional regulation, will contribute to increasing service speed of train movement.

The principle diagram of the transmission of the source information may look in the following

way. In addition to the section stations, two pre-section intermediate stations located at the ends of the section and one or two principal stations of the operational zone carry out the direct negotiations with the train dispatcher of the section. The allocation of the operational zone at the sections does not require any capital investments, since the existing communication lines can be used for data transmission.

The reduction of the number of information sources upon the availability of modern communication of the principal stations with the train dispatcher of the section also creates better conditions for automation of the process of movement graph plotting. With the allocation of the operational area on the section, there is no need to reflect the trains passing through the stations located inside them, except the cases where these stations carry out run-arounds and other regulating measures. It will be sufficient to note only the time when trains enter the operational zone and leave it, as shown in Fig. 4.

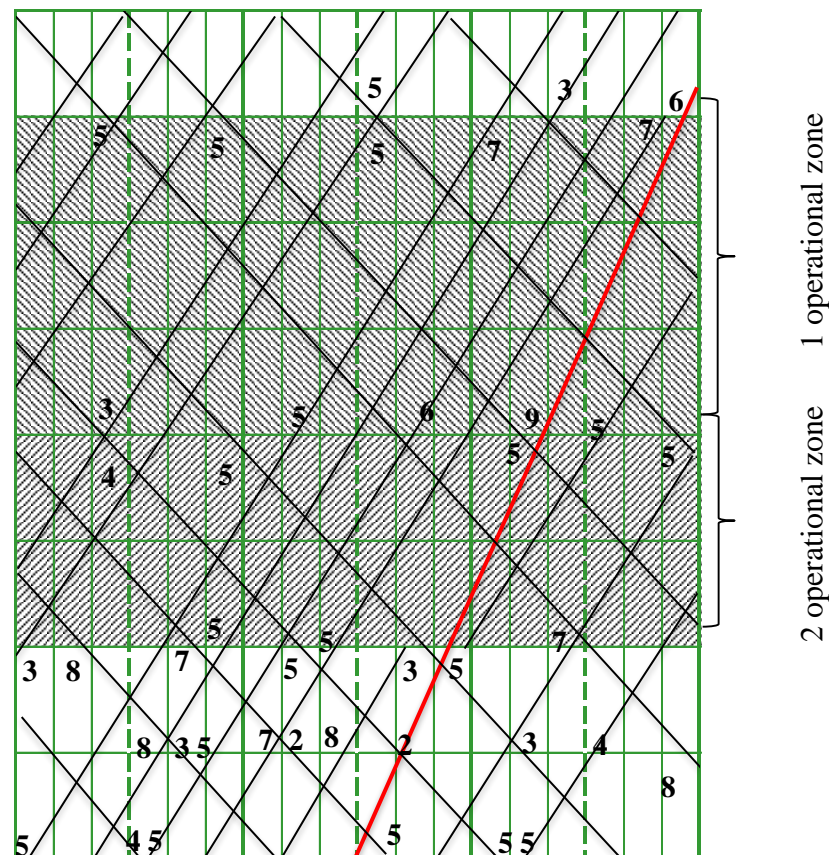


Fig. 4. Train passage through the operational zones

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Maintenance of the graph (displaying the lines of train passage through the section) can be entrusted to operators. This will considerably extend the range of people who are in urgent need of current information about the course of train work at the sections (ДІП, chiefs and senior dispatchers of the traffic departments, etc.).

The measures to improve the reliability of train sections operation considered in the article will accelerate the passage of car traffic volumes, improve the conditions and increase the efficiency of the work of train dispatchers.

The railways face a complex task of tying up the forecast of electricity consumption with the forecast of transportation volumes. Since the transportation process is influenced by many factors, the Ukrainian railways may have additional economic costs due to the overestimation or understatement of the declared norms of electricity consumption.

The use of two-zone or three-zone tariffs gives an effect not only with the steady and uniform filling of the daily traffic schedule, but also at the intensity of movement above the level determined by the specific conditions. In this context, it is the various optimization measures for regulating the train movement schedule that are relevant.

The capacities of the receiving-departure tracks at the section stations are extremely limited. The occupancy of the run-around tracks by out-of-work trains prevents carrying out any regulating measures inside the section. Trains pass one after another without giving priority, that is, they pass through the section in the order in which they entered it. Frequently, due to the limited number of tracks at the pre-section intermediate station, freight trains are placed for run-around by the passenger ones at the distant approaches. This leads to a loss of service speed and reduces the level of utilization of the sections' working capacity.

Originality and practical value

To improve the management of train stations, it is expedient to divide them into operational zones. In each zone, consisting of two or three run-arounds, the duty officer of the principal station, performing in this case the functions of the train dispatcher, can control the train movement. He

determines the order of train passage within the zone, maintains a schedule of performed traffic, informs the train dispatcher of the section about the passage of trains through the operational zone according to the established procedure, and receives from him instructions on intra-zone regulation of train traffic.

For the development of pre-section intermediate stations, it is necessary to provide construction of one or two tracks for receiving multiple trains. Uncoupling them at the stations' runs always leads to lower carrying capacity. The presence of stations capable of performing separation operations at the ends of the sections will facilitate the application of already well-known at the railways method of inter-sectional regulation of train movement. Thus, the construction of reserve tracks at pre-section stations increases the possibility of inter-sectional regulation of trains, provides a significant economy of train-hours and increases the service speed.

One can also place the trains from technical stations that are idle due to uneven traffic, especially from the terminal stations (division points) of locomotive circulation sections on the reserve tracks of pre-section intermediate stations. The laying of such tracks and their maintenance, taking into account the periodicity of use and reduced permissible movement speed, for example, 10-15 km/h, can be allowed according to less tight standards for the construction of the roadbed, ballast section, sleeper density, taking into account the use of switches and decommissioned tracks, etc. If necessary, the parks of reserve tracks designed for hold of the out-of-work trains that are placed for run-around, can be located outside the station area, using a favorable terrain.

Conclusions

Increasing the capacity of all railways transport enterprises of Ukraine in modern conditions and in the future means, first of all, increasing the carrying and transportation capacity of the most freight-loaded railway lines. Taking into account the projected volumes of transportation at railways, considerable work should be done on the modernization and replacement of outdated equipment, to continue the electrification of

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

freight-loaded lines, to introduce modern ATC equipment, to extend the station tracks at the courses of heavy, long and multiple trains, to constantly improve the technology of cargo and passenger transportation, etc. The phased implementation of such a complex and wide-

ranging program will enable PJSC «Ukrainian Railway» to master the growing cargo turnover in the direction of transport corridors and seaports and provide high-quality transport services to cargo owners and population.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бутько, Т. В. Модель просування вагонопотоків в умовах «жорстких» ниток графіку / Т. В. Бутько, Т. О. Костиркіна // 36. наук. пр. Дон. ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2010. – № 22. – С. 33–42.
2. Бутько, Т. В. Удосконалення системи організації роботи залізничного напрямку на основі спеціалізації за призначенням ниток графіка руху вантажних поїздів / Т. В. Бутько, М. І. Музикін // 36. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізн. трансп. – Харків, 2017. – Вип. 169 (додаток). – С. 153–155.
3. Долгополов, П. В. Удосконалення перевізного процесу на транспортному полігоні на основі моделі диспетчерського управління / П. В. Долгополов, В. П. Манзуля, А. О. Роженко // 36. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2014. – Вип. 145. – С. 11–17.
4. Ерофеев, А. А. Автоматизация диспетчерского управления поездной работой на Белорусской железной дороге / А. А. Ерофеев, Е. А. Ерофеева // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 185–191.
5. Інструкція зі складання графіка руху поїздів на залізницях України : затв. наказом Укрзалізниці від 05.04.2002 р. № 170-Ц. – Київ : Транспорт України, 2003. – 146 с.
6. Каретников, А. Д. График движения поездов / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – Москва : Транспорт, 1979. – 301 с.
7. Кокурин, И. М. Алгоритмизация решений поездного диспетчера по выбору станций скрещения / И. М. Кокурин, А. Б. Васильев // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. – 2015. – Вып. 2. – С. 47–55.
8. Прохорченко, А. В. Проблеми розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах ринкових відносин / А. В. Прохорченко // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2014. – № 4. – С. 36–41.
9. Управління вантажопотоками та вагонопотоками на залізничному транспорті / П. В. Бех, О. В. Лашков, М. І. Музикін, Г. І. Нестеренко, С. І. Авраменко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2017. – № 3 (233). – С. 22–30.
10. Формування логістичної технології просування вантажопотоків за жорсткими нитками графіка руху поїздів / Т. В. Бутько, Д. В. Ломотько, А. В. Прохорченко, К. О. Олійник // 36. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2009. – Вип. 111. – С. 23–30.
11. Шляхи підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту в сучасних умовах / П. В. Бех, Г. І. Нестеренко, С. І. Музикіна, О. В. Лашков, М. І. Музикін // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 25–39. doi: 10.15802/stp2015/55349
12. A three-level framework for performance-based railway timetabling / R. M. P. Goverde, N. Besinovic, A. Binder, V. Cacchiani, E. Quaglietta, R. Roberti, P. Toth // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. – 2016. – Vol. 67. – P. 62–83. doi: 10.1016/j.trc.2016.02.004
13. Caprara, A. Modelling and solving the train timetabling problem / A. Caprara, M. Fischetti, P. Toth // Operations Research. – 2002. – Vol. 50. – Iss. 5. – P. 851–861. doi: 10.1287/opre.50.5.851.362
14. Delorme, X. Stability evaluation of a railway timetable at station level / X. Delorme, X. Gandibleux, J. Rodriguez // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 195. – Iss. 3. – P. 780–790. doi: 10.1016/j.ejor.2007.06.062
15. Hansen, I. A. Railway Timetabling & Operations: Analysis, Modelling, Optimization, Simulation, Performance Evaluation / I. A. Hansen, J. Pachl. – Hamburg : Eurailpress in DVV Media Group, 2014. – 332 p.
16. Statistical investigation on train primary delay based on real records: evidence from Wuhan–Guangzhou HSR / W. Chao, L. Zhongcan, L. Javad, F. Liping, H. Ping, J. Chaozhe // International Journal of Rail Transportation. – 2017. – Vol. 5. – Iss. 3. – P. 170–189. doi: 10.1080/23248378.2017.1307144
17. Umiliacchi, S. Improving railway operations through the integration of macroscopic and microscopic modelling with optimisation : a thesis submitted for the fulfilment of Doctor of Philosophy / Silvia Umiliacchi ; The University of Birmingham. – Birmingham, 2016. – 128 p.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

18. Zhou, X. Bicriteria train scheduling for high-speed passenger railroad planning applications / X. Zhou, M. Zhong // *European Journal of Operational Research*. – 2005. – Vol. 167. – Iss. 3. – P. 752–771. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.019
19. Zhou, X. Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds / X. Zhou, M. Zhong // *Transportation Research Part B: Methodological*. – 2007. – Vol. 41. – Iss. 3. – P. 320–341. doi: 10.1016/j.trb.2006.05.003

Г. І. НЕСТЕРЕНКО¹, П. В. БЕХ², М. І. МУЗИКІН^{3*}, С. І. АВРАМЕНКО⁴

¹Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-1629-0201

²Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 225 38 64, ел. пошта Bekhrit@gmail.com, ORCID 0000-0002-1782-9224

^{3*}Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 251 53 14, ел. пошта mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-2938-7061

⁴Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 082 88 27, ел. пошта fufei8791@gmail.com, ORCID 0000-0002-5832-6949

УДОСКОНАЛЕННЯ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО РЕГУЛЮВАННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВВЕДЕННЯ ОПЕРАТИВНИХ ЗОН

Мета. У роботі необхідно дослідити доцільність передачі автоматичного керування малодільними станціями дільниці (за принципом диспетчерської централізації) черговим по опорних станціях. **Методика.** У статті проаналізована робота вантажонапружених дільниць ПАТ «Українська залізниця». Виявлено, що інформаційна завантаженість диспетчерів, що керують рухом поїздів на дільницях головного ходу, повсякчас перевищує допустимий рівень. Досліджено можливість використання технології диспетчерського регулювання руху поїздів за допомогою введення оперативних зон. **Результати.** Виявлено, що ємності приймально-відправних колій на станціях дільниці вкрай обмежені. Займання обгінних колій «залишеними» поїздами заважає проведенню будь-яких регулювальних заходів усередині дільниці. Поїзди слідує один за одним без надання пріоритету, тобто слідує по дільниці в тому порядку, в якому вони надійшли на неї. Через обмежену кількість колій на переддільничній проміжній станції вантажні поїзди розставляють під обгін пасажирськими на далеких підходах. Це призводить до втрат дільничної швидкості й знижує рівень використання пропускну здатності дільниць. Уведення оперативних зон значно скоротить інформаційні потоки й полегшить працю поїзних диспетчерів дільниці, створить необхідні умови для творчого прийняття рішень із внутрішньодільничного регулювання, сприятиме підвищенню дільничної швидкості руху поїздів. **Наукова новизна.** У статті розроблена нова технологія вдосконалення управління поїзними дільницями шляхом розділення їх на оперативні зони. У кожній зоні, що складається з двох-трьох перегонів, рухом поїздів може керувати черговий опорної станції, що виконує в цьому випадку функції поїзного диспетчера. **Практична значимість.** Запропоновано на резервні колії переддільничних проміжних станцій виставляти состави з технічних станцій, які простояють у зв'язку з нерівномірністю руху, особливо з кінцевих станцій (стиківих пунктів) дільниць обігу локомотивів. Укладання резервних колій і їх утримання, урахування періодичності використання й зменшену допустиму швидкість руху, можна дозволити за менш жорсткими нормами влаштування земляного полотна, баластної призми, епюри шпал, з урахуванням використання стрілочних переводів та колій, знятих з експлуатації.

Ключові слова: графік руху поїздів; диспетчерське керування; вантажні поїзди; час затримки поїздів; опорна станція

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Г. И. НЕСТЕРЕНКО¹, П. В. БЕХ², М. И. МУЗЫКИН^{3*}, С. И. АВРАМЕНКО⁴¹Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-1629-0201²Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 225 38 64, эл. почта Bekhpit@gmail.com, ORCID 0000-0002-1782-9224^{3*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 251 53 14, эл. почта mihailmuzykin@gmail.com, ORCID 0000-0003-2938-7061⁴Каф. «Безопасность жизнедеятельности», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (066) 082 88 27, эл. почта fufei8791@gmail.com, ORCID 0000-0002-5832-6949**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИСПЕТЧЕРСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ПОМОЩЬЮ ВВЕДЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ЗОН**

Цель. В работе необходимо исследовать целесообразность передачи автоматического управления малодеятельными станциями участка (по принципу диспетчерской централизации) дежурным по опорным станциям. **Методика.** В статье проанализирована работа грузонапряженных участков АО «Украинская железная дорога». Выявлено, что информационная загруженность диспетчеров, управляющих движением поездов на участках главного хода, постоянно превышает допустимый уровень. Исследована возможность использования технологии диспетчерского регулирования движения поездов посредством введения оперативных зон. **Результаты.** Выявлено, что емкости приемо-отправочных путей на станциях участка крайне ограничены. Занятие обгонных путей «оставленными» поездами мешает проведению любых регулирующих мер внутри участка. Поезда следуют друг за другом без предоставления приоритета, то есть следуют по участку в том порядке, в котором они поступили на нее. По причине ограниченного количества путей на передучастковой промежуточной станции грузовые поезда расставляют под обгон пассажирскими на дальних подходах. Это приводит к потерям участковой скорости и снижает уровень использования пропускной способности участков. Введение оперативных зон значительно сократит информационные потоки и облегчит труд поездных диспетчеров участка, создаст необходимые условия для творческого принятия решений по внутренне-участковому регулированию, будет способствовать повышению участковой скорости движения поездов. **Научная новизна.** В статье разработана новая технология совершенствования управления поездными участками путем разделения их на оперативные зоны. В каждой зоне, состоящий из двух-трех гонок, движением поездов может управлять дежурный опорной станции, выполняющий в этом случае функции поездного диспетчера. **Практическая значимость.** Предложено на резервные пути передучастковых промежуточных станций выставлять составы с технических станций, которые простаивают в связи с неравномерностью движения, особенно с конечных станций (стыковых пунктов) участков обращения локомотивов. Укладку резервных путей и их содержание, учитывая периодичность использования и уменьшенную допустимую скорость движения, можно позволить за менее жесткими нормами устройства земляного полотна, балластной призмы, эпюры шпал, с учетом использования стрелочных переводов и путей, снятых с эксплуатации.

Ключевые слова: график движения поездов; диспетчерское управление; грузовые поезда; время задержки поездов; опорная станция

REFERENCES

1. Butko, T. V., & Kostyrkina, T. O. (2010). Model prosvannja vagonopotokiv v umovakh «zhorstkykh» nytok ghrafiku. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu*, 22, 32-42. (in Ukrainian)
2. Butko, T. V., & Muzykin, M. I. (2017). Improvement of the Organization Rail Direction on the Basis of Specialization Purpose Paths Schedule of Freight Trains. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 169 (addition), 153-155. (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

3. Dolgoplov, P. V., Manzulja, V. P., & Rozhenko, A. O. (2014). Udoskonalennia pereviznogo protsesu na transportnomu polihoni na osnovi modeli dyspetcherskoho upravlinnia. *Collected scientific works of Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 145, 11-17. (in Ukrainian)
4. Erofeev, A. A., & Erofeeva, E. A. (2012). Automation of Controller's Management by Train Work on the Byelorussian Ferrous Road. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 40, 185-191. (in Russian)
5. *Instruktsiia zi skladannia hrafika rukhu poizdiv na zaliznyiakh Ukrainy*. (2013). Kyiv: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)
6. Karetnikov, A. D., & Vorobyiov, N. A. (1979). *Grafik dvizheniya poezdov*. Moscow: Transport. (in Russian)
7. Kokurin, I. M., & Vasilev, A. B. (2015). Algorithmic description of train dispatcher solutions for crossing station selection. *Izvestia of St. Petersburg University of means of communication*, 2, 47-55. (in Russian)
8. Prokhorchenko, A. V. (2014). Problemy rozrakhunku propusknoi spromozhnosti zaliznychnoi infrastruktury v umovakh rynkovykh vidnosyn. *Information and control systems at railway transport*, 4, 36-41. (in Ukrainian)
9. Bekh, P. V., Lashkov, O. V., Muzykin, M. I., Nesterenko, H. I., & Avramenko, S. I. (2017). The Management of Freight Traffic and Railcar Traffic on the Railway. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. 3(233), 22-30. (in Ukrainian)
10. Butko, T. V., Lomotko, D. V., Prokhorchenko, A. V., & Olijnyk, K. O. (2009). Formuvannia lohystychnoi tekhnologii prosvannia vantazhopotokiv za zhorstkymy nytkamy hrafika rukhu poizdiv. *Collected scientific works of Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 111, 23-30. (in Ukrainian)
11. Bech, P. V., Nesterenko, G. I., Muzykina, S. I., Lashkov, O. V., & Muzykin, M. I. (2015). Ways to Increase Competitiveness of Railway Transport in Modern Conditions. *Science and Transport Progress*, 5(59), 25-39. doi: 10.15802/stp2015/55349 (in Ukrainian)
12. Goverde, R. M. P., Bešinović, N., Binder, A., Cacchiani, V., Quaglietta, E., Roberti, R., & Toth, P. (2016). A three-level framework for performance-based railway timetabling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 62-83. doi: 10.1016/j.trc.2016.02.004 (in English)
13. Caprara, A., Fischetti, M., & Toth, P. (2002). Modeling and Solving the Train Timetabling Problem. *Operations Research*, 50(5), 851-861. doi: 10.1287/opre.50.5.851.362 (in English)
14. Delorme, X., Gandibleux, X., & Rodriguez, J. (2009). Stability evaluation of a railway timetable at station level. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 780-790. doi: 10.1016/j.ejor.2007.06.062 (in English)
15. Hansen, I. A., & Pahl, J. (2014). *Railway Timetabling & Operations: Analysis, Modelling, Optimization, Simulation, Performance Evaluation*. Hamburg: Eurailpress in DVV Media Group. (in English)
16. Wen, C., Li, Z., Lessan, J., Fu, L., Huang, P., & Jiang, C. (2017). Statistical investigation on train primary delay based on real records: evidence from Wuhan–Guangzhou HSR. *International Journal of Rail Transportation*, 5(3), 170-189. doi: 10.1080/23248378.2017.1307144 (in English)
17. Umiliacchi, S. (2016). Improving railway operations through the integration of macroscopic and microscopic modelling with optimisation. (A thesis submitted for the fulfilment of Doctor of Philosophy). The University of Birmingham, Birmingham. (in English)
18. Zhou, X., & Zhong, M. (2005). Bicriteria train scheduling for high-speed passenger railroad planning applications. *European Journal of Operational Research*, 167(3), 752-771. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.019 (in English)
19. Zhou, X., & Zhong, M. (2007). Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and-bound algorithms with enhanced lower bounds. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(3), 320-341. doi: 10.1016/j.trb.2006.05.003 (in English)

Received: Aug. 08, 2018

Accepted: Nov. 30, 2018

УДК 656.078.5

Б. О. ЦЕЙКО^{1*}

^{1*}Каф. «Управління процесами перевезень», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Котельникова, 29/18, Київ, Україна, 03115, тел. +38 (093) 811 09 20, ел. пошта boris16@bigmir.net, ORCID 0000-0002-2636-6321

ОЦІНКА ЯКОСТІ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОЕФІЦІЄНТА ВІДХИЛЕННЯ ЧАСУ ПРИБУТТЯ ПОЇЗДА

Мета. Дослідження спрямовано на розгляд особливостей обчислення коефіцієнта відхилення часу прибуття поїзда на станцію від запланованого по відношенню до очікуваного відхилення. На теперішній час для управління перевезеннями вантажів застосовуються підходи, в яких такий показник як коефіцієнт відхилення не обчислюється та не враховується. В практичній реалізації це зумовлює те, що залізниця, здійснюючи перевезення вантажу, не отримує інформацію щодо відношення номінальних часових відхилень до реальних. Ця ситуація вимагає вирішення задач удосконалення діючих технологій перевізного процесу, пов'язаних із формуванням, організацією та відправленням вантажів. Тому потреби в розрахунках таких коефіцієнтів є актуальними. **Методика.** Для досягнення мети потрібно ранжувати зібрані статистичні дані, згрупувати й проаналізувати їх. Запропоновано математичну модель розрахунку відхилення часу прибуття поїздів від запланованого та залежність даного відхилення від етапу доставки (станції) й кількості поїздів (у відсотках від загального їх числа). **Результати.** Уведено поняття «коефіцієнт відхилення», який характеризує відхилення часу прибуття поїзда на станцію від запланованого по відношенню до очікуваного відхилення. Спираючись на результати аналізу відхилення часу прибуття поїздів на станцію залежно від прогону, можна зазначити, що простежується прямий взаємозв'язок між запізненням потягів у годинах та номером станції (тобто відстанню). Результат залишається справедливим для довільної кількості поїздів (було розглянуто 0, 25, 50, 75 та 100 %). **Наукова новизна.** Автор уперше ввів поняття «коефіцієнт відхилення», який характеризує відхилення часу прибуття поїзда на станцію від запланованого по відношенню до очікуваного відхилення. **Практична значимість.** На основі наведеної математичної моделі можна передбачити приблизну величину запізнення поїздів для залізничної лінії з більшою кількістю станцій, якщо основні характеристики вантажоперевезення залишаться без суттєвих змін, наприклад, значного поліпшення або погіршення технічних характеристик залізничної інфраструктури.

Ключові слова: відхилення; коефіцієнт відхилення; середнє відхилення; загальний коефіцієнт відхилення; поїзд

Вступ

На теперішній час для управління перевезеннями вантажів застосовують підходи, у яких такий показник, як коефіцієнт відхилення, не обчислюється й не враховується. У практичній реалізації це зумовлює те, що залізниця, здійснюючи перевезення вантажу, не отримує інформації щодо відношення номінальних часових відхилень до реальних. Тому потреби в розрахунках таких коефіцієнтів є актуальними.

Мета

Ураховуючи вищезгадане, автор має за мету розглянути особливості обчислення коефіцієнта відхилення часу прибуття поїзда на станцію від запланованого по відношенню до очікуваного відхилення.

Методика

Обсяги вантажоперевезень постійно збільшуються, отже зростає і конкуренція між перевізниками. Тому виникає потреба у науковому підході до аналізу, планування та здійснення залізничних вантажних перевезень.

Завдання організації логістики, як відомо, полягає в тому, щоб відносини між окремими видами логістичної діяльності, особами та ресурсами забезпечували оптимальне досягнення цілі. Основною ціллю вантажного перевезення як логістичної системи є максимізація прибутків за мінімізації часу й витратності перевезення. Для її досягнення необхідно врахувати багато факторів, які впливають на якість транспортування.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Своєчасність відіграє велику роль під час оцінювання якості перевезення. Вона підвищує імідж і конкурентоспроможність як перевізників, так і їх клієнтів на ринку й дає змогу зменшити додаткові витрати на зберігання вантажу [2], втрати під час перевезення, іммобілізацію товарно-матеріальних цінностей зі сфери виробництва на час перевезення, можливе пониження ефективності виробництва, подовження оренди вантажно-розвантажувального обладнання та ін. [9].

Таким чином, оцінка ефективності доставки, розподілу відхилень та складання його математичної моделі є актуальним завданням клієнтоорієнтовного перевезення вантажів.

У цій статті розглянуто відхилення прибуття поїздів на станції від плану, залежність цих відхилень від кількості станцій та досліджуваних поїздів. І першим кроком буде ранжувати зібрані статистичні дані, згрупувати й проаналізувати їх, скласти математичну модель розподілу відхилень, оцінити основні параметри й визначити вид такого розподілу з певною ймовірністю. Це, у свою чергу, дасть можливість спрогнозувати відхилення на кожному етапі руху й остаточне відхилення в кінці маршруту. Після чого можна буде передбачити можливі втрати й надалі розробити стратегію їх поступового зменшення.

Для правильної оцінки всіх факторів та прогнозування можливих витрат [10] запропоновано математичну модель розрахунку відхилення часу прибуття поїздів на станції лінії Кривий Ріг – Одеса (К – О) від запланованого та залежність цього відхилення від етапу доставки (станції) й кількості поїздів (у відсотках від загального їх числа). Модель базується на статистичних оцінках розподілу відхилення за часом.

Результати

Оцінка відхилень на всіх етапах транспортування з використанням статистичних методів [1, 7, 9] дозволяє точніше кваліфікувати такий показник, як якість транспортування [3]. Потреба приділяти увагу більш якісному транспортному обслуговуванню зумовлена зростанням рівня конкурентоспроможності транспортних послуг [4–6, 8, 14].

Отримані результати дають змогу зробити припущення стосовно закономірності зростання відхилень у разі збільшення кількості станцій за порівняно близьких технічних умов транспортування. Це дає змогу передбачити можливі витрати через порушення графіка перевезень та його наслідки.

Річні дані стосовно кількості поїздів (у відсотках), для яких наявне відхилення від запланованого графіка руху, наведено в табл. 1 [8].

Таблиця 1

**Відхилення прибуття поїздів на станції лінії К – О залежно від етапу
з кроком 25 % від кількості поїздів**

Table 1

**Deviation in the arrival of trains to the stations of K – O line depending on the stage
with a step of 25% of the trains number**

№ зп	Станція	$\Delta_{свр}$	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Кривий Ріг	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Кривий Ріг–Західний	0,48	–0,07	0,10	0,15	0,27	40,65
3	Мусіївка	0,53	–0,20	0,12	0,17	0,32	40,70
4	Гейківка	0,58	0,00	0,13	0,21	0,36	40,73
5	Висунь	0,78	–0,03	0,15	0,29	0,55	41,22
6	Тимкове	3,37	–0,22	0,79	1,81	4,00	44,71

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Продовження табл. 1
Continuation of Table 1

№ зп	Станція	$\Delta_{свр}$	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
1	2	3	4	5	6	7	8
7	Червоне Озеро	3,36	–0,05	0,90	2,10	4,17	24,57
8	Бобринець	4,01	0,25	1,57	2,68	4,73	25,69
9	Кропивницька	6,46	–0,57	2,50	4,16	7,86	63,73
10	Олійникове	6,67	–0,05	2,70	4,33	8,38	50,18
11	Кавуни	7,49	0,22	3,12	4,74	8,77	50,77
12	Южноукраїнська	7,25	0,23	3,13	4,75	9,37	50,77
13	Трикратне	7,40	0,81	3,36	4,85	9,45	50,78
14	Олександрівка	7,35	0,65	3,34	4,86	9,19	50,78
15	Вознесенськ	7,63	0,86	3,56	5,03	8,97	64,78
16	Мартинівська	7,90	1,02	3,90	5,37	9,94	51,45
17	Веселинове	8,04	1,01	3,92	5,42	10,15	51,46
18	Колосівка	16,85	0,10	3,52	6,40	14,20	237,77
19	Березівка	18,63	0,08	3,84	6,83	14,59	237,85
20	Раухівка	18,87	0,15	3,90	7,13	14,83	237,93
21	Сербка	19,03	0,25	4,04	7,34	14,95	238,03
22	Буялик	19,29	0,05	3,91	7,17	14,87	237,86
23	Чорноморська	18,69	0,10	4,02	7,14	15,04	237,90
24	Кулиндрове	21,66	0,20	4,84	8,39	18,52	237,95
25	Одеса–Східна	26,91	1,10	6,39	11,78	27,78	310,22
26	Одеса–Сортувальна	26,41	1,35	7,53	14,12	27,87	310,47
27	Одеса–Порт	45,08	7,05	22,61	33,13	49,91	337,88

Тут $\Delta_{свр}$ – середнє відхилення для кожної станції, обчислене за річною інформацією з кроком у 25 %.

Знайдемо очікуване відхилення $\Delta_{оч}$ для кожної станції як середнє відхилення Δ для 25, 50 та 75 % поїздів, округлене до цілих [11].

Відхилення прибуття поїзда на станції лінії К – О залежно від етапу з кроком 25 % від кількості поїздів та очікуване відхилення наведено в табл. 2 [8].

Графічне зображення відхилення прибуття поїздів на лінії К – О наведено на рис. 1 [8].

Як бачимо, відхилення зростають зі збільшенням кількості станцій, тобто для перших 5 станцій графіки коливаються біля 0, на середині маршруту – близько 5, а в кінці вже перевищують 20. Для різної кількості поїздів остаточні результати розташовані між 20 та 50 год.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Таблиця 2

Очікуване відхилення прибуття поїздів
на станції лінії К – О

Table 2

Expected deviation in the arrival of trains
to the stations of K - O line

№ зп	Станція	Δ	Δ_{oc}
1	Кривий Ріг	0,00	0
2	Кривий Ріг– Західний	0,17	0
3	Мусіївка	0,20	0
4	Гейківка	0,23	0
5	Висунь	0,33	0
6	Тимкове	2,20	2
7	Червоне Озеро	2,39	2
8	Бобринець	2,99	3
9	Кропивницька	4,84	5
10	Олійникове	5,14	5
11	Кавуни	5,54	6
12	Южноукраїнська	5,75	6

Продовження табл.2

Continuation of Table 2

№ зп	Станція	Δ	Δ_{oc}
13	Трикратне	5,89	6
14	Олександрівка	5,80	6
15	Вознесенськ	5,85	6
16	Мартинівська	6,40	6
17	Веселинове	6,50	6
18	Колосівка	8,04	8
19	Березівка	8,42	8
20	Раухівка	8,62	9
21	Сербка	8,78	9
22	Буялик	8,65	9
23	Чорноморська	8,74	9
24	Кулиндрове	10,58	11
25	Одеса–Східна	15,31	15
26	Одеса–Сортувальна	16,51	17
27	Одеса–Порт	35,22	35

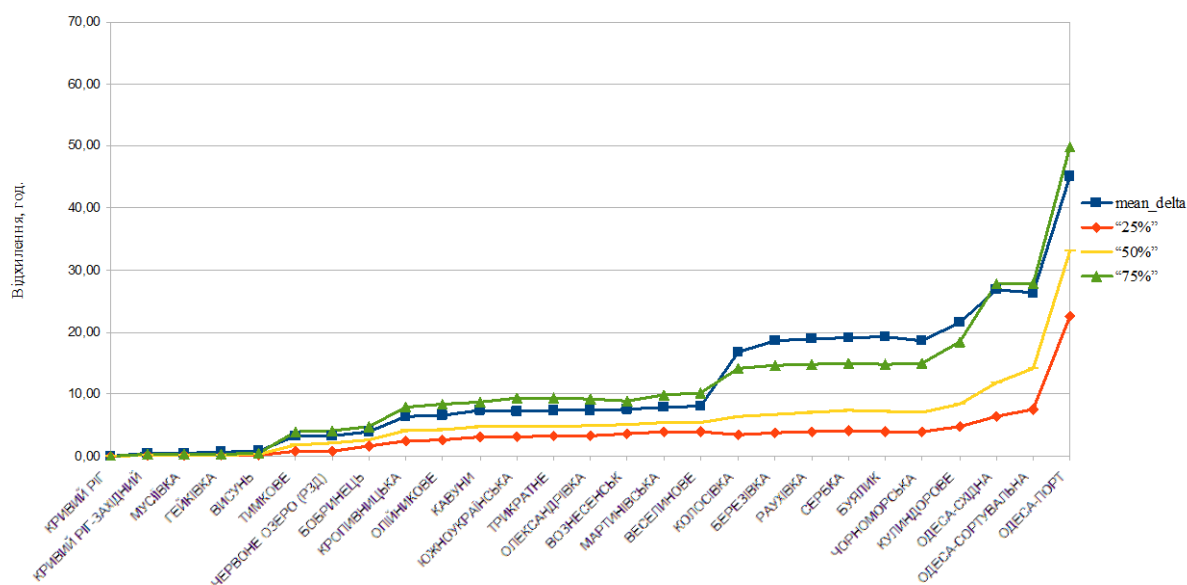


Рис. 1. Відхилення прибуття поїздів на лінії К – О

Fig. 1. Deviation in the arrival of trains on the K – O line

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Уведемо коефіцієнт P_{ij} , який характеризує відхилення часу прибуття поїзда на станцію від запланованого по відношенню до очікуваного відхилення за формулою:

$$P_{ij} = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta_{oc}}, \quad (1)$$

де i – номер станції, а j – номер кроку (0, 25, 50, 75, 100 %); Δ_{ij} – відхилення часу прибуття поїзда на відповідну станцію; Δ_{oc} – середнє відхилення часу.

Чим ближче P_{ij} до 0, тим ближчим є реальний графік руху до запланованого. Якщо коефіцієнт коливається між 0 та 1, то відхилення є, але вони не перевищують очікуваних значень [12]. Коли коефіцієнт більший за 1, графік руху помітно порушений. Оскільки відхилення на-

копичуються, то коефіцієнт зростає як зі збільшенням кількості станцій, так і зі збільшенням кількості поїздів [11].

Знайдемо коефіцієнти k_i та k_j , які характеризують рівень відхилення для кожної станції та для кожного кроку (0, 25, 50, 75, 100 %) за формулами:

$$k_j = \sum_{i=1}^5 \frac{P_{ij}}{5}; \quad (2)$$

$$k_j = \sum_{j=2}^{27} \frac{P_{ij}}{26}. \quad (3)$$

Коефіцієнти відхилення прибуття поїздів на станції лінії К – О наведено в табл. 3.

Таблица 3

Коефіцієнти відхилення прибуття поїздів на станції лінії К – О

Table 3

The coefficients of deviation in the arrival of trains
to the stations of K - O line

№ зп	Станція	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{i4}	P_{i5}	k_i
1	Кривий Ріг	–	–	–	–	–	–
2	Кривий Ріг–Західний	–0,40	0,57	0,87	1,56	234,52	47,42
3	Мусіївка	–0,99	0,57	0,84	1,59	201,82	40,77
4	Гейківка	0,00	0,56	0,90	1,54	174,56	35,51
6	Висунь	–0,09	0,45	0,88	1,67	124,91	25,56
7	Тимкове	–0,10	0,36	0,82	1,82	20,32	4,64
8	Червоне Озеро	–0,02	0,37	0,88	1,75	10,28	2,65
9	Бобринець	0,08	0,52	0,90	1,58	8,58	2,33
10	Кропивницька	–0,12	0,52	0,86	1,62	13,18	3,21
11	Олійникове	–0,01	0,53	0,84	1,63	9,77	2,55
12	Кавуни	0,04	0,56	0,85	1,58	9,16	2,44
13	Южноукраїнська	0,04	0,54	0,83	1,63	8,83	2,37
14	Трикратне	0,14	0,57	0,82	1,61	8,63	2,35
15	Олександрівка	0,11	0,58	0,84	1,59	8,76	2,37

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Продовження табл. 3
Continuation of Table 3

№ зп	Станція	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{i4}	P_{i5}	k_i
16	Вознесенськ	0,15	0,61	0,86	1,53	11,07	2,84
17	Мартинівська	0,16	0,61	0,84	1,55	8,03	2,24
18	Веселинове	0,16	0,60	0,83	1,56	7,92	2,22
19	Колосівка	0,01	0,44	0,80	1,77	29,58	6,52
29	Березівка	0,01	0,46	0,81	1,73	28,26	6,25
21	Раухівка	0,02	0,45	0,83	1,72	27,60	6,12
22	Сербка	0,03	0,46	0,84	1,70	27,13	6,03
23	Буялик	0,01	0,45	0,83	1,72	27,50	6,10
24	Чорноморська	0,01	0,46	0,82	1,72	27,24	6,05
25	Кулиндрове	0,02	0,46	0,79	1,75	22,48	5,10
26	Одеса–Східна	0,07	0,42	0,77	1,81	20,26	4,67
27	Одеса–Сортувальна	0,08	0,46	0,86	1,69	18,81	4,38
24	Одеса–Порт	0,20	0,64	0,94	1,42	9,59	2,56
25	Висунь	–0,09	0,45	0,88	1,67	124,91	25,56
26	Тимкове	–0,10	0,36	0,82	1,82	20,32	4,64
27	Червоне Озеро	–0,02	0,37	0,88	1,75	10,28	2,65
	k_j	–0,02	0,51	0,84	1,65	42,26	

Обчислимо значення загального коефіцієнта відхилення у рядках та стовпчиках (відповіді мають співпасти) за формулами [10]:

$$k = \sum_{i=1}^{27} \frac{k_{ij}}{27} = \sum_{j=1}^5 \frac{k_{ij}}{5}; \quad (4)$$

$$k = \sum_{j=1}^5 \frac{k_j}{5} = \frac{-0,02 + 0,51 + 0,84 + 1,65 + 42,26}{5} = 9,05$$

$$k = \sum_{i=1}^{27} \frac{k_i}{27} = \frac{47,42 + 40,77 + \dots + 4,38 + 2,56}{27} = 9,05$$

Графічне зображення цих коефіцієнтів відхилення відображено на рис. 2.

Як бачимо, коефіцієнти відхилення зростають зі збільшенням кількості поїздів, тобто для 0 % поїздів коефіцієнти коливаються близько 0, для 25 % – близько 0,5, а для 75 % вже перевищують 1,5 [13].

Проаналізуємо всі дані про відхилення часу прибуття поїздів від запланованого, що подані в табл. 1.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

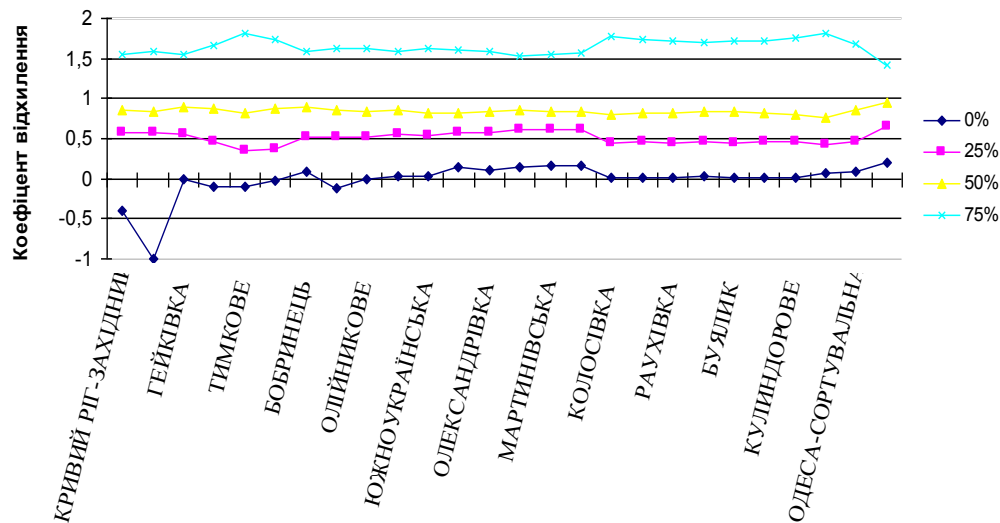


Рис. 2. Коефіцієнти відхилення прибуття поїздів на станції лінії К – О

Fig. 2. The coefficients of deviation in the arrival of trains to the stations of K – O line

Оскільки загальна кількість значень досить велика ($n = 135$), спочатку згрупуємо всі отримані статистичні дані [1].

Кількість груп наближено визначаємо за формулою Стерджеса:

$$m = 1 + 3,2 \lg n = 1 + 3,2 \lg 135 \approx 8$$

Тоді довжина інтервалу буде:

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{m} = \frac{337,88 - (-0,57)}{8} = 42,31,$$

де $x_{\max} = 337,88$ – максимальне значення відхилення; $x_{\min} = -0,57$ – мінімальне значення відхилення.

Отже, усі дані розбиваємо на 8 інтервалів по 42,31 години. За початок першого інтервалу для спрощення обчислень візьмемо мінімальне значення $x_{\min} = -0,57$ [18]. Для кожного частинного інтервалу I_i , $i = \overline{1,8}$ підрахуємо частоти n_i (кількість значень, які потрапляють у вказаний інтервал). Оскільки і кількість інтервалів, і крок були обчислені наближено, перевіримо охоплення інтервалами всіх значень. Найбільше значення $x_{\max} = 337,88$ належать до останнього інтервалу.

Інтервальный статистический ряд розподілу відхилень наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Інтервальный статистический ряд розподілу відхилень

Table 4

Interval statistical series of distribution of deviations

	I_i	n_i
I_1	-0,57 – 41,74	114
I_2	41,74 – 84,05	11
I_3	84,05 – 126,36	0
I_4	126,36 – 168,67	0
I_5	168,67 – 210,98	0
I_6	210,98 – 253,29	7
I_7	253,29 – 295,6	0
I_8	295,6 – 337,91	3

Графічне зображення інтервального статистичного ряду показано на рис. 3.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

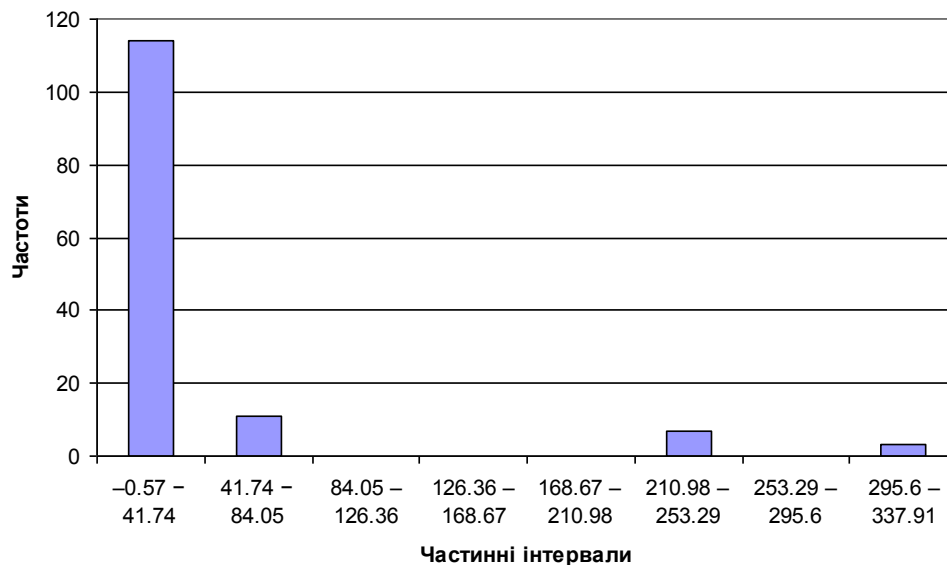


Рис. 3. Гістограма частот

Fig. 3. Histogram of frequencies

Наукова новизна та практична значимість

У статті вперше було введено поняття «коефіцієнт відхилення», який характеризує відхилення часу прибуття поїзда на станцію від запланованого по відношенню до очікуваного відхилення.

Висновки

На основі наведеної математичної моделі можна передбачити приблизну величину запізнення поїздів для залізничної лінії з більшою

кількістю станцій, якщо основні характеристики вантажоперевезення залишаться без суттєвих змін (наприклад, значного поліпшення або погіршення технічних характеристик залізничної інфраструктури).

Спираючись на результати аналізу відхилення часу прибуття поїздів на станцію залежно від прогону, можна зазначити, що простежується прямий взаємозв'язок між запізненням поїздів у годинах та номером станції (тобто відстанню) [15–17]. Результат залишається справедливим для довільної кількості поїздів (було розглянуто 0, 25, 50, 75 та 100 %).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 10-е изд., стереот. – Москва : Высш. шк., 2004. – 479 с.
- Економічна енциклопедія : у 3 т. / відп. ред. С. В. Мочерний. – Київ : Академія, 2000. – Т. 1. – 864 с.
- Елисеева, И. И. Общая теория статистики : учебник / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев ; под ред. И. И. Елисеевой. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Финансы и Статистика, 2001. – 480 с.
- Кириченко, Г. І. Проблематика застосування інформаційних технологій в управлінні процесами доставки вантажу / А. І. Кириченко // Проблеми транспорту : зб. наук. пр. – Київ, 2012. – Вип. 9. – С. 17–27.
- Кириченко, Г. І. Інтелектуальна система управління процесом доставки вантажу / Г. І. Кириченко // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2015. – № 5 (114). – С. 3–6.
- Кириченко, Г. І. Концепція інтелектуальної транспортної системи управління процесами доставки вантажу // Залізничний транспорт України. – 2013. – № 1. – С. 37–40.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

7. Мармоза, А. Т. Теорія статистики : підручник / А. Т. Мармоза. – 2-е вид, перероб. та доп. – Київ : Центр учбової літератури, 2013. – 592 с.
8. Методологічний аспект формування критеріїв ефективного управління залізничною транспортною системою / М. І. Данько, Т. В. Бутько, Д. В. Ломотько, В. В. Козак // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2010. – Вип. 113. – С. 5–9.
9. Общая теория статистики : учебник / под ред. Р. А. Шмойловой. – 3-е изд., перераб. – Москва : Финансы и Статистика, 2002. – 560 с.
10. Титов, Б. А. Транспортная логистика [Електронний ресурс] : электрон. учеб. пособие / Б. А. Титов // docplayer.ru. – Самара, 2012. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/25930451-B-a-titov-transportnaya-logistika.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 22.12.2018.
11. Удосконалення технічного нормування показників експлуатаційної роботи в умовах перерозподілу повноважень структурних вертикалей ПАТ «Укрзалізниця» : матеріали семінару-наради (05–06 черв. 2018 р.). – Львів, 2018. – С. 1–16.
12. Усков, А. А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечёткая логика / А. А. Усков, А. В. Кузьмин. – Москва : Горячая линия-Телеком. 2004. – 143 с.
13. Analysis of Various Approaches to Modeling of Dynamics of Lifting-Transport Vehicles / O. Grigorov, E. Druzhynin, G. Anishchenko, M. Strizhak, V. Strizhak // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. – Iss. 4.3. – P. 64–70. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19553
14. Assessment of cargo delivery quality using fuzzy set apparatus / H. Kyrychenko, Y. Statyuka, O. Strelko, Y. Berdnychenko, H. Nesterenko // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. – Iss. 4.3. – P. 262–265. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19800
15. A standardised language code for rail freight operations / M. Marinov, T. Zunder, R. Arnoldus, C. Moolen // Transport Problems. – 2012. – Vol. 7. – Iss. 2. – P. 141–148.
16. Kirit Mehta, A. Adopting pade approximation for first order plus dead time models for blending process / A. Kirit Mehta, R. Swarnalatha // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. – Iss. 4. – P. 2800–2805. doi: 10.14419/ijet.v7i4.18089
17. Simulation Technique of Kinematic Processes in the Vehicle Steering Linkage / S. Chernenko, E. Klimov, A. Chernish, O. Pavlenko, V. Kukhar // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. – Iss. 4.3. – P. 120–124. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19720
18. Strutynskyi, S. Mathematical Modelling of a Specialized Vehicle Caterpillar Mover Dynamic Processes Under Condition of the Distributing the Parameters of the Caterpillar / S. Strutynskyi, V. Kravchuk, R. Semenchuk // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. – Iss. 4.3. – P. 40–46. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19549

Б. А. ЦЕЙКО^{1*}

^{1*}Каф. «Управление процессами перевозок», Государственный университет инфраструктуры и технологий,
ул. Котельникова, 29/18, Киев, Украина, 03115, тел. +38 (093) 811 09 20, эл. почта boris16@bigmir.net,
ORCID 0000-0002-2636-6321

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ДОСТАВКИ ГРУЗОВ С ПОМОЩЬЮ КОЭФФИЦИЕНТА ОТКЛОНЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ ПОЕЗДА

Цель. Исследование направлено на рассмотрение особенностей исчисления коэффициента отклонения времени прибытия поезда на станцию от запланированного по отношению к ожидаемому отклонению. В настоящее время для управления перевозками грузов применяются подходы, в которых такой показатель как коэффициент отклонения не исчисляется и не учитывается. В практической реализации это приводит к тому, что железная дорога, осуществляя перевозки груза, не получает информацию по отношению номинальных временных отклонений к реальным. Эта ситуация требует решения задач совершенствования действующих технологий перевозочного процесса, связанных с формированием, организацией и отправкой грузов. Поэтому потребности в расчетах таких коэффициентов

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2018/154686

© Б. О. Цейко, 2018

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

являются актуальными. **Методика.** Для достижения цели необходимо ранжировать собранные статистические данные, сгруппировать и проанализировать их. Предложена математическая модель расчета отклонения времени прибытия поездов от запланированного и зависимость данного отклонения от этапа доставки (станции) и количества поездов (в процентах от общего их числа). **Результаты.** Введено понятие «коэффициент отклонения», характеризующий отклонение времени прибытия поезда на станцию от запланированного по отношению к ожидаемому отклонению. Опираясь на результаты анализа отклонения времени прибытия поездов на станцию в зависимости от прогона, можно отметить, что прослеживается прямая взаимосвязь между опозданием поездов в часах и номером станции (то есть расстоянием). Результат остается справедливым для произвольного количества поездов (было рассмотрено 0, 25, 50, 75 и 100 %). **Научная новизна.** Автор впервые ввел понятие «коэффициент отклонения», характеризующий отклонение времени прибытия поезда на станцию от запланированного по отношению к ожидаемому отклонению. **Практическая значимость.** На основании представленной математической модели можно предвидеть приблизительную величину опоздания поездов для железнодорожной линии с большим количеством станций, если основные характеристики грузоперевозки останутся без существенных изменений, например, значительного улучшения или ухудшения технических характеристик железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: отклонение; коэффициент отклонения; среднее отклонение; общий коэффициент отклонения; поезд

B. A. TSEYKO^{1*}

^{1*}Dep. «Transportation Management», State University of Infrastructure and Technologies, Kotelnikov St., 29/18, Kyiv, Ukraine, 03115, tel. +38 (093) 811 09 20, e-mail boris16@bigmir.net, ORCID 0000-0002-2636-6321

EVALUATING THE QUALITY OF CARGO DELIVERY USING THE COEFFICIENT OF DEVIATION IN THE ARRIVAL TIME OF TRAINS

Purpose. The research is aimed at considering the features of calculating the coefficient of deviation in the arrival time of trains to the station from the planned one relative to the expected deviation. Currently, for the management of cargo transportation, one uses the approaches in which such an indicator as the coefficient of deviation is not calculated and not taken into account. In practical implementation, this leads to the fact that the railway transporting cargo does not receive information on the ratio of nominal time deviations to real ones. This situation requires solving the problems of improving the current technologies of the transportation process related to the formation, organization and shipment of cargoes. Therefore, the requirements for the calculation of such factors are relevant. **Methodology.** To achieve the purpose, it is necessary to rank the collected statistics, group them and analyze them. A mathematical model is proposed for calculating the deviation of the train arrival time from the planned one and the dependence of this deviation from the delivery stage (station) and the number of trains (as a percentage of their total number). **Findings.** The concept of «deviation coefficient» has been introduced, which characterizes the deviation of the time of train arrival to a station from the planned relative to the expected deviation. Based on the results of the analysis of the deviation of the train arrival time at the station depending on the run, it can be noted that there is a direct relationship between the lateness of trains in hours and the station number (that is, distance). The result remains valid for an arbitrary number of trains (0, 25, 50, 75 and 100% were considered). **Originality.** The author first introduced the concept of “deviation coefficient”, which characterizes the deviation of the time of train arrival to a station from the planned relative to the expected deviation. **Practical value.** Based on the presented mathematical model, it is possible to foresee an approximate value of the lateness of trains for a railway line with a large number of stations, if the main characteristics of cargo transportation remain without significant changes, for example, a significant improvement or deterioration of the technical characteristics of the railway infrastructure.

Keywords: deviation; deviation coefficient; mean deviation; total coefficient of deviation; train

REFERENCES

1. Gmurman, V. Y. (2004). *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie dlya vuzov*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
2. Mochernyi, S. V. (Ed.). (2000). *Ekonomichna entsyklopediia* (Vol. 1-3). Kyiv: Akademiia. (in Ukrainian)
3. Yeliseeva, I. I. (Ed.), & Yuzbashev, M. M. (2001). *Obshchaya teoriya statistiki*. Moscow: Finansy i Statistika. (in Russian)
4. Kyrychenko, H. I. (2012). Problematyka zastosuvannya informatsiinykh tekhnolohii v upravlinni protsesamy dostavky vantazhu. *Transport Problems*, 9, 17-27. (in Ukrainian)
5. Kyrychenko, H. I. (2015). Intelligence system of a cargo delivery process management. *Information and Management Systems of Railway Transport*, 5(114), 3-6. (in Ukrainian)
6. Kyrychenko, H. I. (2013). Kontseptsiiia intelektualnoi transportnoi systemy upravlinnia protsesamy dostavky vantazhu. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, 1, 37-40. (in Ukrainian)
7. Marmozha, A. T. (2013). *Teoriia statystyky: Pidruchnyk*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury. (in Ukrainian)
8. Danko, M. I., Butko, T. V., Lomotko, D. V., & Kozak, V. V. (2010). Metodolohichniy aspekt formuvannya kryteriiv efektyvnoho upravlinnia zaliznychnoiu transportnoi systemoiu. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 113, 5-9. (in Ukrainian)
9. Shmoylova, R. A. (Ed.). (2002). *Obshchaya teoriya statistiki*. Moscow: Finansy i Statistika. (in Russian)
10. Titov, B. A. (2012). Transportnaya logistika. *docplayer.ru*. Retrived from <https://docplayer.ru/25930451-B-a-titov-transportnaya-logistika.html> (in Russian)
11. *Udoskonalennia tekhnichnoho normuvannya pokaznykiv ekspluatatsiinoi roboty v umovakh pererozpodilu povnovazhen strukturnykh vertykalei PAT «Ukrzaliznytsia»: materialy seminaru-narady (05–06 chervnia 2018 r.)*. Lviv. (in Ukrainian)
12. Uskov, A. A., & Kuzmin, A. V. (2004). *Intellektualnye tekhnologii upravleniya. Iskusstvennye neyronnye seti i nechetkiaya logika*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom. (in Russian)
13. Grigorov, O., Druzhynin, E., Anishchenko, G., Strizhak, M., & Strizhak, V. (2018). Analysis of Various Approaches to Modeling of Dynamics of Lifting-Transport Vehicles. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 64-70. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19553 (in English)
14. Kyrychenko, H., Statyuka, Y., Strelko, O., Berdnychenko, Y., & Nesterenko, H. (2018). Assessment of Cargo Delivery Quality Using Fuzzy Set Apparatus. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 262-265. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19800 (in English)
15. Marinov, M., Zunder, T., Arnoldus, R., & Moolen, C. (2012). A standardised language code for rail freight operations. *Transport Problems*, 7(2), 141-148. (in English)
16. Kirit Mehta, A., & Swarnalatha, R. (2018). Adopting pade approximation for first order plus dead time models for blending process. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4), 2800-2805. doi: 10.14419/ijet.v7i4.18089 (in English)
17. Chernenko, S., Klimov, E., Chernish, A., Pavlenko, O., & Kukhar, V. (2018). Simulation Technique of Kinematic Processes in the Vehicle Steering Linkage. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 120-124. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19720 (in English)
18. Strutynskyi, S., Kravchu, V., & Semenchuk, R. (2018). Mathematical Modelling of a Specialized Vehicle Caterpillar Mover Dynamic Processes Under Condition of the Distributing the Parameters of the Caterpillar. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 40-46. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19549 (in English)

Надійшла до редколегії: 27.07.2018

Прийнята до друку: 21.11.2018

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.64.029

М. Г. ПРИТУЛА^{1*}, О. А. ПАСЕЧНИК^{2*}

^{1*}Центр математичного моделювання НАНУ, вул. Дудаєва, 15, Львів, Україна, 79053, тел. +38 (032) 261 18 85, ел. пошта myroslav.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}ДП «Проектно-конструкторське технологічне бюро з автоматизації систем управління на залізничному транспорті України», вул. Жилинська, 97, Київ, Україна, 01135, тел. +38 (044) 226 24 82, ел. пошта sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГООПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ПОЇЗДІВ

Мета. Робота передбачає розроблення алгоритмічного забезпечення для моделювання й оптимізації режимів руху поїздів. **Методика.** Для описання процесу руху поїзда в просторових координатах із розподіленою масою вздовж траєкторії руху запропонована системна модель. Вона враховує тягові й опірні параметри та їх зміну залежно від зовнішніх і внутрішніх факторів. Для числового інтегрування моделі системи використаний метод скінченних різниць. Крім цього, розроблені ітераційні процедури для задоволення крайових умов, формування послідовності з режимів тяги, гальмування й холостого ходу з відповідними параметрами, щоб забезпечити виконання критерію оптимальності руху й технічних обмежень із достатньою точністю. Критерій оптимальності містить паливно-енергетичні ресурси, частоту зміни режимів роботи тягових засобів (суттєво впливає на зношеність приводів), затратні ставки тощо. **Результати.** Розроблене алгоритмічне, програмне й інформаційне забезпечення дозволило проведення: розрахунків режимів ведення довільних поїздів, зокрема нормативних, для формування графіків руху, розрахунок міжпоїзних і станційних інтервалів, дослідження впливу екстремальних параметрів поїздів на режими їх ведення. У системі передбачена можливість адаптації параметрів моделі руху поїзда за результатами дослідних поїздок. **Наукова новизна.** У роботі запропонована постановка розрахунку режимів ведення поїздів як задачі оптимального керування, з'ясований швидкий метод її розв'язування. Це забезпечило автоматизацію процесу розв'язування великого набору прямих та обернених режимних, із різними критеріями оптимальності, задач. **Практична значимість.** Запропонований підхід щодо постановки й розв'язування задач моделювання та оптимізації режимів ведення поїздів пройшов апробацію в процесі розрахунку основних складових для формування графіків руху, вибору оптимальних параметрів реконструкції полотна для всіх, швидкісних і повільних, типів поїздів.

Ключові слова: тягово-енергетичні розрахунки; оптимальний режим; математичне забезпечення; математична модель поїзда; ідентифікація параметрів моделі; прямі й обернені задачі

Вступ

Тягово-енергетичні розрахунки – одна з центральних проблем ефективного управління перевізними процесами на залізниці. Над постановкою та розв'язуванням цієї проблеми працювали й продовжують роботу багато колективів [1–11]. Протягом усього часу постановка задач і методи їх розв'язування були тісно прив'язані до розвитку обчислювальної техніки

й інформаційних технологій. Тому перші підходи вимагали суттєвого спрощення постановок задач і спеціально поданих вхідних даних, які б дозволили знайти аналітичне представлення розв'язку чи побудувати прості «ручні» ітераційні методи розв'язування відповідних рівнянь. Так, довідники з тягових розрахунків [4] пропонували зображення поїзда у вигляді фізичної точки, рекомендували використовувати тільки номінальні тягові й паливно-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

енергетичні характеристики приводів локомотивів, а для зменшення вхідних даних проводили спрямлення плану та профілю траєкторії руху (колій). Ці та інші спрощення забезпечували постановку однієї задачі – за мінімальний час проходження поїзда між роздільними пунктами. У таких випадках точність моделювання суттєво залежала від діапазону зміни параметрів траєкторії руху поїзда. Тягово-енергетичні розрахунки проводили тільки для певного набору нормативних поїздів не більше ніж один чи два рази на рік. Довідники з тягово-енергетичних розрахунків рекомендували багато обмежень, які спрощували алгоритм розрахунку. Серед рекомендацій було багато варіантів аналітичних і геометричних підходів, які дозволяли проводити розрахунок кривої діаграми швидкості руху «ручним» способом. Перші програмні комплекси були створені з урахуванням рекомендацій щодо наявних вимог до тягових розрахунків. Під час спроби провести оцінку паливно-енергетичних ресурсів за знайденими кривими швидкостей виявилось, що їх величина є суттєво вищою від результатів, отриманих із використанням динамометричних вагонів. У випадку швидкого нарощення вартості паливно-енергетичних ресурсів такі розрахунки уже були незадовільними. Сказане зумовило проведення досліджень для побудови адекватних моделей та алгоритмічного забезпечення, яке б враховувало всі основні фактори впливу на режим руху поїзда й дозволило поставити максимально повний набір прямих та обернених оптимізаційних задач.

Підвищення ефективності експлуатації наявного й перспективного тягового рухомого складу в умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) і постійно змінних нормативів становить важливу науково-технічну проблему. Її практична реалізація полягає у створенні комплексної системи оптимального планування та керування рухом поїзда. Крім того, розв'язок названої проблеми пов'язаний із вирішенням низки важливих питань, таких як формування оптимальних режимів ведення поїздів, розроблення оптимального графіка руху поїздів, створення тренажерних навчальних систем та автоматизованих комп'ютерних систем нормування витрат ПЕР.

Розробленню методів формування оптимальних режимів руху поїздів присвячена значна кількість робіт [1–11]. У них можна виділити такі напрямки досліджень: оптимальні стратегії й методи нелінійного програмування для оптимізації траєкторії швидкості руху поїздів; підходи щодо розроблення дорадчих систем для машиністів; інтегровані моделі для оптимізації режимів і графіків руху поїздів; методи динамічного програмування для забезпечення енерго-ефективних режимів руху поїздів з обмеженнями швидкостей і пропускнуою здатністю; основні принципи оптимального управління рухом поїзда; розроблення моделі і розрахунок оптимальних координат зміни режиму роботи локомотивів тощо.

Практично всі згадані методи й підходи не пройшли апробацію в реальних умовах експлуатації, тому наведені результати в цих роботах є чисто теоретичними. Розроблення максимально універсальних програмних комплексів, які б об'єднували засоби моделювання, планування, ідентифікації, адаптації й оптимального керування процесами та були інтегрованими з інформаційним забезпеченням і засобами їх постійної актуалізації, вимагає наявності досвіду в побудові математичних та імітаційних моделей, методів та алгоритмів мінімальної складності, розподілених інформаційних систем тощо. Крім цього, ще необхідні системні знання (технічні, технологічні, економічні), які стосуються об'єкта дослідження. Досвід реалізації широкомасштабних проектів показав, що традиційні підходи й відомі класичні методи не дають змоги ставити й ефективно розв'язувати задачі, які б задовольнили сучасні вимоги щодо їх якості за функціональністю, надійністю, зручністю використання, продуктивністю, адаптивністю тощо. У зв'язку з цим завершені наукоємні програмні продукти промислового значення, необхідні для практичного використання, в основному є відсутніми.

В окремих роботах [7] запропоновано, для розв'язування задач оптимізації режимів руху поїздів використовувати класичні математичні інструменти; проте не наведено будь-яких прикладів їх використання. Результати приведені в монографії [1, 186–191] дають розуміння того, що для розв'язування задач такого рівня складності реалізувати класичні підходи прак-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тично нереально. Для отримання результатів необхідно розробляти нові методи, які б максимально використовували особливості об'єкта дослідження: фізику процесів, наявні емпіричні залежності, результати аналізу замірів отриманих із використанням динамометричних вагонів, тощо.

Розв'язати задачу оптимального керування рухом поїзда не вдається класичними методами, оскільки всі змінні, які його характеризують, є нелінійними, багатопараметричними, зі змінними обмеженнями, а деякі вхідні дані є слабо прогнозованими. Крім цього, важливим є унікальність об'єкта за набором факторів впливу, зосереджених і розподілених, дискретних і неперервних, які нелінійним чином впливають на процес руху [14].

Мета

Ураховуючи вищезазначене, метою статті є: побудувати математичні моделі основних типів тягових засобів і поїздів із розподіленою масою вздовж траєкторії руху; розробити ефективне алгоритмічне забезпечення для моделювання й оптимізації процесу руху поїздів за заданими критеріями оптимальності; розв'язати необхідний набір прямих та обернених тягових і енергетичних задач для систем побудови оптимальних графіків і розрахунку параметрів безпечного руху на перегонах і роздільних пунктах.

Методика

Для досягнення поставленої мети використані засоби математичного й імітаційного моделювання. Розроблена математична модель руху поїзда в просторових координатах із розподіленою масою вздовж траєкторії руху реалізується за допомогою числового інтегрування методом скінченних різниць. Для процесу керування локомотивами розроблені детальні імітаційні моделі, які відтворюють їх роботу з урахуванням реальних тягових, енергетичних характеристик і наявних зовнішніх впливів тощо. Поставлені оптимізаційні задачі розв'язані розробленими методами дискретної (комбіаторної) оптимізації.

Результати

Математичне описання моделі поїзда ґрунтується на класичних положеннях теорії локомотивної тяги, уявленні про поїзд як об'єкт керування, а також враховує основні розрахункові залежності, визначені в нормативній літературі [12]. Питання теоретичного описання руху поїзда докладно розроблені у згаданих джерелах. Однак у них багато положень, які стосуються руху поїзда як фізичної точки з використанням тільки номінальних тягових характеристик. Певні обмежувальні рекомендації довелося видозмінити, бо вони не дозволяли поставити коректно математичну задачу оптимального керування поїздом із розподіленою масою вздовж його складу з урахуванням повної множини важливих обмежень і тягово-енергетичних характеристик. У більшості випадків рекомендації, наведені в нормативній літературі, дозволяли постановку тільки однієї задачі, як вже було сказано, руху поїзда за мінімальний час.

Параметри руху поїзда v , F_m , B (швидкість руху, сила тяги й гальмівна сила) задовольняють рівняння:

$$\frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\eta(\vec{F}_m \pm \vec{W}_k - \vec{B})}{Q + P} \quad (1)$$

за обмежень

$$v \leq v_m(s), \quad \tau_\infty(1 - e^{t/T}) + \tau_0 e^{t/T} \leq T_m, \quad (2)$$

тут $\vec{F}_m(I)$ – тягова сила, Н; \vec{B} – гальмівна сила, Н; Q – маса вагонів, Н; P – маса локомотива, т; τ_0 – різниця між температурою обмоток тягових двигунів і температурою повітря, °С; τ_∞ , T – значення теплових параметрів, що залежать від величини струму, який використовує тяговий двигун; T_m – максимально допустима температура нагрівання обмоток тягових двигунів, °С; η – коефіцієнт інерції обертових мас поїзда, км/год²; $W_k = F_{on} + F_{ood}(i_k, R, T_p, V_b, n)$, де \vec{F}_{ood} – сила додаткового опору, яка залежить від ухилу, (‰); радіуса кривизни R траєкторії переміщення, м; температури повітря T_p , °С;

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

швидкості зустрічного вітру V_b , м; кількості увімкнених підвагонних генераторів n ; t – час, год.

Поїзд – це упорядкований набір $(l_1, \dots, l_j, d_1, d_2, \dots, d_k)$ однотипних локомотивів l_i ($i=\overline{1, j}$) і вагонів d_i ($i=\overline{1, k}$). Порядок розміщення локомотивів у поїзді може бути різним.

Локомотиви є різних типів. Тип локомотива визначають за параметрами: масою m_j , довжиною l_j , кількістю осей k_j , силою натиску гальмівних колодок на вісь K_j , конструктивною швидкістю v_{kj} , затратами палива в режимі холостого ходу G_{xj} (для тепловозів і дизель-поїздів), затратами електроенергії на внутрішні потреби E_{0j} , коефіцієнтом зчеплення коліс із рейками дороги ψ_j .

Повна гальмівна сила поїзда є такою:

$$B_r = \sum \phi_k(K, v) K_k,$$

де ϕ_k – коефіцієнт тертя гальмівних колодок; K_k – сила натиску гальмівних колодок на бандаж.

Основний опір рухові локомотива в режимі тяги визначають за емпіричною формулою:

$$W'_0 = m_j(a_j + b_j v + c_j v^2),$$

опір рухові в режимі холостого ходу:

$$W_x = m_j(e_j + f_j v + g_j v^2),$$

де a_j , b_j , c_j , e_j , f_j , g_j – коефіцієнти для певного типу локомотива й типу колії (ланкова або безстікова).

Коефіцієнт зчеплення коліс із рейками ψ обмежує максимальну силу тяги локомотива ($F_{\max} \leq \psi(v, R)P$). Цей коефіцієнт є різним для різних типів локомотивів.

Привід кожного локомотива має набір із n_j позицій $\{p_{jk}, k=\overline{1, n_j}\}$. Для кожної позиції відомі інтервали її дії за швидкістю, силою тяги $\vec{F}_j(p_{jk}, v)$, струмом $I_j(p_{jk}, v)$. Для силових

позицій є відомими теплові характеристики двигунів: температура перегріву $\tau_{\infty j}(p_{jk}, v)$

й теплова постійна $T_j(p_{jk}, v)$ (для електровозів, моторних вагонів електропоїздів, тепловозів, моторних вагонів дизель-поїздів), паливні характеристики $G_j(p_{jk}, v)$ (для тепловозів, тепловозів із гідравлічною передачею, моторних вагонів дизель-поїздів, моторних вагонів дизель-поїздів із гідравлічною передачею).

Тягові характеристики локомотивів мають обмеження за ресурсами й надійністю роботи; тепловозів – за конструктивною швидкістю й параметрами дизеля, тягової передачі, зчеплення; електровозів – за конструктивною швидкістю й параметрами тягових двигунів, зчеплення.

Характеристики тягового режиму електро-воза поділяють на електромеханічні, електротягові й тягові. Електромеханічні характеристики називають характеристиками тягових двигунів, віднесених до валу якоря, а саме:

$$n_d = f_1(I_d); M = f_2(I_d); \eta_d = f_3(I_d),$$

тобто, залежність числа обертання якоря n_d , моменту M і ККД η_d від струму I_d за постійного значення U_d на клеммах двигуна.

Електротягові характеристики є віднесеними до ободу рухомого колеса:

$$v = f_4(I_d); F = f_5(I_d); \eta_e = f_6(I_d),$$

тобто, залежність швидкості v , сили тяги F і ККД двигуна з передачею η_e від струму якоря I_d .

Електротягові характеристики розраховують на основі електромеханічних характеристик тягового двигуна, заданого діаметру D рухомих коліс, передаточного числа μ і η_n – ККД передачі або ΔP_n – втрат у передачі. Швидкісну характеристику локомотива розраховують за формулою:

$$v = \frac{\pi D n 60}{100 \mu} = 0.188 \frac{D}{\mu} n \left[\frac{\text{км}}{\text{год}} \right],$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

а дотичну силу тяги можна знайти із рівняння:

$$F_{\partial} = 2 \frac{\mu}{D} M \eta_n = 0.367 \frac{U_{\partial} I_{\partial}}{v} \eta_n [H],$$

а $\eta_e = \eta_0 - \Delta P_n$. Втрати енергії в передачі можна знайти на основі даних табл. 1 [5].

Таблиця 1

Втрати енергії в передачі від тягових двигунів до коліс

Table 1

Energy losses in the transmission from the traction motors to the wheels

$I/I_{\text{зод}}$	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	1	1,25	1,5	2
ΔP_n	0,085	0,067	0,044	0,032	0,027	0,025	0,025	0,027	0,030	0,035

Тягові характеристики $v = f(F_{\kappa})$ отримують із електротягових виключенням I_{∂} . За усталеного електричного режиму швидкість руху електровоза знаходять за формулою:

$$v = \frac{U - Ir}{C\Phi}.$$

За даного струму на вході двигуна його швидкість можна міняти зміною напруги U на колекторі або зміною магнітного потоку Φ тягового двигуна.

Вагони характеризуються типом j , масою m , типом гальмівних колодок, габаритами, довжиною l_j , масою тари m_{0j} , кількістю осей k_j , силою натиску колодок на бандаж K_j .

Основний опір руху вагонів на ланковій і безстиківій коліях визначають такою емпіричною формулою:

$$W_0^* = \left(a_j + \frac{b_j + c_j v + e_j v^2}{q_0} \right) m,$$

де a_j , b_j , c_j , e_j – коефіцієнти, залежні від типу вагона, v – швидкості руху, q_0 – маси, яка припадає на одну вісь колісної пари.

Розглянемо сили, які протидіють рухові. Розрізняють основний і додатковий опір рухові. За основний беруть опір, який діє на поїзд під час руху вздовж прямого горизонтального шляху з рівномірною швидкістю за нормальних метеорологічних умов. Для локомотива розріз-

няють ще опори руху в режимі тяги й за її відсутності. До основного належать також опори внаслідок: тертя між шийками осей і підшипниками, кочення коліс по рейках, ударів коліс об стики рейок, повітряного середовища. До додаткових відносять опори внаслідок: ухилу та кривизни траєкторії руху, зміни метеорологічних умов, роботи підвагонних генераторів, руху з місця.

Силу опору рухові обчислюють за формулою:

$$W = (W' + W'') K_{\text{нт}} K_{\epsilon} + W_i + W_r + W_{nz} + W_{\text{руш}},$$

де W' та W'' – основні опори локомотивів і вагонів відповідно; $K_{\text{нт}}$ та K_{ϵ} – коефіцієнти опору внаслідок низької температури й наявності вітру (залежать від температури $t_{\text{зн}}$, густини повітря ρ , швидкості вітру v_{ϵ} та швидкості руху поїзда v); W_i – опір від ухилу ($W_i = \pm iM$, де $\pm i$ – значення ухилу ділянки руху в проміле (‰), M – маса вагона (локомотива)); W_r – опір, зумовлений кривизною траєкторії; W_{nz} – опір від підвагонних генераторів; $W_{\text{руш}}$ – опір під час рушання з місця.

$W_r = \left(\frac{200}{R} + 1.5\tau_{\kappa} \right) \frac{s_{\text{кр}}}{l_n} M [\kappa \text{с} / \text{м}]$, де $R, s_{\text{кр}}$ – радіус та довжина кривої відповідно, м; l_n – довжина поїзда, м; τ_{κ} – непогашене прискорення в кривій, яке обчислюють за наступною

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

формулою: $\tau_k = \frac{v^2}{13R} - \frac{h}{s_k} g [M / сек^2]$, де h –

підвищення зовнішньої рейки, мм;
 s_k – відстань між кругами кочення коліс, мм;
 W_{nz} – опір від підвагонних генераторів.

$W_{nz} = \frac{136P'}{q_0 v} M$, де P' – середня потужність

підвагонного генератора, кВт.

$W_{пуи} = k \frac{a}{q_0 + 7} M$, де a – коефіцієнт, який за-

лежить від типу підшипників вагона (локомотива); k – коефіцієнт, який залежить від кількості вагонів у поїзді.

Для всіх типів вагонів (локомотивів) встановлені емпіричні залежності, які дозволяють визначати основну й додаткову сили опору руху. Під час розрахунків вважають, що всі сили, які діють на вагон чи локомотив, зосереджені в його центрі мас. Координати центра мас дають можливість ідентифікувати (встановити координати) місце розташування вагона чи локомотива на траєкторії руху.

Режим руху поїзда здійснюється чергуванням режимів тяги, холостого ходу (за відсутності режиму тяги) й гальмування. Режим тяги може відбуватися за різних тягових позицій. Тяговим відповідають відповідні струменеві позиції. Режим гальмування визначається величиною гальмівної сили, яка залежить від сумарної сили притискання гальмівних колодок до бандажів коліс або до дисків, встановлених на осях. Гальмівна сила виникає також у процесі переведення тягових електродвигунів у генератори струму (електричне гальмування). Гальмування може супроводжуватися рекуперацією (поверненням електроенергії в мережу) й роботою тягових електродвигунів на опір рухові (реостатне гальмування).

Траєкторія руху поїзда $s(x), x \in [x_0, x_n]$, де x_0, x_n – початкова й кінцева координати сусідніх роздільних пунктів (станцій). Траєкторія руху представлена як послідовність $[x_i, x_{i+1}]$ лінійних $L_{ij}(l, i)$, які визначаються ухилом i й довжиною l , та криволінійних елементів $R_{ij}(R, l)$, що визначаються довжиною l і радіусом кривизни R . Уздовж траєкторії руху

$s(x), x \in [x_0, x_n]$ задають максимально допустиму швидкість руху

$v_{j,j+1}(x), x \in [x_j, x_{j+1}] \subset [x_0, x_n]$.

Будемо вважати, що типи локомотивів і їх технічні, тягово-енергетичні й опірні параметри є відомі, також для кожного вагона заданий тип, маса вантажу та його опірні параметри.

Інтегрування диференціального рівняння руху (1) вимагає багатократного розв'язування прямих та обернених задач. Ітераційний процес побудовано таким чином, що він проходить за траєкторією руху необхідний шлях уперед, потім повертається необхідну кількість разів назад, поки не задовольнить усі умови на оптимальність, виконання технічних і технологічних обмежень, неперервність траєкторії швидкості. Важливо, що такий алгоритм не вимагає заздалегідь знання всіх умов, які впливають на оптимальність руху, і тому він є адаптивним до можливих змін у процесі руху. Алгоритм у максимальній мірі реалізовує наявний потенціал оптимізації.

Траєкторія швидкості режиму руху поїзда за мінімальний час є максимально близькою до максимально допустимої. Такий режим руху формується під час використання максимально можливих силових характеристик тяги й гальмівної сили та мінімально можливої частоти зміни тягових позицій. Для цього критерію оптимальності економія паливно-енергетичних ресурсів не передбачена.

Оптимізація режиму здійснюється тільки у випадку наявності задання часу на переміщення, який перевищує мінімальний. Енергетичні затрати нелінійно залежать від швидкості руху. У разі зміни швидкості руху (зміни силових позицій) у напрямку її збільшення затратні величини зростають на значну величину. Тому для зменшення затрат проводять мінімізацію кількості й величини перехідних режимів. Втрати інерції руху й, відповідно, енергії відбуваються в режимі використання гальмівної сили. Якщо дозволяє час, варто економити інерційний потенціал у режимі холостого руху й гальмування (пригальмовування) проводити максимально пізніше і тільки для того, щоб забезпечити рух за заданий час.

Алгоритм оптимізації вимагає багатократних розрахунків режиму руху. Зменшення ене-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ргетичних затрат проводять за допомогою: коригування в сторону зменшення максимальних швидкостей на окремих ділянках перегону (при цьому зменшується кількість і величини перехідних режимів), використання мінімально можливих тягових позицій і режиму гальмування; використання в максимальній мірі інерції руху на підйомах і спусках тощо. Процес розрахунку завершується за умови достатньої близькості розрахованого часу руху до заданого.

Для забезпечення максимального рівня автоматизації процесу розв'язування оптимізаційних задач формування оптимальних режимів поставлена як задача оптимального керування рухом поїзда. Розроблення підходів щодо її розв'язування дозволило забезпечити максимальний рівень автоматизації процесу розв'язування великого набору оптимізаційних задач. Керування – послідовний набір параметрів зміни режимів тяги, холостого ходу й гальмування. Зміна керування формується за умов досягнення меж коридору швидкостей $[v_{\max}(s), v_{\min}(s)]$ на заданому інтервалі траєкторії руху $s \in [s_i, s_{i+1}]$. Вибір ширини меж зміни швидкостей дозволяє регулювати частоту зміни керування. Корегування верхньої межі швидкості в напрямку її зменшення, для окремих додаткових умов, є одним із важливих складових алгоритму розв'язування оптимізаційних задач. Холостий хід на інтервалі часу характеризується координатою початку й швидкістю в кінцевій координаті $[s_p, v(s_k)]$, гальмування визначається силою натиску гальмівних колодок на бандаж, початок – координатою чи швидкістю руху, а завершення – координатою і швидкістю руху.

У загальному випадку задача розрахунку режимів ведення поїздів вимагає задання:

- траєкторії руху поїзда $s(x), x \in [x_0, x_n]$ у просторових координатах;
- поїзда, тобто впорядкованого набору $(l_1, \dots, l_j, d_1, d_2, \dots, d_k)$ одностипних локомотивів l_i ($i = \overline{1, j}$) і вагонів d_i ($i = \overline{1, k}$);

- зовнішніх умов – напрям вітру, температура повітря, стан підвагонних генераторів тощо;

- додаткових умов – час руху, частота зміни силових позицій тощо;

- крайових умов для початкової й кінцевої координати траєкторії руху на швидкість.

За заданими даними необхідно знайти:

- траєкторію швидкості руху поїзда $v(x), x \in [x_0, x_n]$;

- траєкторію зміни паливно-енергетичних параметрів уздовж траєкторії руху;

- режим роботи тягових засобів;

- траєкторію зміни температури нагрівання обмоток якорів двигунів за електричної тяги;

- $t_{\min}(x_0, x_n)$ – мінімальний час на проходження траєкторії руху;

- мінімальні паливно-енергетичні затрати й раціональну експлуатацію тягових засобів за заданого часу $t(x_0, x_n)$ ($t(x_0, x_n) \geq t_{\min}(x_0, x_n)$) на переміщення;

- сумарні затрати паливно-енергетичних параметрів (за витратними ставками на перевезення);

- максимальну масу поїзда;

- залежність між масою, часом руху й енергетичними затратами поїзда для різних типів локомотивів;

- оптимальний час руху тільки за енергетичним критерієм;

- необхідну мінімальну додаткову тягу під час проходження перевалів;

- мінімальну швидкість на окремих перегонах руху, яка гарантує рух без зупинки та без додаткової тяги.

Система розрахунку режимів руху поїздів складається з інформаційного забезпечення, задання розрахунку, алгоритмічного й програмного забезпечення, табличного й графічного представлення результатів моделювання (рис. 1–5).

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

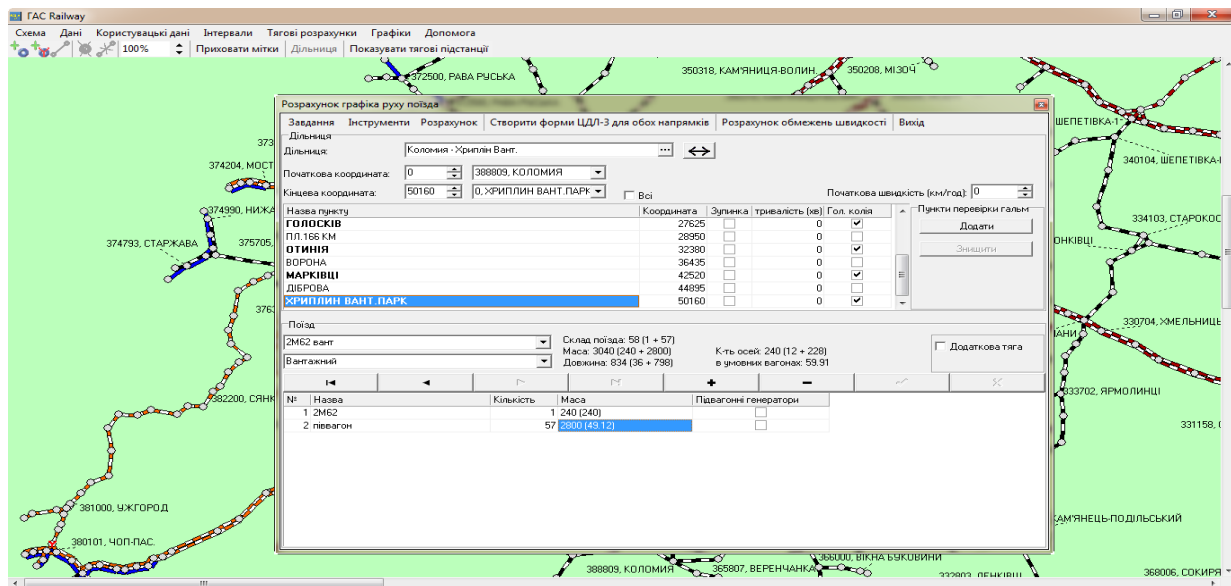


Рис. 1. Діалогове вікно вибору шляху руху й задання на розрахунок режиму руху поїзда

Fig. 1. Dialog box for choosing a way of motion and task for calculation of the train's operating condition

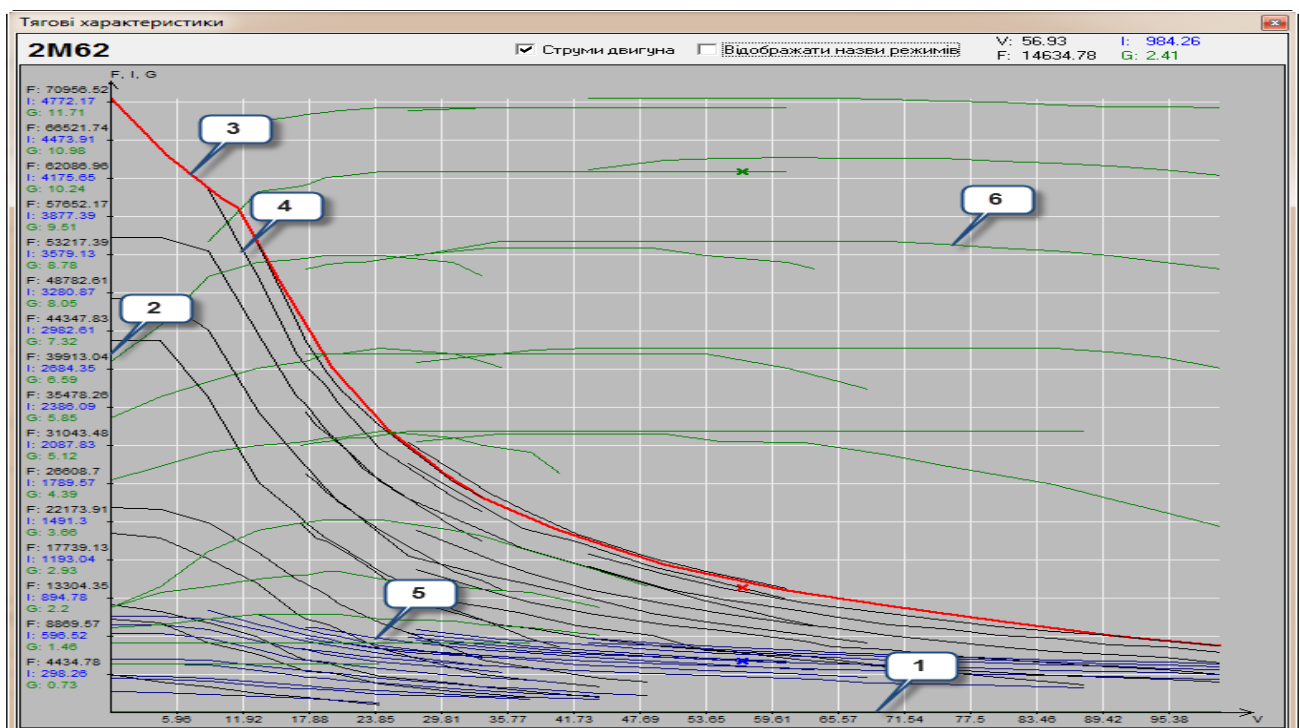


Рис. 2. Тягові (2, 3, 4), струменеві (1, 5) і паливні (6) характеристики локомотива 2М62

Fig. 2. Traction (2, 3, 4), jet (1, 5) and fuel (6) characteristics of the locomotive 2M62

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

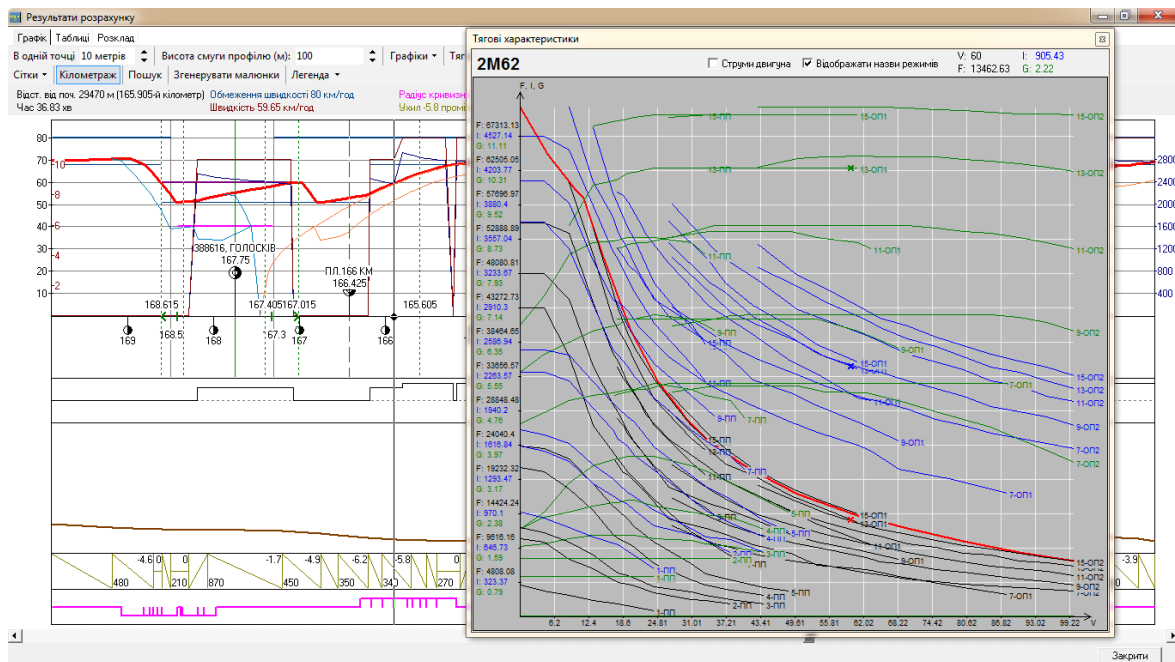


Рис. 3. Графічне представлення результатів і робочих точок на схемі – тягові й струменеві характеристики локомотива 2М62

Fig. 3. Graphical presentation of results and operating points at the scheme – traction and jet characteristics of the locomotive 2M62

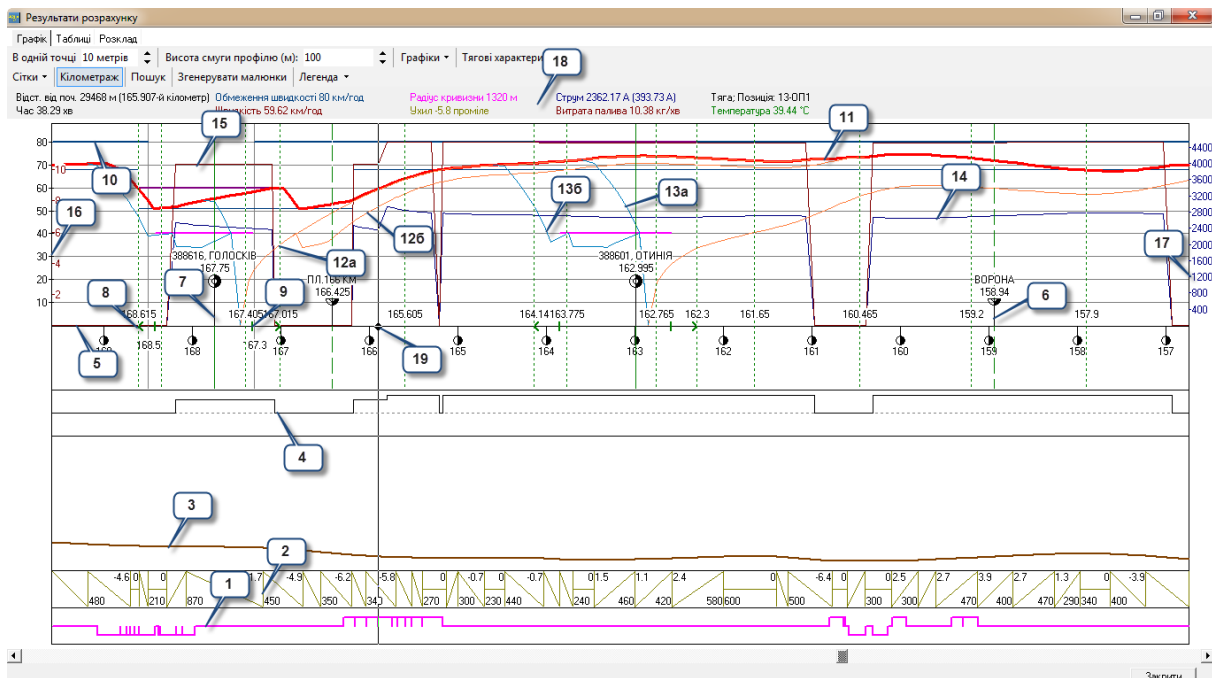


Рис. 4. Представлення інформаційного забезпечення й результатів моделювання за заданим критерієм оптимальності

Fig. 4. Presentation of information support and simulation results by the given criterion of optimality

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

На рис. 4 наведена наступна графічна формація:

1. поздовжній план колії в елементах (прямі, криві ділянки);
2. елементи профілю колії (довжина елемента, ухил);
3. поздовжній профіль колії;
4. діаграма режимів ведення локомотива (використання тяги по позиціях);
5. кілометрова розмітка лінії;
6. посадкова платформа на перегоні;
7. роздільний пункт (станція, блокпост, роз'їзд);
8. вхідна стрілка роздільного пункту;
9. межа роздільного пункту;
10. допустима швидкість руху;
11. діаграма швидкості руху поїзда;

12. діаграма сповільнення поїзда за умови зупинки на роздільному пункті:

а) слідування по головній колії;

б) слідування по бічній колії;

13. діаграма розгону поїзда за умови зупинки на роздільному пункті:

а) слідування по головній колії;

б) слідування по бічній колії;

14. діаграма сили струму, А;

15. діаграма миттєвих витрат палива, кг/хв;

16. шкала осі сили струму;

17. шкала осі швидкостей руху;

18. інформаційне вікно;

19. бігунок курсора (за яким відображаються дані в інформаційному вікні й у вікні тягових характеристик)

Результати розрахунку

ГрафікТаблицяРозклад

Зберегти таблицюСтворити форму ЦДП-3Створити форму попереджень

роздільний пункт		координата		план - профіль		розрахунок руху				енергетика	
назва	поч. (м)	кінц. (м)	ухил	R кривої (м)	V макс. (км/год)	V (км/год)	шлях (м)	час (с)	стан	струм (А)	температура (°C)
370307. Сквили	715					0	0 (км)			0 (кВт.год)	
	715	800	-6,4	0	80	0	0	0	Тяга; Позиція: 5-П	375	19,33
	800	1000	-8,2	0	80	31,53	85	19,41	Тяга; Позиція: 17-П-ОП2	1276,79	20,67
	1000	1020	-8,2	0	80	49,13	285	37,27	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	2098,56	20,77
	1020	1220	-7,7	0	80	50,72	305	38,71	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1988,5	21,59
	1220	1397	-7,7	0	80	63,61	505	51,3	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1995,91	22,2
	1397	1430	-7,7	0	80	72	682	60,7	Холостий хід	0	22,19
	1430	1630	-4	0	80	72,21	715	62,35	Холостий хід	0	22,14
	1630	1710	-4	0	80	73,46	915	72,23	Холостий хід	0	22,12
	1710	1910	1,3	0	80	73,72	995	76,15	Холостий хід	0	22,07
	1910	1943	1,3	0	80	74,22	1195	85,88	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1700,87	22,15
	1943	1980	1,3	0	91	75,02	1228	87,47	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1680,84	22,23
	1980	2180	-3,5	0	91	75,87	1265	89,24	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1659,82	22,66
	2180	2280	-3,5	0	91	79,9	1465	98,48	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1588,66	22,85
	2280	2296	-9,4	0	91	81,65	1565	102,94	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1559,45	22,88
	2296	2320	-9,4	0	91	81,9	1581	103,65	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1555,23	22,92
	2320	2430	-9,4	950	91	82,31	1605	104,7	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1548,32	23,11
	2430	2590	-3,3	950	91	84,19	1715	109,45	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1516,94	23,36
	2590	2660	-3,3	0	91	87,16	1875	116,18	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1467,23	23,46
	2660	2826	1,9	0	91	88,34	1945	119,05	Тяга; Позиція: 29-П-ОП3	1447,4	23,68
	2826	2990	1,9	0	91	91	2111	125,71	Холостий хід	0	23,64
	2990	3125	0	0	91	90,47	2275	132,22	Холостий хід	0	23,61
	3125	3190	0	980	91	89,55	2410	137,62	Тяга; Позиція: 25-П-ОП1	681,6	23,62
	3190	3390	-7,7	980	91	89,53	2475	140,23	Тяга; Позиція: 25-П-ОП1	681,79	23,67
	3390	3440	-7,7	980	91	89,34	2675	148,28	Холостий хід	0	23,65
	3440	3470	-7,7	-1050	91	89,15	2725	150,3	Холостий хід	0	23,65
	3470	3675	-2,8	-1050	91	89,06	2755	151,51	Холостий хід	0	23,59
	3675	3800	-2,8	-1050	80	80	2960	160,24	Холостий хід	0	23,56
	3800	3815	1,7	-1050	80	79,9	3085	165,87	Холостий хід	0	23,55
	3815	3930	1,7	0	80	79,89	3100	166,55	Холостий хід	0	23,52
	3930	4130	4	0	80	79,81	3215	171,73	Холостий хід	0	23,46
	4130	4185	7,7	0	80	79,04	3415	180,8	Тяга; Позиція: 25-П	595,89	23,47
	4185	4230	7,7	-590	80	78,97	3470	183,3	Тяга; Позиція: 29-П	815,94	23,48
	4230	4430	6	-590	80	78,97	3515	185,36	Тяга; Позиція: 25-П-ОП1	785,43	23,57
	4430	4510	6	-590	80	78,67	3715	194,49	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1087,7	23,63
	4510	4665	6	0	80	78,62	3795	198,15	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1088,55	23,75
	4665	4865	6	-1000	80	78,36	3950	205,26	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1092,74	23,89
	4865	4880	6	-1000	80	77,93	4150	214,47	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1100,14	23,9
	4880	4895	9	-1000	80	77,91	4165	215,17	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1100,63	23,92
	4895	5030	9	0	80	77,88	4180	215,86	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1101,1	24,02
	5030	5230	6,9	0	80	77,65	4315	222,11	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1105,35	24,17
	5230	5358	0	0	80	77,12	4515	231,41	Тяга; Позиція: 29-П-ОП1	1115,38	24,27
370311. Оброшин	5358					4643	3,96 (км)			169,95 (кВт.год)	
	5358	5430	0	0	80	76,81	4643	237,4	Тяга; Позиція: 25-П-ОП2	1012,82	24,33
	5430	5480	0	0	80	76,71	4715	240,78	Тяга; Позиція: 25-П-ОП1	810,43	24,36
	5480	5650	-2,3	0	80	76,57	4765	243,13	Тяга; Позиція: 25-П-ОП1	812,06	24,44
	5650	5760	-2,3	3500	80	76,26	4935	251,14	Тяга; Позиція: 25-П	617,51	24,45
	5760	5800	-2,3	0	80	76,23	5045	256,33	Холостий хід	0	24,44
	5800	6000	-2,3	590	80	75,99	5085	258,22	Холостий хід	0	24,38
	6000	6110	-2,3	590	80	74,99	5285	267,76	Холостий хід	0	24,34

Час ходу (хв):180,74

Загальні витрати електроенергії (кВт.год):7595,16

Основа - додаткова тяга

Закрити

Рис. 5. Розрахована режимна карта руху поїзда в табличному вигляді

Fig. 5. Calculated mode map of the train motion in a tabular form

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Наведемо приклади розв'язування основних режимних оптимізаційних задач.

Приклад 1 – розрахунок максимальної маси поїзда. Розрахунок максимальної маси поїзда проведено для заданої серії локомотивів, розрахункової ділянки за умов максимальної реалізації кінетичної енергії руху поїзда і його тягових характеристик. На рис. 6 наведені результати числового експерименту.

У результаті розрахунку отримано, що для локомотивів типу 2М62 й М62 максимальна допустима маса є рівною – 1 782 й 892 відповідно. Збільшення маси призведе до зупинки поїзда у вказаних координатах траєкторії руху (рис. 6). Для збільшення маси поїзда необхідна додаткова тяга.

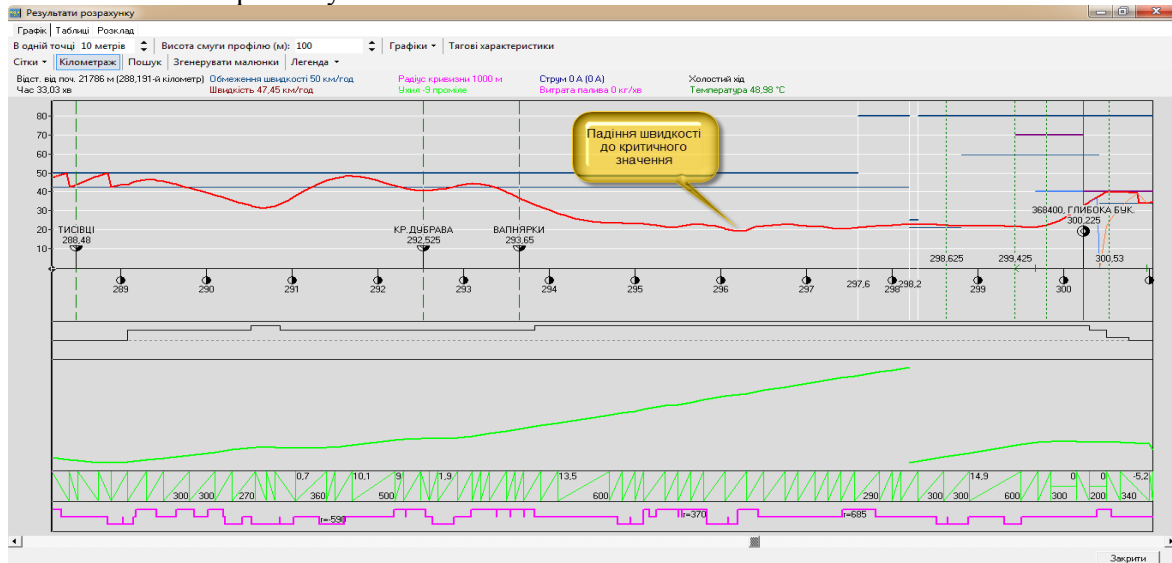


Рис. 6. Графічне представлення результатів числового експерименту

Fig. 6. Graphical representation of the results of the numerical experiment

Приклад 2 – розрахунок поїздів із різною кількістю вагонів. Розрахунки проведені на ділянках Чернівці Південні – Великий Ку-

чурів і Вигнанка – Гадинківці – Копичинці. Траєкторії швидкості руху наведені на рис. 7.

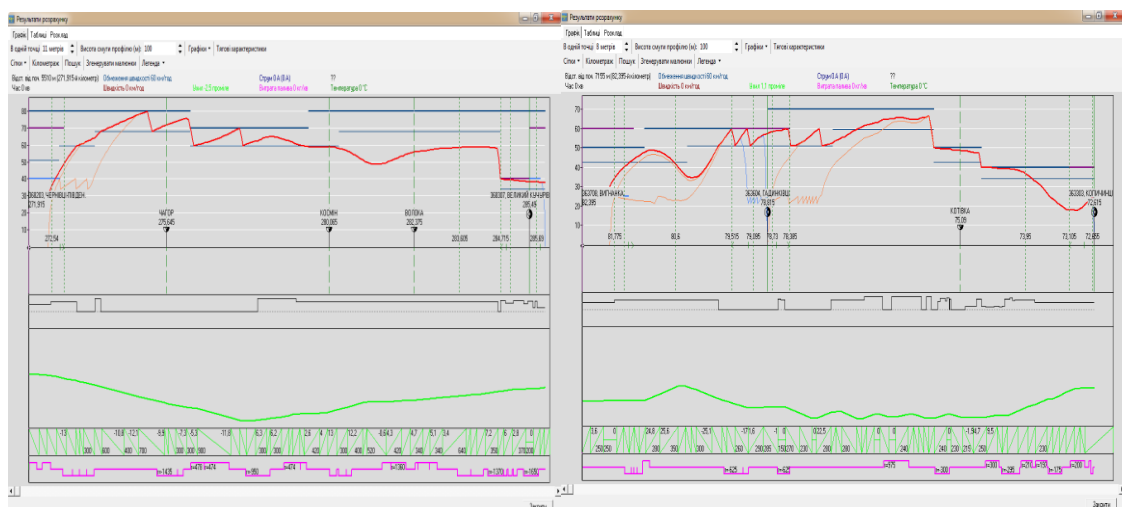


Рис. 7. Траєкторія швидкості руху поїзду: 57 вагонів – зліва, 15 вагонів – справа

Fig. 7. Trajectory of the speed of trains: 57 cars - left, 15 cars - right

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Наведено по два приклади ведення поїзда на різних ділянках із різною кількістю вагонів. В обох випадках використаний локомотив серії 2М62, склад поїзда масою 1 250 т, режим ведення поїзда – з максимально допустимою швидкістю (мінімум часу). У першому варіанті розрахунку склад поїзда 57 вагонів, у другому – 15 вагонів. На ділянці Чернівці Південні – Великий Кучурів час ходу поїзда зі складом у 57 вагонів на 2 хв більший, ніж у короткого складу, витрата палива також збільшена на 12 %. На ділянці Вигнанка – Гадинківці – Копичинці час ходу обох складів поїздів практично не відрізняється, а витрата палива у довшого складу поїзда виявилася меншою на 3,8 %. Для поїзда з більшою кількістю вагонів необхідна менша тяга для руху по місцевості зі значними перепадами висот.

Приклад 3 – вплив окремих обмежень на режим руху. Проведені числові експерименти для оцінки впливу на режим руху поїзда окремих обмежень. Для цього взяті ділянки Здолбунів – Ківерців і поїзд із 57 вагонів загальною масою 1 438 т і локомотивом ВЛ-80к. Довжина шляху дорівнює 81,130 км. Кількість зупинок на проміжних станціях – 4. Переходити в режим гальмування дозволили за швидкості 60 км/год. Отримані такі результати розрахунків:

- зміна частоти тягових позицій величинами інтервалу швидкості руху в межах 5–15 % збільшує на 2,8 % час руху і зменшує енергетичні затрати на 2,35 %;
- використання режиму гальмування за швидкостей 40 і 20 км/год збільшує час руху на 4 й 10 хв і зменшує затрати електроенергії в межах 5 і 7,5 % відповідно;
- зменшення верхніх обмежень на швидкість до 15 % призводить до зменшення енерговитрат на 3,5 % і збільшення часу на рух на 9,7 %.

Приклад 4 – вплив зміни тяги. Розрахунки проведені на ділянці Чернівці Південні – Великий Кучурів із зміною типу тяги. Склад поїзда – 57 вагонів, маса – 1 254 т. Критерій руху – за мінімальний час ходу.

Заміна тепловоза 2М62 (час ходу 14 хв, витрата палива 100 кг, витрати на паливо – 696 грн, за витратними ставками 1 423 грн) на тепловоз 2ТЕ10л, згідно з розрахунком, дозволяє незначно пришвидшити рух поїзда по перегону, але збільшення витрати палива складе 24 %. При цьому витрати на тягу складуть 873 грн, а за витратними ставками – 1 423 грн. Для тепловоза ТЕ33а час ходу зменшено на 1 хв, а витрата палива – на 17,6 %. Витрати на тягу складуть 598 грн, а за витратними ставками – 1 422 грн. Для електровоза ВЛ-80к час ходу зменшено на 1 хв, а витрата електроенергії на тягу поїзда становить 446 кВт/год. Витрати на тягу складуть 245 грн, а за витратними ставками – 1 185 грн.

Приклад 5 – оптимізаційні розрахунки на перегоні. Проведені числові експерименти для різних типів тяги, маси поїздів і середньої швидкості. Отримані затратні величини на рух поїздів і максимальні маси поїздів (рис. 8).

Результати експерименту показали, що:

- максимальна маса поїзда залежить від типу тяги;
- зі збільшенням маси поїзда зростають і енергетичні затрати;
- енергетичні затрати зростають зі збільшенням середньої швидкості руху поїзда нелінійно;
- за незначних мас поїздів енерговитрати можуть бути непропорційними їх зростанню, це пов'язано як із дискретністю тягових силових позицій, так із формалізацією поняття «режим (оптимальний режим) руху поїзда».

Приклад 6 – сумарні витрати, розраховані за витратними ставками на вантажні й пасажирські перевезення. Були задані витратні ставки, ділянка, початкова й кінцева станції, зупинки, поїзд і час на його переміщення від початкової до кінцевої станції. Потрібно знайти такий режим руху поїзда, який задовольняє задані умови й забезпечує мінімальні витрати на його переміщення. Перелік витратних ставок наведений на рис. 9, а результати досліджень – у табл. 2

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

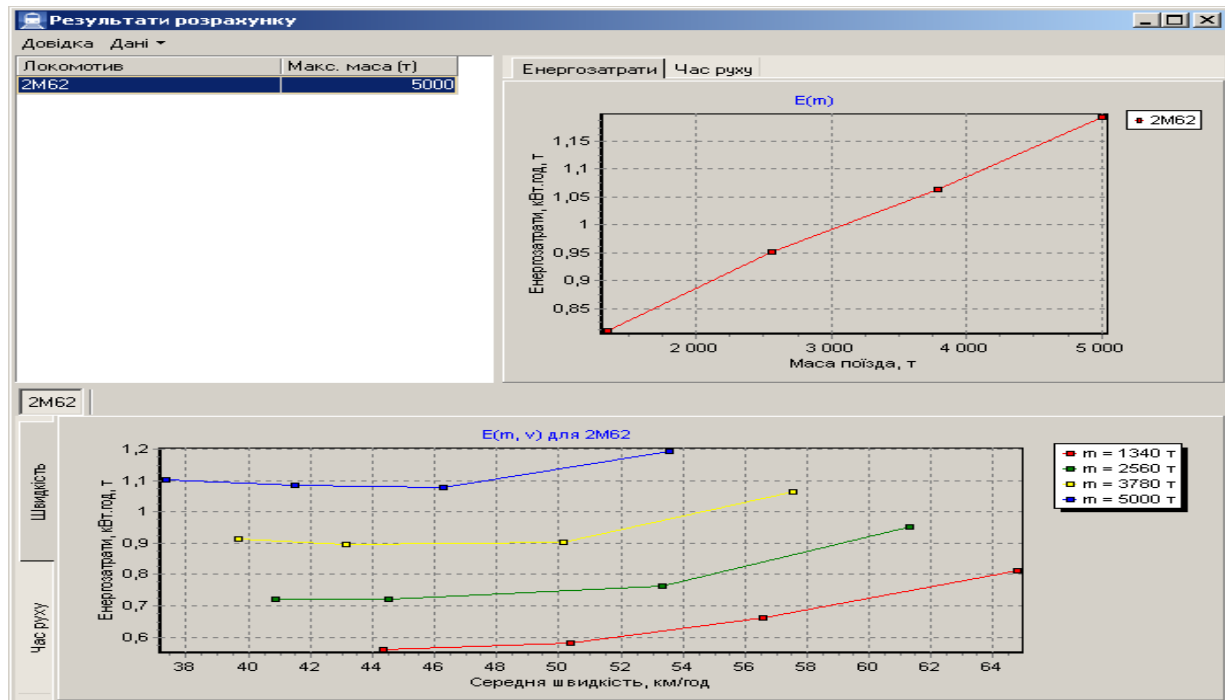


Рис. 8. Графічне представлення результатів проведених експериментів

Fig. 8. Graphical representation of the results of the experiments conducted

Враховувати	Сума	Назва
<input type="checkbox"/>	3 971,20 грн.	Вагоно-кілометр по всіх видах тяги
<input type="checkbox"/>	919,22 грн.	Вагоно-година
<input type="checkbox"/>	4 623,98 грн.	Вагоно-година в русі
<input type="checkbox"/>	735,24 грн.	Електровозо-кілометр
<input type="checkbox"/>	124,79 грн.	Електровозо-година
<input type="checkbox"/>	318,36 грн.	Бригадо-година (електровозна тяга)
<input type="checkbox"/>	554,40 грн.	1 перевезення пасажирів по ПКД
<input type="checkbox"/>	1,74 грн.	1000 тонно-кілометрів бруто по всіх видах тяги
<input checked="" type="checkbox"/>	10 148,13 грн.	Поїздо-кілометр електровозної тяги
<input type="checkbox"/>	6 980,16 грн.	Поїздо-година електровозної тяги в русі
<input type="checkbox"/>	0,00 грн.	Поїздо-година простою електровозної тяги на станції
<input type="checkbox"/>	0,00 грн.	Витрати на зупинку поїзда при електровозній тязі

Рис. 9. Форма представлення розрахунку сумарних витрат за витратними ставками

Fig. 9. Form of presentation of calculation of total expenses at cost rates

Таблиця 2

Енергетичні витрати та витрати за ставками

Table 2

Energy costs and costs at rates

Енергетичні витрати, грн	Витрати за витратними ставками, грн	Сумарні витрати, грн	Час руху, хв
2 776,67	18 332,89	21 109,56	195
2 629,09	19 310,1	21 939,19	226
2 631,59	20 571,88	23 203,47	254

Як бачимо, сумарні витрати за ставками зі збільшенням часу руху поїзда зростають, а суми паливно-енергетичних витрат і витрати за ставками, як правило, завжди будуть зі збільшенням часу руху поїзда зростати.

Приклад 7 – характер зміни енергетичних витрат від типу тяги й часу руху. На рис.10 наведені результати розрахунку зміни енергетичних витрат для різних типів тяги як функції від заданого часу на рух, який є більшим за мінімальний.

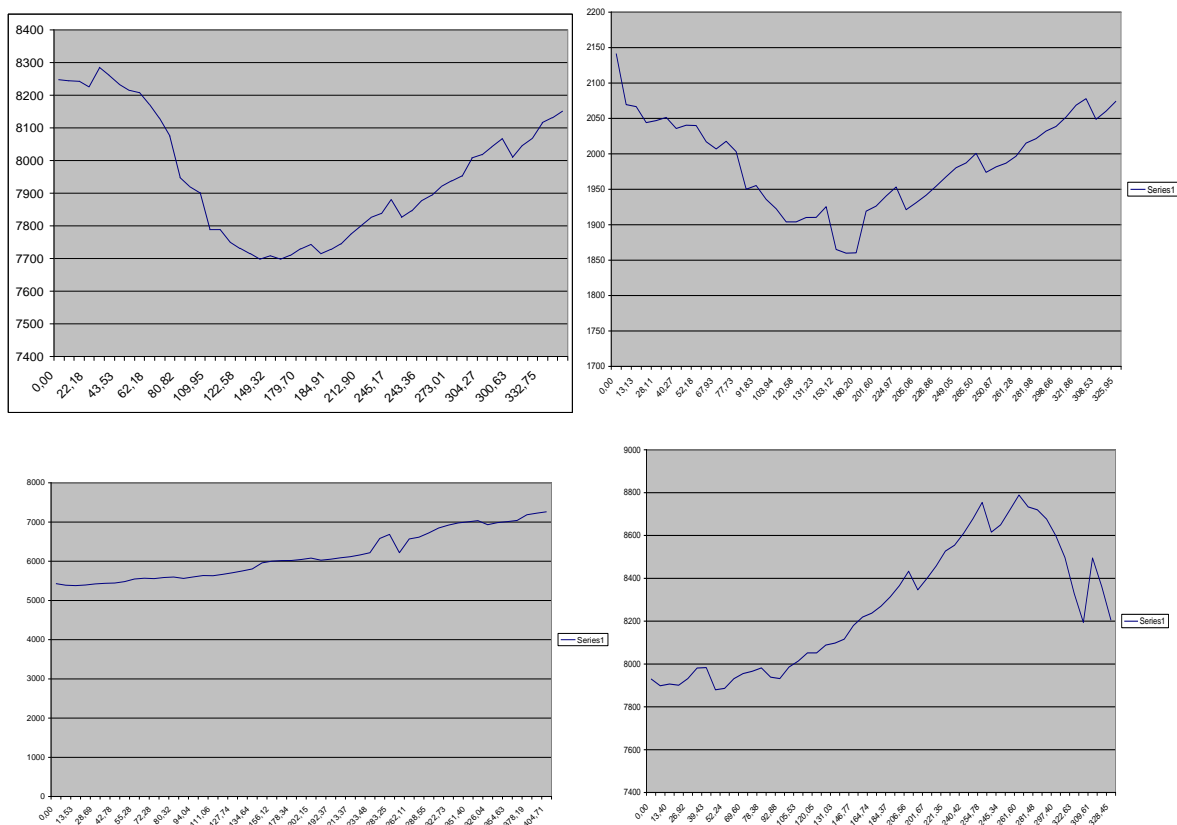


Рис. 10. Характер зміни енергетичних витрат залежно від заданого на рух часу по дільниці Івано-Франківськ – Рахів для заданих типів поїздів і локомотивів: вантажний, 2М62; вантажний, ВЛ-11; вантажний, ВЛ-80, 3 000 т; вантажний, 2М62

Fig. 10. Nature of the change in energy costs depending on the defined time for the motion in the Ivano-Frankivsk-Rakhiv section for the specified types of trains and locomotives: cargo, 2M62; cargo, VL-11; cargo, VL-80, 3000 tons; cargo, 2M62

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Як бачимо, характер залежності паливних та енергетичних величин від часу руху для різних типів тяги суттєво відрізняється. Частково на такий характер залежності вплинув наявний план і профіль траєкторії руху.

Приклад 8 – використання для системи проектування й модернізації колії. Запропоновано алгоритм розрахунку обмежень швидкостей на незаданих інтервалах траєкторії руху за заданого часу на рух і визначення прийнятності проєктованих радіусів кривих за розрахованими швидкостями руху й необхідне для цього підвищення зовнішньої рейки в кривій і довжину перехідної кривої з урахуванням допустимого непогашеного прискорення. Указавши допустиме значення непогашеного прискорення, можна отримати інформацію про прийнятність радіуса кожної кривої. Якщо запроектовані радіуси будуть неприйнятними, користувач отримає зручну форму для вибору параметрів кривої (радіус кривої, підвищення зовнішньої рейки або допустиму швидкість). Користувачеві потрібно буде вказати, які параметри є незмінними (фіксованими), а система запропонує решту параметрів автоматично.

Для розрахунку значення непогашеного прискорення використана формула [4]:

$$\tau_k = \frac{v^2}{13R} - \frac{h}{s_k} g [m / сек^2].$$

Довжина перехідної кривої повинна задовольняти наступні умови:

– $l_0 \geq \frac{h}{i}$, обмеження на ухил зовнішньої рейки, мм;

– $l_0 \geq \frac{h v_{max}}{f}$, обмеження на швидкість підйому колеса на підвищення зовнішньої рейки, м/сек²;

– $l_0 \geq 0.56 v_{max}$, обмеження на швидкість збільшення непогашеного прискорення, м/сек²;

– $l_0 \geq 0.08 \frac{v_{max}^3}{R}$, обмеження на удар об зовнішню рейку гребеня першої осі;

– $l_0 \geq 10 \sqrt{\frac{h^3 R}{1000^3}}$, обмеження на величину непогашеного прискорення;

– $l_0 \geq 0.7 \sqrt{R}$, обмеження, яке впливає з можливості практичної розбивки кривої на місцевості.

Тут h , v_{max} , R – відповідно висота підняття зовнішньої рейки, мм; максимально допустима швидкість у кривій (м/сек²) й радіус кривої, м. Нормативні величини i та f – ухил зовнішньої рейки та найбільша допустима швидкість підйому колеса по зовнішній рейці. Для кожної кривої цієї ділянки система обчислить мінімальну довжину перехідної кривої. При цьому користувач зможе налаштовувати, які із заданих шести обмежень враховувати. Також користувач зможе редагувати значення нормативних констант, які входять у формули.

Процес встановлення обмежень на максимальну швидкість на певних ділянках, проведення тягово-енергетичних розрахунків за заданим критерієм та автоматична оцінка затрат на можливі ремонтні роботи дають можливість з'ясувати мінімальні ресурси для забезпечення заданої швидкості на заданому перегоні для заданого набору поїздів.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі запропонована постановка задачі розрахунку режимів ведення поїздів як задача оптимального керування. Розроблено алгоритм мінімальної складності, який забезпечив ефективне розв'язання прямих та обернених нелінійних оптимізаційних задач у всій галузі їх паливних, енергетичних і тягових характеристик. Це забезпечило автоматизацію процесу розв'язування великого набору прямих та обернених режимних, із різними критеріями оптимальності, задач. Розроблено програмний комплекс, який пройшов апробацію в процесі розрахунку основних складових для формування графіків руху, вибору оптимальних параметрів реконструкції полотна й формування режимних параметрів руху нових швидкісних поїздів.

Висновки

Запропонована модель та алгоритмічне забезпечення дають можливість урахувати сумарний вплив на екстремальні параметри руху поїздів різних факторів: зміну коефіцієнта (за-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

лежить від багатьох зовнішніх факторів) зчеплення коліс локомотива з колійним полотном; силу й напрямку вітру; температуру повітря; відхилення напруги в контактних мережах від номінальних характеристик; коефіцієнт технічного стану локомотива за тягою; зміну радіусу тягових коліс тощо.

Кожна задача оптимізації вимагає певного ресурсу (часового, можливості вибору локомотива із заданої множини локомотивів, корегування маси поїздів, вибору траєкторії руху між заданими роздільними пунктами, можливості встановлювати чи коригувати обмеження за швидкістю на певних ділянках тощо), ефективне використання якого забезпечує мінімізацію витрат на переміщення між двома роздільними пунктами.

Більшість задач оптимізації можна звести до ефективного використання наявного часового ресурсу. Для цього необхідно ефективно використати кінетичну енергію руху поїздів і мінімізувати затрати на перехідні режими способом їх зменшення за кількістю й величиною. Для розв'язання задач оптимізації (прямих та обернених) основна увага була приділена центральній задачі – оптимізація за заданих умов на часовий ресурс.

Для розробленого алгоритмічного й програмного забезпечення характерно:

– математична модель тягових засобів є максимально повною – використана повна множина тягових, струмових, енерговитратних,

теплових, опірних характеристик для всіх типів приводів і вагонів, а також розподілена маса вздовж довжини поїзда, яка прив'язана до центру мас тягових засобів і вагонів;

– врахований вплив основних зовнішніх факторів – температури повітря, сил зустрічного вітру, підвагонних генераторів тощо;

– для розрахунків застосована траєкторія руху поїздів без її спрямлення;

– усі задачі поставлені як задачі оптимального керування;

– запропоноване алгоритмічне забезпечення дозволило поставити й розв'язати достатньо повний набір прямих та обернених задач оптимізації;

– забезпечена повна автоматизація задання вхідних даних і процесу розв'язування поставлених задач;

– створені засоби для проведення числових експериментів та порівняльного аналізу результатів;

– усі задачі можуть бути розв'язані в оптимізаційній постановці за паливно-енергетичними ресурсами без додаткових умов;

– алгоритмічне забезпечення дозволяє розв'язати оптимізаційні задачі з додатковими умовами і врахуванням усіх суттєвих технологічних обмежень;

– розроблена ефективна система графічного й табличного представлення результатів розв'язування задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасьев, В. Н. Математическая теория конструирования систем управления: учеб. для вузов / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – Москва: Высш. шк., 2003. – 615 с.
2. Визначення енергозощаджуючих режимів розгону поїздів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, А. М. Афанасьов, Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 40–52. doi: 10.15802/stp2015/55359
3. Кульбашна, Н. І. Нові підходи щодо складання раціональних режимів водіння рухомого складу по маршрутах / Н. І. Кульбашна, А. Г. Тарновецька, О. І. Балас // Проблеми та перспективи розвитку техн. засобів трансп. та систем автоматизації : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (1.10–3.10.2014) / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2014. – С. 84–85.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва: Транспорт, 1985. – 289 с.
5. Пригула, М. Г. Моделювання та розрахунок оптимальних параметрів руху поїздів / М. Г. Пригула, Р. Р. Шпакович // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології : наук. зб. – Львів, 2007. – Вип. 5. – С. 139–145.
6. Сорока, К. О. Змістовна модель та рівняння руху електричного транспорту / К. О. Сорока, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 97–106. doi: 10.15802/stp2015/46056
7. Сорока, К. О. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів електротранспорту з метою зменшення витрат електроенергії / К. О. Сорока, Т. П. Павленко, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 77–91. doi: 10.15802/stp2017/104360

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

8. Individual driving style impact on traction energy consumption in railway lines: A simulation model / A. Capasso, R. Lamedica, F. M. Gatta [et al.] // Intern. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (22.06–24.06.2016) : Conf. Paper. – Anacapri, Italy, 2016. – P. 665–670. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525929
9. Wang, P. Train Trajectory Optimization Methods for Energy-Efficient Railway Operations: doctoral thesis [Електронний ресурс] / Pengling Wang ; Delft University of Technology. – Delft, 2017. – 197 p. – Режим доступу: <http://clc.am/2oMizA> – Назва з екрана. – Перевірено : 28.12.2018.
10. Haahr, J. T. A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points / J. T. Haahr, D. Pisinger, M. Sabbaghian // Transportation Research. Part B: Methodological. – 2017. – Vol. 99. – P. 167–182. doi: 10.1016/j.trb.2016.12.016
11. Scheepmaker, G. M. Review of energy efficient train control and timetabling / G. M. Scheepmaker, R. M. P. Goverde, L. G. Kroon // European Journal of Operational Research. – 2017. – Vol. 257. – Iss. 2. – P. 355–376. doi: 10.1016/j.ejor.2016.09.044
12. The key principles of optimal train control – Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points / Amie Albrecht, Phil Howlett, Peter Pudney, Xuan Vu, Peng Zhou // Transportation Research. Part B: Methodological. – 2016. – Vol. 94. – P. 482–508. doi: 10.1016/j.trb.2015.07.023
13. The key principles of optimal train control – Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques / Amie Albrecht, Phil Howlett, Peter Pudney, Xuan Vu, Peng Zhou // Transportation Research. Part B: Methodological. – 2016. – Vol. 94. – P. 509–538. doi: 10.1016/j.trb.2015.07.024
14. Ye, H. Nonlinear programming methods based on closed-form expressions for optimal train control / Hongbo Ye, Ronghui Liu // Transportation Research. Part C: Emerging Technologies. – 2017. – Vol. 82. – P. 102–123. doi: 10.1016/j.trc.2017.06.011

М. Г. ПРИТУЛА^{1*}, А. А. ПАСЕЧНИК^{2*}

^{1*}Центр математического моделирования НАНУ, ул. Дудаева, 15, Львов, Украина, 97053, тел. +38 (032) 261 18 85, эл. почта myrosлав.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}ГП «Проектно-конструкторское технологическое бюро по автоматизации систем управления на железнодорожном транспорте Украины», ул. Жилинская, 97, Киев, Украина, 01135, тел. +38 (044) 226 24 82, эл. почта sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГООПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Цель. Работа предусматривает разработку алгоритмического обеспечения для моделирования и оптимизации режимов движения поездов. **Методика.** Для описания процесса движения поезда в пространственных координатах с распределенной массой вдоль траектории движения предложена системная модель. Она учитывает тяговые и опорные параметры и их изменение в зависимости от внешних и внутренних факторов. Для численного интегрирования модели системы использован метод конечных разностей. Кроме этого, разработаны итерационные процедуры для удовлетворения краевых условий, формирования последовательности из режимов тяги, торможения и холостого хода с соответствующими параметрами, чтобы обеспечить выполнение критерия оптимальности движения и технических ограничений с достаточной точностью. Критерий оптимальности включает топливно-энергетические ресурсы, частоту смены режимов работы тяговых средств (существенно влияет на износ приводов), затратные ставки и тому подобное. **Результаты.** Разработанное алгоритмическое, программное и информационное обеспечение позволило проведение: расчетов режимов ведения произвольных поездов, в том числе нормативных, для формирования графиков движения, расчет между поездными и станционными интервалами, исследование влияния экстремальных параметров поездов на режимы их ведения. В системе предусмотрена возможность адаптации параметров модели движения поезда по результатам исследовательских поездок. **Научная новизна.** В работе предложена постановка расчета режимов ведения поездов как задачи оптимального управления, определён быстрый метод ее решения. Это обеспечило автоматизацию процесса решения большого набора прямых и обратных режимных, с различными критериями оптимальности, задач.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Практическая значимость. Предложенный подход к постановке и решению задач моделирования и оптимизации режимов ведения поездов прошел апробацию в процессе расчета основных составляющих для формирования графиков движения, выбора оптимальных параметров реконструкции полотна для всех, скоростных и новых, типов поездов.

Ключевые слова: тягово-энергетические расчеты; оптимальный режим; математическое обеспечение; математическая модель поезда; идентификация параметров модели; прямые и обратные задачи

М. Г. ПРЯТУЛА^{1*}, О. А. ПАСЕЧНИК^{2*}

^{1*}Center of Mathematical Modelling NASU, Dudaev St., 15, Lviv, Ukraine, 79053, tel. +38 (032) 261 18 85, e-mail myroslav.prytula@gmail.com, ORCID 0000-0001-9259-4114

^{2*}SE «Design and Development Bureau of Automation of Control Systems in the Railway Transport of Ukraine», Zhylianska St., 97, Kyiv, Ukraine, 01135, tel. +38 (044) 226 24 82, e-mail sasha1101@ukr.net, ORCID 0000-0001-7303-0145

DEVELOPMENT OF THE ALGORITHMS FORMATION OF ENERGY-OPTIMIZED TRAINS TRAFFIC MODES

Purpose. The paper involves the development of algorithmic support for simulation and optimization of train traffic modes. **Methodology.** To describe the process of the train movement in spatial coordinates with the distributed mass along the trajectory of motion, a system model is proposed. The model takes into account traction and support parameters and their changes depending on external and internal factors. For a numerical integration of a system model, a finite-difference method is used. In addition, iterative procedures are developed to meet the boundary conditions, the formation of a sequence of traction, braking and idling modes with appropriate parameters to satisfy the criterion of optimality of traffic and technical limitations with sufficient accuracy. The criterion of optimality includes fuel and energy resources, the frequency of changes in the modes of work of traction means (significantly affect the wear of drives), cost rates, etc. **Findings.** The developed algorithmic, software and information support provided: calculation of driving modes of arbitrary, including standard ones for formation of traffic schedules, calculation of inter-station and station intervals, and research of influence of extreme parameters of trains on their modes of operation. The system provides for the adaptation of the parameters of the train model based on the results of experimental trips. **Originality.** The paper proposes the task of calculating train driving modes as a problem of optimal control and proposes a quick method for its solution. This ensured the automation of the process of solving a large set of direct and inverse modes with different optimality criteria. **Practical value.** The proposed approach to the formulation and solution of tasks of modeling and optimization of train driving modes was tested in the process of calculating the main components for the formation of traffic schedules, the selection of optimal parameters for the reconstruction of the roadbed for high-speed and new types of trains.

Key words: traction–energy calculations; optimal mode; mathematical support; mathematical model of train; identification of model parameters; direct and inverse problems

REFERENCES

1. Afanasev, V. N., Kolmanovskiy, V. B., & Nosov, V. R. (2003). *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
2. Bodnar, B. Y., Kapitsa, M. I., Afanasov, A. M., & Kyslyi, D. N. (2015). Definition of Energy Saving Acceleration Modes of Trains. *Science and Transport Progress*, 5(59), 40-52. doi: 10.15802/stp2015/55359 (in Ukrainian)
3. Kulbashna, N. I., Tarnovetska, A. H., & Balas, O. I. (2014). Novi pidkhody shchodo skladannia ratsionalnykh rezhymiv vodinnia rukhomoho skladu po marshrutakh. *Proceedings of the International Conference Problemy ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh zasobiv transportu ta system avtomatyzatsii, October, 01-03, 2014*, Kharkiv. 84-85. Kharkiv: O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. (in Ukrainian)
4. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty*. (1985). Moscow: Transport. (in Russian)
5. Prytula, M. H., & Shpakovych, R. R. (2007). Modeliuvannya ta rozrakhunok optymalnykh parametriv rukhu poizdiv. *Fizyko-matematychne modeliuvannya ta informatsiini tekhnolohii*, 5, 139-145. (in Ukrainian)
6. Soroka, K. O., & Lychov, D. A. (2015). The Content Model and the Equations of Motion of Electric Vehicle. *Science and Transport Progress*. 3(57), 97-106. doi: 10.15802/stp2015/46056 (in Ukrainian)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

7. Soroka, K. O., Pavlenko, T. P., & Lychov, D. A. (2017). System for Automatic Selection of the Speed Rate of Electric Vehicles for Reducing the Power Consumption. *Science and Transport Progress*, 3(69), 77-91. doi: 10.15802/stp2017/104360 (in Ukrainian)
8. Capasso, A., Lamedica, R., Gatta, F. M., Geri, A., Maccioni, M., Ruvio, A., ... Carones, N. (2016). Individual driving style impact on traction energy consumption in railway lines: A simulation model. *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. doi: 10.1109/speedam.2016.7525929 (in English)
9. Wang, P. (2017). *Train Trajectory Optimization Methods for Energy-Efficient Railway Operations: doctoral thesis*. Retrived from <http://clc.am/2oMizA> (in English)
10. Haahr, J. T., Pisinger, D., & Sabbaghian, M. (2017). A dynamic programming approach for optimizing train speed profiles with speed restrictions and passage points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 99, 167-182. doi: 10.1016/j.trb.2016.12.016 (in English)
11. Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., & Kroon, L. G. (2017). Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355-376. doi: 10.1016/j.ejor.2016.09.044 (in English)
12. Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X., & Zhou, P. (2016). The key principles of optimal train control – Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 482-508. doi: 10.1016/j.trb.2015.07.023 (in English)
13. Albrecht, A., Howlett, P., Pudney, P., Vu, X., & Zhou, P. (2016). The key principles of optimal train control – Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 509-538. doi: 10.1016/j.trb.2015.07.024 (in English)
14. Ye, H., & Liu, R. (2017). Nonlinear programming methods based on closed-form expressions for optimal train control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 82, 102-123. doi: 10.1016/j.trc.2017.06.011 (in English)

Надійшла до редколегії: 28.07.2018

Прийнята до друку: 30.11.2018

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

УДК 539.3:625.12

Л. П. ТЕЛИПКО^{1*}, Л. М. МАМАЕВ², С. В. РАКША³

^{1*}Каф. «Теоретическая и прикладная механика», Днепропетровский государственный технический университет, ул. Днепропетровская, 2, Каменское, Украина, 51918, тел. +38 (0569) 53 85 23, эл. почта leo46din@gmail.com, ORCID 0000-0003-3165-3920

²Каф. «Теоретическая и прикладная механика», Днепропетровский государственный технический университет, ул. Днепропетровская, 2, Каменское, Украина, 51918, тел. +38 (0569) 53 85 23, эл. почта leo46din@gmail.com, ORCID 0000-0002-6421-4396

³Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 47 15 18, эл. почта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Цель. Увеличение скорости движения и грузоподъемности поездов приводит к увеличению нагрузки на железнодорожный путь и, в свою очередь, нагрузки на земляное полотно. Это вызывает необходимость уточнения методов расчета, как верхнего строения, так и земляного полотна железнодорожного пути. Целью работы является разработка метода определения напряженно-деформированного состояния земляного полотна железнодорожного пути на основании учета ограниченной распределительной способности, конечности зоны деформирования по глубине земляного полотна и его неоднородности. **Методика.** На основании смешанного метода Б. Н. Жемочкина, согласно с которым действительную криволинейную эпюру отпоров по нижней постели шпал заменяют ступенчатой, рассмотрена совместная работа рельсо-шпальной решетки и земляного полотна железнодорожного пути. **Результаты.** Дано развитие осесимметричной столбчатой модели грунтового основания, которая учитывает такие важные его свойства, как ограниченная распределительная способность, конечность зоны деформирования и неоднородность (слоистость). На основании дискретного метода Л. П. Винокурова и осесимметричной столбчатой модели грунтового основания получены уравнения для перемещений и напряжений для i -го слоя основания. В результате решения системы дифференциальных уравнений дискретного метода численным методом, в котором функции от матриц представляют рядами, определены вертикальные и радиальные перемещения слоистого основания, после чего определены нормальные и касательные напряжения в основании. Реализация смешанного метода Б. Н. Жемочкина позволяет определить отпор по подошве шпал и прогибы центральных сечений балок-шпал. **Научная новизна.** Разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния земляного полотна железнодорожного пути при их совместной работе на основании осесимметричной столбчатой модели. При этом учтены ограниченная распределительная способность, конечность зоны деформирования и неоднородность по глубине грунтового основания. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют повысить точность решений при проектировании земляного полотна железнодорожного пути, что, в свою очередь, приведет к повышению его надежности и долговечности.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; земляное полотно; железнодорожный путь; напряжения; перемещения; осадка

Введение

Интенсификация грузоперевозок на железных дорогах возможна за счет увеличения скорости и грузоподъемности подвижного состава. Это приводит к увеличению нагрузок на железнодорожный путь, что, в свою очередь, вызывает необходимость уточнения методов расчета как верхнего строения, так и земляного полотна железнодорожного пути [1, 2]. Следует отметить, что прочность и долговечность железнодорожного пути во многом зависит от прочности земляного полотна.

Для определения напряженно-деформированного состояния земляного полотна железнодорожного пути строят математическую модель, которая призвана отражать реальное поведение грунта под нагрузкой. Разработаны различные расчетные модели грунтовых оснований, сравнительный анализ некоторых из них приведен в [10]. Чаще всего применяют модели Винклера или упругого полупространства. Первая модель совсем не учитывает распределительную способность, то есть способность деформироваться вне зоны приложения нагрузки, а модель упругого полупространства сильно преувеличивает ее. Различные аспекты определения напряженно-деформированного состояния земляного полотна железнодорожного пути приведены в работах [7, 9, 12, 13, 20, 21]. Учет начальных напряжений в полупространстве при воздействии кольцевых штампов рассмотрено в [14]. Вопросы волновых процессов в грунтовой среде отражены в работах [8, 15, 18]. Влияние конфигурации фундаментов на напряженно-деформированное состояние основания рассмотрено в [16, 17]. Исследование различных моделей коэффициента несущей способности грунта отражено в [19]. Однако в наведенных работах не учтены ограниченность зоны деформирования и неоднородность грунтового основания по глубине. Результаты многочисленных экспериментов свидетельствуют, что реальные грунты обладают ограниченной распределительной способностью и конечностью толщины деформированного слоя. Учет этих характеристик реальных грунтов повысит точность проектных решений, что, в свою очередь, приведет к повышению надежности и долговечности железнодорожного пути.

Цель

Нагрузку от подвижного состава через рельсо-шпальную решетку балластный слой воспринимает и упруго передает на основную площадку земляного полотна. Поскольку толщина балластного слоя, как правило, незначительна по сравнению с толщиной грунтового основания, в котором происходит локализация напряжений и деформаций, то влиянием последнего на напряженно-деформированное состояние земляного полотна можно пренебречь.

Для определения осадок земляного полотна под нижней постелью шпал и его напряженно-деформированного состояния привлекаем осесимметричную столбчатую модель основания [3, 4], которая учитывает как конечность толщины деформированного слоя, так и его ограниченную распределительную способность. Однако в работах [3, 4] она построена для однородного по глубине основания, в то время как реальным основаниям, как уже отмечалось выше, свойственна неоднородность по глубине, слоистость.

Поэтому целью работы является обобщение осесимметричной столбчатой модели для определения напряженно-деформированного состояния земляного полотна железнодорожного пути на основании учета ограниченной распределительной способности, конечности зоны деформирования по глубине земляного полотна и его неоднородности.

Методика

Земляное полотно железнодорожного пути в большинстве случаев представлено связанными грунтами, модуль деформации E и коэффициент Пуассона μ которых переменны по глубине или они являются слоистыми с различными значениями E и μ для каждого слоя. При решении задачи о перемещениях и напряжениях неоднородного по глубине основания кривую изменения модуля деформации $E(x)$ аппроксимируем ступенчатой прямой. Такая аппроксимация точно соответствует слоистому основанию с тем только отличием, что для реального слоистого основания может быть такое обстоятельство, что модуль деформации нижележащих слоев будет меньшим, чем вышележащих.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Рассмотрим совместную работу рельсошпальной решетки, состоящей (исходя из ограниченной способности грунта) из трех шпал с расположением оси колесной пары тележки вагона над продольной осью средней шпалы. Шпалы рассматриваем как гибкие балки на податливом основании. Для их расчета привлекаем смешанный метод Б. Н. Жемочкина [6], согласно с которым действительную криволинейную эпюру отпоров заменяют ступенчатой. Непрерывный контакт шпалы с основанием заменяют контактом в отдельных точках путем введения между шпалой и основанием шарнирно прикрепленных вертикальных стержней-связей, расположенных в середине участков ступенчатой эпюры.

Крайние шпалы находятся в силовой и геометрической симметрии относительно средней, поэтому будем рассматривать среднюю шпалу и одну из крайних. Разбиваем длины балок-шпал на участки с размерами, равными ширине шпал, в серединах которых ставим опорные стержни-связи. Посередине балок-шпал вводим добавочные связи против линейного и углового перемещений. Расчетная схема приведена на рис. 1.

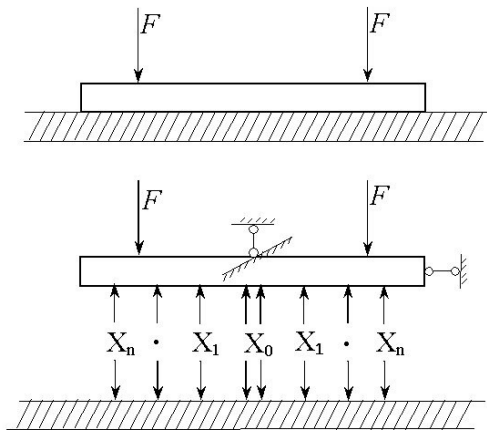


Рис. 1. Расчетная схема шпалы

Fig. 1. Beam desing diagram

Вследствие симметрии левые и правые неизвестные силы X_i попарно равны между собой, а угловое перемещение сечения середины балок-шпал равно нулю. Неизвестными будут усилия в стержневых связях X_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) и прогибы δ центральных сечений балок-шпал.

Система канонических уравнений смешанного метода в матричной форме имеет вид:

$$T \cdot Y = N_F, \quad (1)$$

где T – матрица коэффициентов, которая составляет:

$$T = \begin{bmatrix} \delta_{ij} & \delta'_{ik} & \delta'_{ip} \\ r'_{kj} & r_{kk} & r_{kp} \\ r'_{pj} & r_{pk} & r_{pp} \end{bmatrix},$$

здесь $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n; j = 0, 1, 2, 3, \dots, n; k, p$ – соответственно номера стержней-связей, расположенных посередине шпал; Y, N_F – соответственно вектор неизвестных и вектор правых частей.

Таким образом:

$$T = \begin{bmatrix} X_i \\ \delta_{ik} \\ \delta_{ip} \end{bmatrix}; N_F = \begin{bmatrix} \Delta_{iF} \\ r_{kF} \\ r_{hF} \end{bmatrix},$$

здесь δ_{ij} – перемещение точки i (по направлению силы X_i) от единичного усилия $\overline{X_j}$, равное сумме перемещений балки δ_{ij}^b (в основной системе) и податливого основания δ_{ij}^o (на основание действует единичная сила, равномерно распределенная по участку j):

$$\delta_{ij} = \delta_{ij}^b + \delta_{ij}^o;$$

$\delta'_{ik}, \delta'_{ip}$ – соответственно перемещение точки в основной системе от единичного перемещения связей k и p ; r'_{kj}, r'_{pj} – соответственно реакции в связях k и p от единичного усилия, приложенного к основной системе в связи j ; $r_{kk}, r_{kp}, r_{pk}, r_{pp}$ – соответственно реакции в связях k и p от единичного перемещения этих связей; Δ_{iF} – перемещение балки-шпалы в основной системе от внешней нагрузки; r_{kF}, r_{pF} – соответственно реакции в связях k и p от внешней нагрузки.

При определении осадок земляного полотна под подошвами шпал δ_{ij}^o и его напряженно-деформированного состояния, согласно осесимметричной столбчатой модели основания

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

[3, 4], зону, в якій відбувається локалізація переміщень і напружень від рівномірно розподіленої навантаження $q = F / \pi \cdot \bar{r}^2$ в межах центрально розташованої площадки радіусом \bar{r} , моделюємо круговим циліндричним слоистим стовбом висотою H і кінцевим радіусом $R > \bar{r}$ в поперечному перерізі (рис. 2), що збігається з радіусом затухання переміщень на граничній площині основи. Площа грузової площадки радіусом \bar{r} збігається з площею ділянок, на які розбита підлога балки-шпали.

Совмістимо початок циліндричної системи координат x, y, θ з точкою прикладання сили F , причому вертикальну вісь x направимо по напрямку сили F до нижнього торця циліндра. Розглядаване слоисте циліндричне тіло знаходиться в умовах осевих симетрії, тому будуть спостерігатися тільки радіальні w і вертикальні u переміщення (тангенціальні $v = 0$), являючись функціями змінних x і r .

Рішення рівнянь Ляме, якими описують деформування кожного шару циліндри-

чного тіла, будемо проводити дискретним методом Л. В. Винокурова [5]. По змінній x рішення шукемо в аналітичній формі, а по змінній r – в кінечно-різностній. Об'єм розглядаваного слоистого циліндричного тіла апроксимуємо призмами шляхом ділення його продольними перерізами, що проходять через вертикальну вісь x і складаються між собою кутів θ , і концентричними колами. Переміщення ребер призм приймаємо як незалежні невідомі. Як розглядаване слоисте циліндричне тіло знаходиться в умовах осевих симетрії, то в диференціальних рівняннях дискретного методу будуть міститися переміщення по вертикальних лініях-ребрах (лініях, що утворюються в результаті перетину продольного перерізу з концентричними колами), розташованих в одній діаметральної площині. Для ребра j i -го шару основи при нерівномірному кроку ділення радіальної координати (рис. 3) ми отримали наступні рівняння дискретного методу для переміщень і напружень:

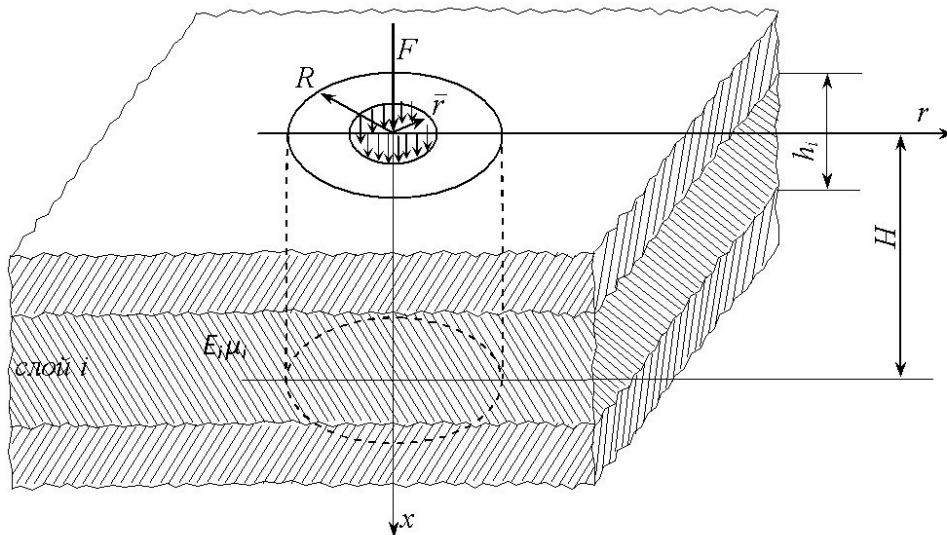


Рис. 2. Расчетная схема осесимметричной столбчатой модели для слоистого грунтового основания

Fig. 2. Beam desing diagram of axisymmetric columnar model for layered subgrade

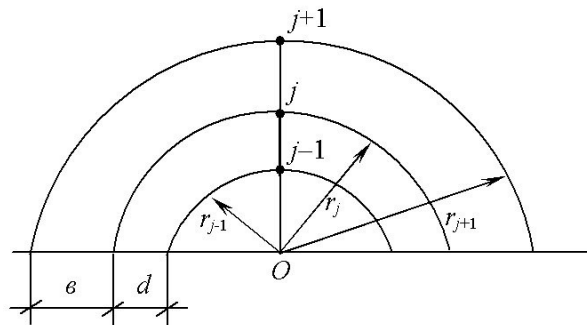


Рис. 3. Схема расположения ребер осесимметричной столбчатой модели при неравномерном шаге деления радиальной координаты

Fig. 3. Arrangement diagram of axisymmetric columnar model ridge at non-uniform step of radial coordinate interval

$$\left. \begin{aligned}
 & \alpha_j^2 \epsilon^2 \frac{d^2 w_j}{dx^2} + 2\alpha_\mu \alpha_j \left\{ \frac{2\alpha_j \gamma + 1}{1 + \gamma} w_{j+1} + \right. \\
 & \left. + \frac{2\alpha_j \gamma^2 - 1}{1 + \gamma} w_{j-1} - \left[\left(2\alpha_j \gamma + \frac{1}{\alpha_j} \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + (\gamma - 1) \right] w_j \right\} + \frac{2\alpha_j \beta_\mu r_j}{1 + \gamma} \frac{d}{dx} \cdot \\
 & \cdot \left[(\gamma^2 - 1) u_j + u_{j+1} - \gamma^2 u_{j-1} \right] = 0, \\
 & 2\alpha_\mu \epsilon^2 \frac{d^2 u_j}{dx^2} + \frac{1}{1 + \gamma} \left\{ \left[-2\gamma(\gamma + 1) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{\gamma^2 - 1}{\alpha_j} \right] u_j + \left(2\gamma + \frac{1}{\alpha_j} \right) u_{j+1} + \right. \\
 & \left. + \gamma^2 \left(2 - \frac{1}{\alpha_j} \right) u_{j-1} \right\} + 2r_j \beta_\mu \frac{d}{dx} \cdot \\
 & \cdot \left[\frac{\alpha_j (\gamma - 1) + 1}{\alpha_j^2} w_j + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{\alpha_j (1 + \gamma)} (w_{j+1} - \gamma^2 w_{j-1}) \right] = 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned}
 & \sigma_{xj} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left\{ \frac{\rho_\mu [\alpha_j (\gamma - 1) + 1]}{r_j} w_j + \right. \\
 & \left. \frac{\alpha_j \rho_\mu}{r_j (1 + \gamma)} w_{j+1} - \gamma^2 w_{j-1} \right\} + \alpha_\mu \frac{du_j}{dx} \Bigg\} \\
 & \sigma_{rj} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left\{ \frac{\alpha_\mu \alpha_j (\gamma - 1) + \rho_\mu}{r_j} w_j + \right. \\
 & \left. + \frac{\alpha_j \alpha_\mu}{r_j (1 + \gamma)} (w_{j+1} - \gamma^2 w_{j-1}) + \rho_\mu \frac{dw_j}{dx} \right\} \\
 & \sigma_{\theta j} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left\{ \frac{\rho_\mu \alpha_j (\gamma + 1) + \alpha_\mu}{r_j} w_j + \right. \\
 & \left. + \frac{\alpha_j \rho_\mu}{r_j (1 + \gamma)} (w_{j+1} - \gamma^2 w_{j-1}) + \rho_\mu \frac{dw_j}{dx} \right\} \\
 & \tau_{rxj} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left\{ \frac{\alpha_j}{r_j (1 + \gamma)} [(\gamma^2 - 1) u_j + \right. \\
 & \left. + u_{j+1} - \gamma^2 u_{j-1}] + \frac{dw_j}{dx} \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\alpha_\mu = \frac{1 - \mu(i)}{1 - 2\mu(i)}$; $\beta_\mu = \frac{1}{2[1 - 2\mu(i)]}$;

$\rho_\mu = \frac{\mu(i)}{1 - 2\mu(i)}$; $\alpha_j = \frac{r_j}{r_{j+1} - r_j}$; $\gamma = \frac{r_{j+1} - r_j}{r_j - r_{j-1}}$;

$\epsilon = r_{j+1} - r_j$,

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$E(i)$, $\mu(i)$ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала i -го слоя основания.

При равномерном шаге деления радиальной координаты $\gamma = 1$ уравнения (2) и (3) принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} &\alpha_j^2 b^2 \frac{d^2 w_j}{dx^2} + 2\alpha_\mu \alpha_j \left[w_{j+1} \left(\alpha_j + \frac{1}{2} \right) + \right. \\ &\quad \left. w_{j-1} \left(\alpha_j - \frac{1}{2} \right) - w_j \left(2\alpha_j + \frac{1}{\alpha_i} \right) \right] + \\ &\quad + r_j \alpha_j \beta_\mu \frac{d}{dx} (u_{j+1} - u_{j-1}) = 0, \\ &2\alpha_\mu b^2 \frac{d^2 u_j}{dx^2} + \frac{1}{2} \left[u_{j+1} \left(2 + \frac{1}{\alpha_j} \right) + \right. \\ &\quad \left. + u_{j-1} \left(2 - \frac{1}{\alpha_j} \right) - 4u_j \right] + 2r_j \beta_\mu \frac{d}{dx} \cdot \\ &\quad \cdot \left[\frac{1}{\alpha_j^2} w_j + \frac{1}{2\alpha_j} (w_{j+1} - w_{j-1}) \right] = 0, \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\left. \begin{aligned} &\sigma_{x_i} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left\{ \frac{\rho_\mu}{r_j} [2w_j + \right. \\ &\quad \left. + \alpha_j (w_{j+1} - w_{j-1})] + 2\alpha_\mu \frac{du_j}{dx} \right\}, \\ &\sigma_{r_i} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left[\frac{2\rho_\mu}{r_j} w_i + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\alpha_\mu \alpha_j}{r_j} (w_{j+1} - w_{j-1}) + 2\rho_\mu \frac{du_j}{dx} \right], \\ &\sigma_{\theta_i} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left[\frac{2\alpha_\mu}{r_j} w_j + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\alpha_\mu \alpha_j}{r_j} (w_{j+1} - w_{j-1}) + 2\rho_\mu \frac{du_j}{dx} \right], \\ &\tau_{rx_i} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left[\frac{\alpha_j}{2r_j} (u_{j+1} - u_{j-1}) + \frac{w_j}{\partial x} \right]. \end{aligned} \right\} (5)$$

Дифференциальные уравнения и выражения напряжений для центрального ребра 0 (цилиндрической поверхности, для которой $r_0 = 0$) теряют смысл, так как радиальная координата r_j входит в знаменатели некоторых слагаемых. Поэтому уравнения перемещений и напряжений для центрального ребра 0 составлены в прямоугольных координатах, при этом первая аппроксимирующая цилиндрическая поверхность заменена призматической поверхностью, которая имеет в плане форму многоугольника. После перехода от прямоугольных координат к цилиндрическим уравнения для перемещений и напряжений для центрального ребра 0 имеют вид:

$$\alpha_\mu b^2 \frac{d^2 u_0}{\partial x^2} + 2(u_1 - u_0) + 2\beta_\mu b \frac{dw_1}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} &\sigma_x = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left(\frac{2\rho_\mu}{r_1} w_1 + \alpha_\mu \frac{du_0}{\partial x} \right), \\ &\sigma_{r_0} = \sigma_{\theta_0} = \frac{E(i)}{1 + \mu(i)} \left[\frac{\alpha_\mu}{r_1} w_1 + \right. \\ &\quad \left. + \rho_\mu \left(\frac{1}{r_1} w_1 + \frac{du_0}{\partial x} \right) \right], \\ &\tau_{rx} = 0. \end{aligned} \right\} (7)$$

Результаты

Решая задачу о напряженно-деформированном состоянии земляного полотна железнодорожного пути, представленного осесимметричной столбчатой моделью, берем четыре линии-ребра, расположенных на цилиндрических поверхностях в одной диаметральной плоскости, окружности которых в поперечных сечениях имеют радиусы $r_0 = 0$, $r_1 = b$, $r_2 = 2b$, $r_3 = 3b = R$.

Записывая уравнения (3) и (5) для ребер 0, 1, 2 (для ребра 3, расположенного на наружной цилиндрической поверхности при $r_3 = R$, уравнения перемещений не составляем, так как согласно условию затухания перемещений при $r = R$, $w = 0$, $u = 0$), получаем для i -го слоя основания систему линейных однородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, которая после пере-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

хода к безразмерной координате $\xi = \frac{x}{b}$ с учетом

$r_j = jb$, $\alpha_j = j$ имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} & \alpha_\mu \frac{d^2 u_0}{d\xi^2} + 2(u_1 - u_0) + 2\beta_\mu \frac{dw_1}{d\xi} = 0 \\ & j^2 \frac{d^2 w_j}{d\xi^2} + 2\alpha_\mu j \cdot \left[w_{j+1} \left(j + \frac{1}{2} \right) + \right. \\ & \quad \left. + w_{j-1} \left(j - \frac{1}{2} \right) - w_j \left(2j + \frac{1}{2} \right) \right] + \\ & \quad j^2 \beta_\mu \frac{d}{d\xi} (u_{j+1} - u_{j-1}) = 0, \\ & 2\alpha_\mu \frac{d^2 u_j}{d\xi^2} + \frac{1}{2} \left[u_{j+1} \left(2 + \frac{1}{j} \right) + \right. \\ & \quad \left. + u_{j-1} \left(2 - \frac{1}{j} \right) - 4u_j \right] + 2j\beta_\mu \frac{d}{d\xi} \cdot \\ & \quad \cdot \left[\frac{1}{j^2} w_j + \frac{1}{2j} (w_{j+1} - w_{j-1}) \right] = 0, \end{aligned} \right\} \quad (8) \quad (j = 1, 2).$$

Интегрирование системы уравнений (8) целесообразно проводить численным методом [11], в котором функции от матриц представляют рядами. После приведения системы дифференциальных уравнений (8) к нормальному виду последнюю запишем в виде одного матричного уравнения:

$$\frac{dY(i)}{d\xi} = A(i) \cdot Y(i), \quad (9)$$

где $Y(i) = \{u_0(i), u_j(i), w_j(i),$

$\frac{du_0(i)}{d\xi}, \frac{du_j(i)}{d\xi}, \frac{dw_j(i)}{d\xi}\}$ – столбцовая матрица

искомых функций и их производных;

$A(i)$ – квазиматрица вида:

$$A(i) = \begin{Bmatrix} 0 & \bar{E} \\ A_1 & A_2 \end{Bmatrix},$$

0 и \bar{E} – соответственно нулевая и единичная матрицы;

$$A_1 = \begin{Bmatrix} \frac{2}{\alpha_\mu(i)} & -\frac{2}{\alpha_\mu(i)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0,25}{\alpha_\mu(i)} & \frac{1}{\alpha_\mu(i)} & \frac{0,75}{\alpha_\mu(i)} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{0,375}{\alpha_\mu(i)} & \frac{1}{\alpha_\mu(i)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6\alpha_\mu(i) & -3\alpha_\mu(i) \\ 0 & 0 & 0 & -1,25\alpha_\mu(i) & 4,5\alpha_\mu(i) \end{Bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{2\beta_\mu(i)}{\alpha_\mu(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\beta_\mu(i)}{\alpha_\mu(i)} & -\frac{0,5\beta_\mu(i)}{\alpha_\mu(i)} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{0,5\beta_\mu(i)}{\alpha_\mu(i)} & -\frac{0,5\beta_\mu(i)}{\alpha_\mu(i)} \\ \beta_\mu & 0 & -\beta_\mu & 0 & 0 \\ 0 & \beta_\mu & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}.$$

Для каждого слоя записывают свою систему уравнений (9).

Решение системы уравнений (9) будем отыскивать в виде:

$$Y(i)^{(n)} = \{ \exp[A(i)\Delta\xi(i)] \}^n \cdot Y_0(i), \quad (10)$$

где $Y_0(i) = \{D_m(i)\}, (m = 1, 2, 3, \dots, 10)$ – столбцовая матрица постоянных интегрирования;

$\Delta\xi(i) = \frac{h(i)}{b\eta}$ – шаг интегрирования; $h(i)$ – тол-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

щина i -го слоя; ($n = 1, 2, 3, \dots, \eta$) – число точек на отрезке интегрирования $0 \leq \xi \leq \frac{h(i)}{b}$;

$$\exp[A(i)\Delta\xi(i)] = \bar{E} + A(i)\Delta\xi(i) + \frac{(A(i)\Delta\xi(i))^2}{2!} + \frac{(A(i)\Delta\xi(i))^3}{3!} + \dots$$

\bar{E} – единичная матрица.

При $\xi(i) = 0$, $Y_{(i)}^{(n)}(0) = \bar{E} \cdot Y_0(i)$. (11)

Из выражения (11) следует:

$$\frac{du_{0(i)}}{d\xi} = D_{6(i)}; \frac{du_{1(i)}}{d\xi} = D_{7(i)}; \frac{du_{2(i)}}{d\xi} = D_{8(i)};$$

$$\frac{dw_{1(i)}}{d\xi} = D_{9(i)}; \frac{dw_{2(i)}}{d\xi} = D_{10(i)}.$$

Таким образом, для каждого слоя решается своя система дифференциальных уравнений, и общее число неизвестных постоянных интегрирования составляет и $D_{m(i)}$. Для их определения привлекаем условия на граничных плоскостях основания и условия сопряжения слоев на линии их контакта:

$$\left. \begin{aligned} &\text{При } \xi = 0; \quad \tau_{rx} = 0; \\ &\sigma_x = \begin{cases} -F / \pi(\bar{r})^2 & \text{при } 0 \leq r \leq \bar{r} \\ 0 & \text{при } \bar{r} \leq r \leq R; \end{cases} \\ &\text{на границе слоев } i \text{ и } i+1 \\ &\sigma_{x_0(i)}(\xi_i = h_i / b) = \sigma_{x_0(i+1)}(\xi_{i+1} = 0), \\ &\sigma_{xj(i)}(\xi_i = h_i / b) = \sigma_{xj(i+1)}(\xi_{i+1} = 0), \\ &\tau_{rxj(i)}(\xi_i = h_i / b) = \tau_{rxj(i+1)}(\xi_{i+1} = 0); \\ &\text{при } \xi = H/b \quad u = 0, w = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Следует отметить, что равенство нормальных и касательных напряжений на линии сопряжения слоев неоднородного основания позволяет учесть разную деформативность слоев основания.

Удовлетворяя граничным условиям (12), получим систему алгебраических уравнений:

$$M \cdot Y_0 = \bar{F}, \quad (13)$$

где $\bar{F} = \{-F/\pi\bar{r}^2, 0, 0, \dots, 0\}$ – вектор правых частей;

$Y_0 = \{Y_{0(1)}, Y_{0(2)}, \dots, Y_{0(i)}\}$ – столбцовая квазиматрица постоянных интегрирования;

M – квазиматрица коэффициентов.

Так как квазиматрица M имеет ленточную структуру, то система (13) хорошо обусловлена.

После решения системы (9) составляющие перемещений $u(i)$, $w(i)$ и их производные определяем при помощи зависимости:

$$Y_{(i)}^{(n)}(\xi) = \left[\frac{F}{E_i \pi \bar{r}} \left(e^{A(i)\Delta\xi(i)} \right)^n \cdot Y_{0(i)} \right]. \quad (14)$$

Подстановкой значений $Y_{(i)}^{(n)}$ в (5) и (7) определяем напряжения в i -том слое основания.

Изложенный алгоритм определения напряженно-деформированного состояния неоднородного по глубине основания легко может быть реализован при помощи компьютерных программ.

При проектировании и проверке прочности земляного полотна железнодорожного пути необходимо рассматривать совместную работу рельсо-шпальной решетки и основной площадки земляного полотна. Будем учитывать только вертикальную составляющую поездной нагрузки, передаваемой на основную площадку земляного полотна через элементы верхнего строения пути.

Поездную нагрузку через рельсо-шпальную решетку балластный слой воспринимает и упруго передает на основную площадку земляного полотна. Балластный слой под рельсо-шпальной решеткой находится в неоднородном напряженном состоянии, т. к. давление по нижней постели шпалы различно. В сечении поперек шпалы давление больше под продольной осью и уменьшается к краям постели. Зона распределения давления от шпалы по глубине балластного слоя постепенно расширяется, что говорит о его некоторой распределительной способности, при этом давление по глубине изменяется нелинейно. Экспериментальные исследования показывают, что при эпюре шпал 1 600 шт/км (при расстоянии между осями шпал 60 см) полное выравнивание напряжений

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

происходит на глубине 75 см под шпалами.

Балластный слой, воспринимая часть поездной нагрузки, снижает давление на земляное полотно со стороны рельсо-шпальной решетки. Поэтому при определении напряжений в теле земляного полотна необходимо рассматривать совместную работу балластного слоя и земляного полотна. Это приводит к расчетной схеме двухслойного упругого основания с разными значениями параметров Ляме при однородности по глубине земляного полотна. Если же земляное полотно по глубине неоднородно, то приходим в расчетной схеме к многослойному основанию. Толщина верхнего слоя основания соответствует толщине балластного слоя, а нижних согласуется с условием затухания деформаций и напряжений по глубине грунтового основания.

Ниже рассмотрена практическая реализация изложенного алгоритма при проверке прочности земляного полотна железнодорожного пути в районе складов ЛВЖ цеха полистирола на одном химическом заводе. Путь выполнен из рельсов типа Р-43, уложенных на деревянные обрезные шпалы первого типа. Эпюра шпал 1 600 шт/км. Балласт из гранитного щебня средней крупности толщиной 20 см. Промежуточное крепление костыльного типа. Путь выполнен из звеньев 12,5 м. Подвижной состав – это тепловозы с осевой нагрузкой 200 кН и цистернами трех типов с разными значениями колесной базы и с одинаковыми значениями жесткой базы, которая составляет 1 800 мм. Осевая нагрузка составляла от 217,5 кН до 237,05 кН. Земляное полотно сложено из суглинков мощностью 6 м со следующими нормативными значениями основных характеристик:

- коэффициент пористости $\varepsilon = 0,65$;
- модуль деформации $E = 19$ МПа;
- угол внутреннего трения $\phi'' = 220$;
- удельное сцепление $c'' = 0,028$ МПа.

Связные грунты, к которым относятся и суглинки, обладают распределительной способностью, т. е. способностью деформироваться вне зоны приложения нагрузки. Данные экспериментов свидетельствуют, что при нагрузке, распределенной равномерно по кругу радиусом \bar{r} , затухание перемещений и напряжений на

граничной поверхности основания происходит на расстоянии $6\bar{r}$, по глубине основания – на расстоянии $8\bar{r}$.

Учитывая, что в данном случае толщина балластного слоя незначительна (20 см) по сравнению с толщиной грунтового основания, и деформаций, влиянием последнего на напряженно-деформированное состояние земляного полотна можно пренебречь. Малая толщина балластного слоя приводит к значительной неравномерности, в продольном направлении пути его давления на земляное полотно. При этом основная часть давления приходится на площадку, совпадающую с проекцией нижней постели шпалы под подошвой рельса на основную площадку земляного полотна. Это также говорит о возможности в данном случае не учитывать влияние балластного слоя при определении осадок и напряжений земляного полотна. Схема нагрузок на рельсо-шпальную решетку и на основную площадку земляного полотна приведена на рис. 4. При решении задачи смешанным методом нижнюю постель шпалы разбиваем на прямоугольные участки, размеры которых согласуем с шириной шпалы и длиной путевой прокладки для рельса Р-43, т. е. на участки с размерами 250 x 290 мм. Из эквивалентности площадей участка шпалы и круга радиусом \bar{r} , получаем $\bar{r} = 15,1$ см. Тогда $R = 6$, $\bar{r} = 90,6$ см, $H = 8$, $\bar{r} = 120,8$ см.

Расстояние между шпалами при эпюре шпал 1 600 шт/км составляет 60 см, поэтому рассматриваем совместную работу трех шпал с расположением оси тележки цистерны над средней шпалой (рис. 5). Опорные реакции по схеме *a* (рис. 5) определить весьма затруднительно, т. к. опоры (шпала на балластном слое) являются упругоподатливыми, и при действии нагрузки на опору *B* происходит ее смещение по вертикали. Это смещение зависит и от осадки земляного полотна, которая на этой стадии расчета еще неизвестна. Если опоры рассматривать как жесткие, то всю нагрузку будет воспринимать опора *B*, а реакции в опорах *A* и *B* будут равны нулю, что противоречит действительности. Поэтому расчетную схему на рис. 5, *a* заменяем расчетной схемой рис. 5, *б*. Опоры считаем жесткими. Представляя рельс на трех опорах как неразрезную балку и привлекая

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

уравнения трех моментов, находим: $R_B = 1,375 F_1/2 = 0,69 F_1$; $R_A = 0,313$; $F_1/2 = 0,1565 F_1$. Длину балки шпалы разбиваем на девять участков, тогда расстояния между стержнями-связями будут составлять $c = 2,75/9 = 0,306$ м.

Расчетная схема средней шпалы приведена на рис. 6, крайней – на рис. 7. Неизвестными будут усилия в стержневых связях X_0, X_1, \dots, X_9 , а также прогибы δ_0 и δ_5 центральных сечений балок-шпал. Матрица коэффициентов T и векторы неизвестных Y и правой части N_F системы канонических уравнения смешанного метода (1) имеют вид:

$$T = \begin{pmatrix} \delta_{00} & \delta_{01} & \delta_{02} & \cdot & \cdot & \delta_{09} & \delta'_{00} & \delta'_{05} \\ \delta_{10} & \delta_{11} & \delta_{12} & \cdot & \cdot & \delta_{19} & \delta'_{10} & \delta'_{15} \\ \delta_{20} & \delta_{21} & \delta_{22} & \cdot & \cdot & \delta_{29} & \delta'_{20} & \delta'_{25} \\ \delta_{30} & \delta_{31} & \delta_{32} & \cdot & \cdot & \delta_{39} & \delta'_{30} & \delta'_{35} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \delta_{90} & \delta_{91} & \delta_{92} & \cdot & \cdot & \delta_{99} & \delta'_{90} & \delta'_{95} \\ r'_{00} & r'_{01} & r'_{02} & \cdot & \cdot & r'_{09} & r_{00} & r_{05} \\ r'_{50} & r'_{51} & r'_{52} & \cdot & \cdot & r'_{59} & r_{50} & r_{55} \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_9 \\ \delta_0 \\ \delta_5 \end{pmatrix}, \quad N_F = \begin{pmatrix} \Delta_{0F} \\ \Delta_{1F} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta_{9F} \\ r_{0F} \\ r_{5F} \end{pmatrix}.$$

Перемещения δ_{ij}^0 земляного полотна железнодородного пути определяем при помощи осесимметричной столбчатой модели при $F = 1$. Из равенства площадей прямоугольного участка (0,306 х 0,23) подошвы шпалы и круга радиусом \bar{r} имеем $\bar{r} = 0,15$ м.

Перемещения поверхности земляного полотна на ребрах осесимметричной столбчатой модели 0, 1 и 2, которые получены при реализации изложенного алгоритма при $\mu = 0,3$, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Относительные перемещения поверхности земляного полотна на ребрах осесимметричной столбчатой модели

Table 1

Relative displacement of the subgrade surface on the ridges of axisymmetric columnar model

r	0	c = b	2c = 2b	3c = 3b	4c = 4b
(r)	1,777 1	0,3054	0,0641	0	0

В данном случае расстояние между стержнями-связями $c = 0,305$ м $\approx 0,30$ м совпадает с расстоянием между ребрами ($b = 2\bar{r} = 2 \cdot 0,15 = 0,30$ м). Тогда при $E = 19$ МПа имеем:

$$\delta_{ij}^0 = \frac{1}{E\pi\bar{r}} \cdot u(r) = 1,12 \cdot 10^{-7} \cdot u(r).$$

При принятом радиусе $R = 6\bar{r} = 3c$ затухания перемещений на граничной плоскости земляного полотна перемещения крайних шпал не оказывают взаимного влияния на свои перемещения. Поэтому при совместном расчете трех балок-шпал нужно учитывать влияние крайних шпал на среднюю и наоборот – влияние средней шпалы на крайние.

Единичная осадка основания равна:

$$\delta_{00}^0 = \delta_{55}^0 = 2u(0);$$

$$\delta_{22}^0 = \delta_{33}^0 = \delta_{44}^0 = \delta_{77}^0 = \delta_{88}^0 = \delta_{99}^0 = u(0);$$

$$\delta_{05}^0 = 4u(2c);$$

$$\delta_{07}^0 = \delta_{25}^0 = 4u(2,83c);$$

$$\delta_{11}^0 = \delta_{66}^0 = u(0) + u(2c);$$

$$\delta_{06}^0 = \delta_{15}^0 = 4u(2,24c);$$

$$\begin{aligned} \delta_{03}^0 &= \delta_{04}^0 = \delta_{08}^0 = \delta_{09}^0 = \delta_{14}^0 = \delta_{19}^0 = \delta_{35}^0 = \\ &= \delta_{40}^0 = \delta_{41}^0 = \delta_{45}^0 = \delta_{46}^0 = \delta_{53}^0 = \delta_{54}^0 = \delta_{58}^0 = \\ &= \delta_{59}^0 = \delta_{64}^0 = \delta_{69}^0 = \delta_{80}^0 = \delta_{85}^0 = \delta_{90}^0 = \delta_{91}^0 = \\ &= \delta_{95}^0 = \delta_{96}^0 = 0. \end{aligned}$$

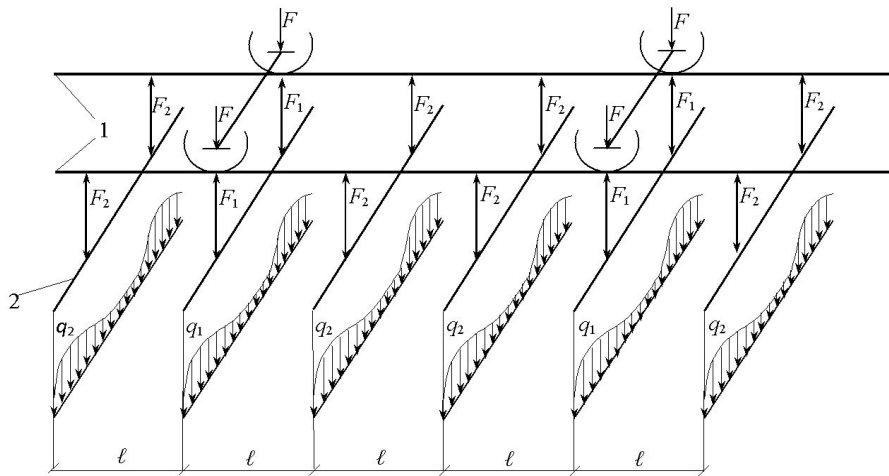


Рис. 4. Схема нагрузок на рельсо-шпальную решетку и на основную площадку земляного полотна:

F – давление колеса на рельс; F_1 – давление со стороны рельса на шпалу под колесом;
 F_2 – давление со стороны рельса на шпалу; ℓ – расстояние между шпалами; 1 – рельсы; 2 – шпалы

Fig. 4. Loading case on beam-rail grate and basic subgrade area:

F – wheel pressure; F_1 – pressure from the rail side under the wheel; F_2 – pressure from the rail side on the sleeper; ℓ – distance between sleepers; 1 – rails; 2 – sleepers

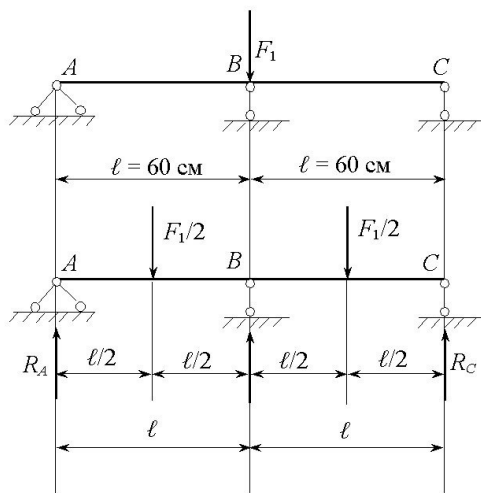


Рис. 5. Расчетная схема совместной работы трех шпал

Fig. 5. Design diagram of joint operation of three sleepers

Аналогично определяют остальные перемещения основания δ_{ij}^0 .

Единичные перемещения δ_{ij}^0 балки-шпалы определены по таблице IV (4)

Б. Н. Жемочкина [6] (ниже приведены значения некоторых из них):

$$\delta_{00}^0 = \delta_{01}^0 = \delta_{02}^0 = \delta_{03}^0 = \delta_{04}^0 = 0;$$

$$\delta_{55}^0 = \delta_{56}^0 = \delta_{57}^0 = \delta_{58}^0 = \delta_{59}^0 = 0;$$

$$\delta_{11}^0 = 2\eta; \delta_{12}^0 = 5\eta; \delta_{13}^0 = 8\eta; \delta_{22}^0 = 16\eta;$$

$$\delta_{33}^0 = 54\eta; \delta_{79}^0 = 40\eta;$$

$$\eta = \frac{c^3}{6(EI)_\delta}.$$

Грузовые перемещения Δ_{iF} определены по способу Верещагина (рис. 6, б и рис. 7, б).

Для данной основной системы перемещение точки i основной системы от единичного перемещения связи «0» или «5» равны:

$$\delta'_{n0} = 1,0 \quad (n = 0, 1, \dots, 4);$$

$$\delta'_{j5} = 1,0 \quad (j = 5, 6, \dots, 9).$$

В нашем случае \bar{r}'_{0j} является реакцией в линейной связи основной системы от единичного усилия, приложенного в связи j :

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

$$r'_{0n} = -1 \quad (n = 0, 1, \dots, 4);$$

$$r'_{5j} = -1 \quad (j = 5, 6, \dots, 9);$$

$$r'_{05} = r'_{06} = r'_{07} = r'_{08} = r'_{09} = r'_{50} = r'_{51} = \\ = r'_{52} = r'_{53} = r'_{54} = 0.$$

Вертикальна реакція в защемленні основної системи от $\bar{X}_i = 1$ направлена вниз.

Коефіцієнти r_{00} і r_{55} , представляючі собою реакцію в лінійної зв'язи «0» і «5» от єдиничного переміщення цих зв'язей, равны:

$$r_{00} = r_{55} = 0.$$

Реакції в лінійних зв'язях «0» і «5» основної системи от зовнішньої навантаження равны сумме зовнішньої навантаження:

$$r_{0F} = 77,8 \text{ кН}; \quad r_{5F} = 17,7 \text{ кН}.$$

В результаті рішення системи алгебраїчних рівнянь (1) визначаємо зусилля X_i в стержневих зв'язях і прогиби δ_0 і δ_5 центральних сечень середньої і крайньої шпал.

Інтенсивність отпора по нижній постелі шпалы получим, разделив X_i на длину участка c .

Осадку основания под шпалами определяем с привлечением принципа суперпозиции:

$$u_i(0) = \sum X_i \delta_{ij}.$$

Эпюры отпоров земляного полотна под средней и крайней шпалами приведены соответственно на рис. 6, в и рис. 7, в.

Максимальные нормальные напряжения на поверхности земляного полотна под средней шпалой составили $\sigma_{x_0} = 0,141$ МПа. Максимальные касательные напряжения в грунте составили $\tau_{rx} = 0,0115$ МПа. Приняв в качестве критерия прочности условие Кулона, при данных характеристиках грунта, получим $\tau_{пред} = 0,03$ МПа. Сопоставление расчетных напряжений с нормативными показывает выполнение условия прочности земляного полотна железнодорожного пути.

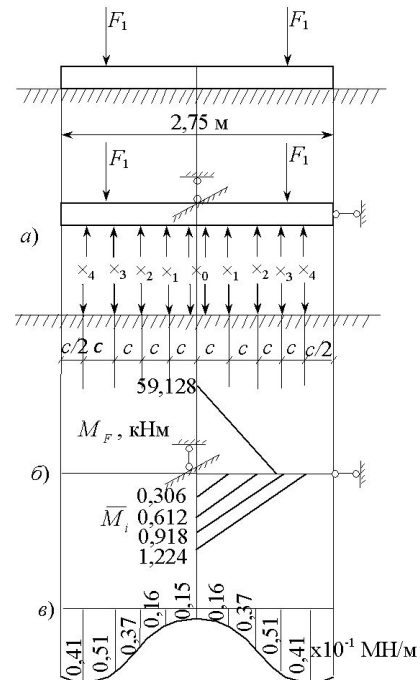


Рис. 6. Расчетная схема средней шпалы и эпюра отпора основной площадки земляного полотна

Fig. 6. Design diagram of the middle sleeper and resistance epure of the basic subgrade

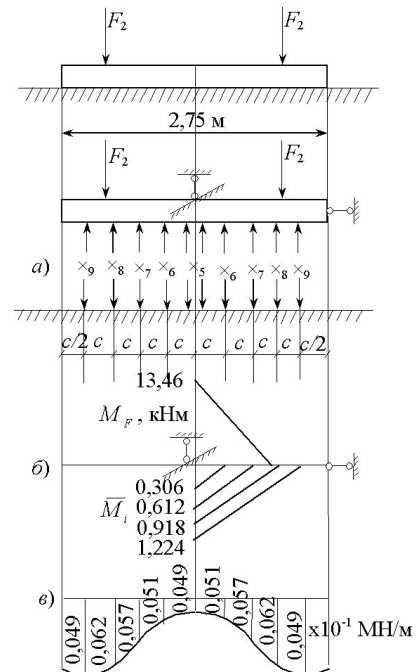


Рис. 7. Расчетная схема крайней шпалы и эпюра отпора основной площадки земляного полотна

Fig. 7. Design diagram of the last sleeper of resistance epure of the basic subgrade

Научная новизна и практическая значимость

Разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния земляного полотна железнодорожного пути при учете их совместной работы на основании осесимметричной столбчатой модели грунтового основания, которая учитывает такие важные свойства реального грунтового основания, как ограниченная распределительная способность, конечность зоны деформирования и неоднородность (слоистость) по глубине основания. При этом предложенный алгоритм позволяет определять как перемещения основания, так и его напряженное состояние, что, в свою очередь, позволяет оценить его прочность при проектировании железнодорожного пути.

Приведено дальнейшее развитие осесимметричной столбчатой модели грунтового основания.

Разработан алгоритм расчета верхнего строения и земляного полотна железнодорожного пути при учете их совместной работы.

В качестве математической модели грунтового основания принята осесимметричная столбчатая модель, которая учитывает такие важные параметры грунтового основания, как ограниченную распределительную способность, конечность толщины деформирования по глубине.

Выводы

В данной работе осесимметричная столбчатая модель развита на слоистое (неоднородное по глубине) основание, которое больше отвечает реальности. Следует отметить, что осесимметричная столбчатая модель позволяет определять как перемещения основания, так и его напряженное состояние, что, в свою очередь, позволяет оценить его прочность при проектировании железнодорожного пути.

В дальнейшем целесообразно развить рассмотренный алгоритм на действие динамического нагружения, так как поездная нагрузка при движении подвижного состава представляет собой именно динамическую нагрузку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бондаренко, І. О. Рекомендації щодо проектування конструкцій нижньої будови залізничної колії / І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 36. – С. 100–103.
2. Бондаренко, І. О. Щодо забезпечення якості проектування конструкції земляного полотна залізничної колії / І. О. Бондаренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 120–123.
3. Винокуров, Л. П. Решение динамической контактной задачи для балок, лежащих на весомом податливом слое, с привлечением осесимметричной столбчатой модели / Л. П. Винокуров, Л. П. Телипко // Изв. высш. учеб. заведений. Стр-во и архитектура. – 1977. – № 2. – С. 31–36.
4. Винокуров, Л. П. Решение контактной задачи для статически и динамически нагруженных фундаментов на податливом основании, представленном осесимметричной столбчатой моделью / Л. П. Винокуров, Л. П. Телипко // Сопротивление материалов и теория сооружений : респ. межвед. науч. техн. сб. – Киев, 1978. – Вип. XXXII. – С. 31–38.
5. Винокуров, Л. П. Прямые методы решения пространственных и контактных задач для массивов и фундаментов / Л. П. Винокуров. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1956. – 280 с.
6. Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. – Москва : Госстройиздат, 1962. – 239 с.
7. Исследование параметров модернизированного земляного полотна / В. Д. Петренко, А. М. М. Алхдур, А. Л. Тюткин, В. В. Ковалевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 164–169.
8. Курган, Д. М. Основи математичного опису хвильової моделі поширення напружень у залізничній колії / Д. М. Курган // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 5 (65). – С. 101–113. doi: 10.15802/stp2016/84032
9. Петренко, В. Д. Дослідження впливу деформаційних характеристик шару посилення на НДС залізничного насипу при під'їзді до мостового переходу / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, А. М. М. Алхдур //

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

- Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 32. – С. 101–105.
10. Петренко, В. Д. Порівняльний аналіз розрахункових моделей залізничного земляного полотна / В. Д. Петренко, Д. О. Ямпольський, І. О. Святко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – С. 56–62. doi: 10.15802/stp2013/16619
 11. Подольский, Е. Н. О матричном методе исследования и решения однородной системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами на электронно-цифровых машинах / Е. Н. Подольский, В. И. Пустынников // Труды ХИСИ. – Харьков, 1961. – Вып. 17. – С. 89–100.
 12. Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану двох варіантів підсилення конструкції земляного полотна / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, А. М. М. Алхдур // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 29. – С. 107–111.
 13. Тютюкін, О. Л. Теоретичні основи визначення напружено-деформованого стану глинистого породного масиву як в'язко-пружно-пластичного середовища / О. Л. Тютюкін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 21. – С. 201–206.
 14. Ярецкая, Н. А. Контактная задача для жесткого кольцевого штампа и полупространства с начальными (остаточными) напряжениями / Н. А. Ярецкая // Прикладная механика. – 2018. – № 5 (54). – С. 55–60.
 15. Connolly, D. Numerical modeling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments / D. Connolly, A. Giannopoulos, M. C. Forde // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2013. – Vol. 46. – P. 13–19. doi: 10.1016/j.soildyn.2012.12.003
 16. Evtushenko, S. I. Investigation of the Behavior of Strip Foundations with Complex Configuration of the Base / S. I. Evtushenko, T. A. Krakhmal'nyi // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2017. – Vol. 54. – Iss. 3. – P. 169–172. doi: 10.1007/s11204-017-9452-6
 17. Glushkov, V. Influence of the form and size of the isolated foundations on the stress-strain state of the soil base / V. Glushkov, A. Bartolomey // Journal of Applied Engineering Science. – 2016. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 28–35. doi: 10.5937/jaes14-9136
 18. Lugovoi, P. Z. Nonstationary Dynamics of a System Consisting of a Cylindrical Shell and a Soil Medium of Periodic Structure / P. Z. Lugovoi, V. F. Meish, Y. A. Meish // International Applied Mechanics. – 2016. – Vol. 52. – Iss. 4. – P. 350–353. doi: 10.1007/s10778-016-0758-2
 19. Motra, H. B. Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations / H. B. Motra, H. Stutz, F. Wuttke // Soils and Foundations. – 2016. – Vol. 56. – Iss. 2. – P. 265–276. doi: 10.1016/j.sandf.2016.02.009
 20. Petrenko, V. D. Simulation of subgrade embankment on weak base / V. D. Petrenko, I. O. Sviatko // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 198–204. doi: 10.15802/stp2015/49286
 21. The basing of stabilization parameters of a fortified railway bed / V. D. Petrenko, O. L. Tiutkin, O. M. Kulazhenko, A. M. M. Alkhdour // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 165–172. doi: 10.15802/stp2015/38269

Л. П. ТЕЛІПКО^{1*}, Л. М. МАМАЄВ², С. В. РАКША³

^{1*}Каф. «Теоретична та прикладна механіка», Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, Україна, 51918, тел. +38 (0569) 53 85 23, ел. пошта leo46din@gmail.com, ORCID 0000-0003-3165-3920

²Каф. «Теоретична та прикладна механіка», Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, Кам'янське, Україна, 51918, тел. +38 (0569) 53 85 23, ел. пошта leo46din@gmail.com, ORCID 0000-0002-6421-4396

³Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 47 15 18, ел. пошта raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

УРАХУВАННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЙОГО НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

Мета. Збільшення швидкості руху й вантажопідйомності потягів призводить до збільшення навантаження на залізничну колію і, у свою чергу, навантаження на земляне полотно. Це викликає необхідність уточнення методів розрахунку як верхньої будови, так і земляного полотна залізничної колії. Метою роботи є розробка методу визначення напружено-деформованого стану земляного полотна залізничної колії на підставі врахування обмеженої розподільної здатності, кінцевості зони деформації по глибині земляного полотна і його неоднорідності. **Методика.** На підставі змішаного методу Б. Н. Жемочкіна, згідно з яким дійсну криволінійну епюру відпору по нижній площині шпал замінюють ступінчастою, розглянута спільна робота рейко-шпальної решітки й земляного полотна залізничної колії. **Результати.** Отримала розвиток вісесиметрична стовпчаста модель ґрунтової основи, яка враховує такі важливі її властивості, як обмежена розподільна здатність, кінцевість зони деформування й неоднорідність (шаруватість). На підставі дискретного методу Л. П. Винокурова й вісесиметричної стовпчастої моделі ґрунтової основи отримані рівняння для переміщень і напружень для i -го шару основи. У результаті розв'язання системи диференціальних рівнянь дискретного методу чисельним методом, в якому функції від матриць представляють рядами, визначені вертикальні й радіальні переміщення шаруватої основи, після чого визначені нормальні й дотичні напруження в основі. Реалізація змішаного методу Б. Н. Жемочкіна дозволяє визначити відпору по підшві шпал та прогини центральних перерізів балок-шпал. **Наукова новизна.** Розроблений метод розрахунку напружено-деформованого стану земляного полотна залізничної колії при їх спільній роботі на підставі вісесиметричної стовпчастої моделі. При цьому враховані обмежена розподільна здатність, кінцевість зони деформування й неоднорідність по глибині ґрунтової основи. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють підвищити точність рішень під час проектування земляного полотна залізничної колії, що, у свою чергу, призведе до підвищення її надійності й довговічності.

Ключові слова: напружено-деформований стан; земляне полотно; залізнична колія; напруження; переміщення; осідання

L. P. TELIPKO^{1*}, L. M. MAMAEV², S. V. RAKSHA³

^{1*}Dep. «Theoretical and Applied Mechanics», Dniprovsk State Technical University, Dniprobudivska St., 2, Kamenskoye, Ukraine, 51918, tel. +38 (0569) 53 85 23, e-mail leo46din@gmail.com, ORCID 0000-0003-3165-3920

²Dep. «Theoretical and Applied Mechanics», Dniprovsk State Technical University, Dniprobudivska St., 2, Kamenskoye, Ukraine, 51918, tel. +38 (0569) 53 85 23, e-mail leo46din@gmail.com ORCID 0000-0002-6421-4396

³Dep. «Applied Mechanics and Material Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 47 15 18, e-mail raksha@ukr.net, ORCID 0000-0002-4118-1341

THE SUBGRADE HETEROGENEITY CONSIDERATION OF A RAILWAY TRACK WHEN DETERMINING ITS STRESS-STRAIN STATE

Purpose. Increase of the speed and train carrying capacity causes the increase in the load on the railway track and, in turn, loads on the subgrade. This makes it necessary to clarify the calculation methods, both the upper structure and the subgrade of the railway track. The purpose of the paper is the development of a method for determining the stress-strain state of railway subgrade on the basis of taking into account the limited distribution capacity, the extremity of the deformation area along the subgrade depth and its heterogeneity. **Methodology.** Based on the mixed method of B. N. Zhemochkin, according to which the actual curvilinear resistance diagram on the lower flat of the sleepers is replaced by a stepwise one, the joint operation of the rail-sleeper grate and the subgrade of the railway track is considered. **Findings.** The development of an axisymmetric columnar model of the subgrade is considered, which takes into account such important properties of the subgrade as the limited distribution capacity and the extremity of the deformation area on heterogeneous (layered) base. Based on the discrete method of

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

L. P. Vinokurov and the subgrade axisymmetric columnar model, the equations for displacements and stresses for i -th foundation layer have been obtained. As a result of differential equation system solution of the discrete method by a numerical method in which the functions of the matrices are represented by series, the vertical and radial displacements of the layered base are determined, after which the normal and shearing stresses at the base are determined. The implementation of B. N. Zhemochkin mixed method allows to determine the resistance from the bottom of sleepers and the deflections of the central sections of the sleepers-beams. **Originality.** Method for calculating the stress-strain state of railway subgrade during their joint operation on the basis of an axisymmetric columnar model has been developed. At this the limited distribution capacity, the extremity of the deformation area and the heterogeneity according to the depth of the base have been taken into account. **Practical value.** The results obtained make it possible to increase the accuracy of design solutions in the design of the railway subgrade, which in turn, resulting in increased reliability and service life of the railway track.

Keywords: stress-strain state; subgrade; railway track; stress; displacement; settling

REFERENCES

1. Bondarenko, I. O. (2011). Rekomendatsii shchodo proektuvannia konstrukttsii nyzhnoi budovy zaliznychnoi kolii. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 36, 100-103. (in Ukrainian)
2. Bondarenko I. O. (2011). Shchodo zabezpechennia yakosti proektuvannia konstrukttsii zemlianooho polotna zaliznychnoi kolii. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 37, 120-123. (in Ukrainian)
3. Vinokurov, L. P., & Telipko, L. P. (1977). Reshenie dinamicheskoy kontaktnoy zadachi dlya balok, lezhashchikh na vesomom podatlivom sloe, s privlecheniem osesimetrichtnoy stolbchatoy modeli. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo i arkhitektura*, 2, 31-36. (in Russian)
4. Vinokurov, L. P., & Telipko, L. P. (1978). Reshenie kontaktnoy zadachi dlya staticheskoi i dinamicheskoi nagruzhennykh fundamentov na podatlivom osnovanii, predstavlennoe osesimetrichtnoy stolbchatoy modelyu. *Soprotivlenie materialov i teoriya sooruzheniy*, XXXII, 31-38. (in Russian)
5. Vinokurov, L. P. (1956). *Pryamye metody resheniya prostranstvennykh i kontaktnykh zadach dlya massivov i fundamentov*. Kharkov: Izdatelstvo Kharkovskogo universiteta. (in Russian)
6. Zhemochkin, B. N., & Sinitsyn, A. P. (1962). *Prakticheskie metody rascheta fundamentnykh balok i plit na uprugom osnovanii*. Moscow: Gosstroyizdat. (in Russian)
7. Petrenko, V. D., Alkhudur, A. M. M., Tyutkin, A. L., & Kovalevich, V. V. (2012). Issledovanie parametrov modernizirovannogo zemlyanogo polotna. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 41, 164-169. (in Russian)
8. Kurhan, D. M. (2016). The Basis of Mathematical Description for Wave Model of Stresses Propagation in Railway Track. *Science and Transport Progress*, 5(65), 101-113. doi: 10.15802/stp2016/84032 (in Ukrainian)
9. Petrenko, V. D., Huzchenko, V. T., & Alkhudur, A. M. M. (2010). The Study of the Influence of the Deformation Characteristics of the Layer of Reinforcement on Vat Railway Embankment at the Entrance to the Bridge Crossing. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 32, 101-105. (in Ukrainian)
10. Petrenko, V. D., Yampolskiy, D. O., & Sviatko, I. O. (2013). Comparative analysis of calculation models of railway subgrade. *Science and Transport Progress*, 4(46), 56-62. doi: 10.15802/stp2013/16619 (in Ukrainian)
11. Podolskiy, Y. N., & Pustynnikov, V. I. (1961). O matrichnom metode issledovaniya i resheniya odnorodnoy sistemy lineynykh obyknovennykh differentsialnykh uravneniy s postoyannymi koeffitsientami na elektronno-tsifrovyykh mashinakh. *Trudy KhISI*, 17, 89-100. (in Russian)
12. Petrenko, V. D., Huzchenko, V. T., Tiutkin, O. L., & Alkhudur, A. M. M. (2009). Comparative Analysis of the Stress-Strain State of the Two Variants of Reinforcement Design Subgrade. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 29, 107-111. (in Ukrainian)
13. Tyutkin, O. L. (2008). The Theoretical Basis for Determining the Stress-Strain State of the Clay Rock Mass as a Visco-Elasto-Plastic Environment. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 21, 201-206. (in Ukrainian)
14. Yaretskaya, N. A. (2018) Contact problem for the stiff annular punch and semispace with initial (residual) stresses. *International Applied Mechanics*, 5(54), 55-60. (in Russian)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

15. Connolly, D., Giannopoulos, A., & Forde, M. C. (2013). Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, 13-19. doi: 10.1016/j.soildyn.2012.12.003 (in English)
16. Evtushenko, S. I., & Krakhmal'nyi, T. A. (2017). Investigation of the Behavior of Strip Foundations with Complex Configuration of the Base. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54(3), 169-172. doi: 10.1007/s11204-017-9452-6 (in English)
17. Glushkov, V., & Bartolomey, A. (2016). Influence of the form and size of the isolated foundations on the stress-strain state of the soil base. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(1), 28-35. doi: 10.5937/jaes14-9136 (in English)
18. Lugovoi, P. Z., Meish, V. F., & Meish, Y. A. (2016). Nonstationary Dynamics of a System Consisting of a Cylindrical Shell and a Soil Medium of Periodic Structure. *International Applied Mechanics*, 52(4), 350-353. doi: 10.1007/s10778-016-0758-2 (in English)
19. Motra, H. B., Stutz, H., & Wuttke, F. (2016). Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations. *Soils and Foundations*, 56(2), 265-276. doi: 10.1016/j.sandf.2016.02.009 (in English)
20. Petrenko, V. D., & Sviatko, I. O. (2015). Simulation of Subgrade Embankment on Weak Base. *Science and Transport Progress*, 4(58), 198-204. doi: 0.15802/stp2015/49286 (in English)
21. Petrenko, V. D., Tiutkin, O. L., Kulazhenko, O. M., & Alkhdour, A. M. M. (2015). The Basing of Stabilization Parameters of a Fortified Railway Bed. *Science and Transport Progress*, 1(55), 165-172. doi: 0.15802/stp2015/38269 (in English)

Поступила в редколлегию: 30.07.2018

Принята к печати: 14.11.2018

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 678.4.046.7

И. В. МАРКОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Химия и инженерная экология», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (099) 425 35 77, эл. почта markova60.i.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-7867-5380

ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЫ НА СВОЙСТВА РЕЗИНОВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Цель. В данной работе предполагается исследовать влияние каучуков общего и специального назначения в качестве полимерной матрицы на жесткостные, прочностные свойства резиноволокнистых композитов и их сопротивление тепловому старению. **Методика.** Резиноволокнистые композиты изготавливали на основе каучуков общего (изопреновый, бутадиен-стирольный, дивиниловый) и специального (бутадиен-нитрильный) назначения. В качестве армирующих волокон использовали полиамидное, хлопковое и стекло-волокна. Для обеспечения высокой прочности связи армирующих волокон с матрицей в резины вводили химический модификатор м-фенилен-бис-малеинимид. Резиновые смеси изготавливали в резиносмесителе. Волокно в резиновую матрицу вводили на вальцах при зазоре между валками 1,0–1,5 мм. В конце смешения полученную смесь 3 раза пропускали через зазор вальцов 0,3–0,5 мм, не меняя направления вальцевания. Вулканизацию образцов проводили в гидравлическом прессе с паровым обогревом при температуре 143 °С и оптимальном времени вулканизации. Для определения модуля жесткости резиноволокнистых композитов при малых деформациях (5, 20 %) растяжения снимали нагрузочную кривую (зависимость нагрузки от деформации) для образца в виде двухсторонней лопатки. По полученной кривой определяли напряжение в образце, соответствующее деформации. Тепловое старение вулканизатов осуществляли в воздушном термостате при 120 °С в течение 96 часов. **Результаты.** Показано, что армирование короткими волокнами резин на основе каучуков не только общего, но и специального назначения позволяет значительно повысить их жесткостные свойства и сопротивление тепловому старению при сохранении необходимого уровня прочностных характеристик. Максимальные жесткостные характеристики резиноволокнистых композитов достигаются при применении комбинации армирующих волокон. **Научная новизна.** Впервые была показана возможность создания резиноволокнистых композитов на основе бутадиен-нитрильной эластомерной матрицы с высокими показателями жесткостных, прочностных свойств, а также сопротивления тепловому старению. **Практическая значимость.** Полученные результаты открывают перспективы разработки материалов для шевронных уплотнителей и других конструкционных элементов, где необходимы высокие показатели не только жесткости и теплостойкости, но и маслостойкости.

Ключевые слова: резиноволокнистые композиты; полимерная матрица; бутадиен-нитрильный каучук; жесткостные свойства; сопротивление тепловому старению

Введение

Создание композитных материалов является наиболее перспективным направлением современного материаловедения [10, 11]. Так, например, армирование резин короткими волокнами позволило заметно увеличить жесткость материала [8, 9], его теплостойкость,

а также снизить теплообразование, оптимизируя гистерезисные свойства [4]. Однако эти исследования предусматривают оптимизацию шинных резин, поэтому в качестве полимерной матрицы использованы каучуки общего назначения (НК, СКИ и его комбинация с БСК).

Вместе с тем каучуки специального назначения, обладающие рядом уникальных свойств,

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

также представляют интерес для создания резиноволокнистых композитов, например, как материала для шевронных уплотнений. Шевронные уплотнения [6] широко используют в машиностроении, химической, фармацевтической и нефтеперерабатывающей промышленности. Их устанавливают в плунжерных насосах, измерительных приборах, гидравлических цилиндрах и вращающихся механизмах. Режим работы таких деталей определяет жесткие требования к материалу для их изготовления. Он должен обладать, наряду с достаточной прочностью, высокой жесткостью и сопротивлением тепловому старению. Известна работа, описывающая резиноволокнистые композиты на основе бутадиен-стирольных каучуков, однако свойства представленных там композитов не отвечают необходимым требованиям [5]. Кроме того, если уплотнитель контактирует с маслами, немаловажное значение приобретает маслостойкость материала. Этим качеством в гораздо большей степени, чем резины на основе каучуков общего назначения, обладают резины на основе нитрильных каучуков. Однако работ, посвященных исследованию нитрильных резин, армированных волокнами, крайне мало. Предпринималась попытка наполнять эластомеры на основе нитрильных каучуков очень малыми количествами углеродных волокон [3, 7], но заметного эффекта это не дало.

Цель

Основной целью данной работы является исследование свойств резиноволокнистых материалов на различной полимерной основе.

Методика

Были исследованы резины на основе каучуков общего и специального назначения, содержащие различные типы волокнистых наполнителей: полиамидное и хлопковое волокно короткой длины (4–6 мм), а также стекловолокно, аппретированное γ -аминопропилтриэтоксисиланом. Начальная длина стекловолокна 90–110 мм, однако в процессе изготовления резиноволокнистых композитов длина стекловолокна уменьшается до 1–3 мм. Свойства композитов в значительной степени определяют уровнем адгезии коротких волокон к резине [12]. В ка-

честве модификатора, обеспечивающего высокую прочность связи армирующих волокон с эластомерной матрицей, в композиты вводили м-фенилен-бис-малеинимид [1]. Резины содержали также серу, ускорители вулканизации и наполнители. Для повышения эффективности м-фенилен-бис-малеинимида в резиновую матрицу вводили стеарат натрия [2].

Изготовление резиновых смесей производили в резиносмесителе, а армирующие волокна вводили на вальцах. Необходимо было обеспечить направленное, а не хаотичное расположение волокон в композите. Это было достигнуто режимом вальцевания. Волокна перемешивали с резиновой матрицей при зазоре вальцев 1,0–1,5 мм. В конце перемешивания полученный композит 3 раза пропускали через зазор вальцев 0,3–0,5 мм, не меняя направления вальцевания.

Полученные образцы вулканизовали в гидравлическом прессе с паровым обогревом. Температура вулканизации 143 °С.

Жесткостные свойства резиноволокнистых композитов определяли по модулю жесткости при 5 и 20 % деформации растяжения. Для этого снимали кривую зависимости нагрузки от деформации для образца в виде двусторонней лопатки, и по полученной кривой определяли напряжение в образце при данной деформации.

Для теплового старения образцов использовали воздушный термостат.

Результаты

Резиноволокнистые композиты, созданные на основе сочетания полимеров СКИ–3 + БСК + СКД (60 + 30 + 10), БСК (100) и БСК + СКД (70 + 30), обладали высокими прочностными и жесткостными свойствами. Введение волокон позволило повысить прочность материала на 5–60 % по сравнению с полимерной матрицей. Жесткость же материала выросла гораздо существеннее. Свойства матриц и композитов приведены в табл. 1.

Сопоставительная оценка свойств резиноволокнистых композитов на основе маслостойких каучуков марок СКН–18 и СКН–40 показала преимущество каучука СКН–40.

Было исследовано также влияние соагентов различной природы на свойства композитов.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Установлено, что оптимальный комплекс прочностных и жесткостных свойств резиноволокнистых композитов на основе СКН–40 достигается при введении перекиси дикумила. Кроме того, композиты на основе СКН–40 имеют су-

щественное преимущество перед композитами на основе каучуков общего назначения по сохранению свойств в условиях длительного старения при высокой температуре (120° x 96 час). Полученные данные представлены в табл. 2.

Таблица 1

Влияние типа каучука на свойства резиноволокнистых композитов

Table 1

Influence of the rubber type on the properties of rubber-fiber composites

Полимерная основа:			
СКИ–3	60	–	–
СКМС–30 АРКМ–15	30	100	70
СКД	10	–	30
Свойства матрицы:			
Прочность связи по Н-методу с кордом 23 к сур, кН/м	13,0	17,7	18,8
Условное напряжение при удлинении 300 %, МПа	11,8	7,1	7,0
Условная прочность при растяжении, МПа	20,4	16,4	15,0
Относительное удлинение при разрыве, %	490	610	560
Сопротивление раздиру, кН/м	67	69	–
Свойства композитов (10 об. % ПА волокна):			
Модуль жесткости при 5 % удлинения, МПа	79,0	90,6	108,5
Модуль жесткости при 20 % удлинения, МПа	61,3	69,2	90,4
Условная прочность при растяжении, МПа	21,5	24,2	24,4
Относительное удлинение при разрыве, %	43	44	32

Таблица 2

Свойства резиноволокнистых композитов на основе СКН–40

Table 2

Properties of NBR–40 rubber-fiber composites

Свойства матрицы:	
Прочность связи по Н-методу с кордом 23 к сур, кН/м	14,8
Условное напряжение при удлинении 300 %, МПа	9,8
Условная прочность при растяжении, МПа	20,1
Относительное удлинение при разрыве, %	580
Свойства композитов (10 об. % ПА волокна)	
Модуль жесткости при 5 % удлинении, МПа при н. у. после старения 120о x 96 час	94,0
Модуль жесткости при 20 % удлинении, МПа при н.у. после старения 120о x 96 час	127,0
Условная прочность при растяжении, МПа при н.у. после старения 120о x 96 час	747
	110,4
	237

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Продовження табл. 1

Continuation of Table 1

Относительное удлинение при разрыве, %	296
после старения 120о x 96 час	43
Накопление относительной остаточной деформации при 20 % сжатия	23
после старения 150о x 24 час	13

Представляло интерес исследовать возможность дальнейшего повышения жесткостных характеристик материала. Увеличение жесткости было достигнуто двумя путями:

– повышением концентрации технического углерода;

– введением волокон с высоким модулем жесткости (хлопкового и стекловолокна) дополнительно к ПА волокну.

Резины изготавливали на основе 100 м. ч. БСК и 100 м. ч. СКН – 40. Полученные результаты представлены в табл. 3 и 4

Таблица 3

**Влияние типа наполнителя на свойства резиноволокнистых
композитов на основе БСК**

Table 3

**The influence of the type of fillers on the properties of styrene butadiene
rubber-fiber composites**

Наполнители				
ПЗ24, м. ч.	–	50	60	70
ПЗ34, м. ч.	50	–	–	–
ПА волокно, об %	10	10	10	10
Хлопковое волокно, об %	–	–	20	–
Свойства матрицы:				
Прочность связи по Н-методу с кордом 23 к сур, кН/м	17,7	–	13,1	16,1
Условное напряжение при удлинении 300 %, МПа	7,1	10,4	13,3	13,6
Условная прочность при растяжении, МПа	16,4	16,3	18,0	15,8
Относительное удлинение при разрыве, %	610	490	390	340
Соппротивление раздиру, кН/м	69	65	57	62
Свойства композитов:				
Модуль жесткости при 5 % удлинения, МПа	90,6	87,9	130,9	92,6
Модуль жесткости при 20 % удлинения, МПа	69,2	77,9	73,9	78,8
Условная прочность при растяжении, МПа	24,2	22,2	18,6	20,3
Относительное удлинение при разрыве, %	44	31	22	34

Как следует из приведенных данных, увеличение концентрации технического углерода для резиноволокнистых композитов на основе СКН – 40 с 50 до 70 м. ч. повышает модуль жесткости материала примерно на 15 %. Наиболее высокие жесткостные характеристики композитов

(как на основе СКН–40, так и на основе БСК) достигаются при применении комбинации волокон полиамидного и хлопкового. В этом случае модуль жесткости удалось повысить на 30–40 %, при этом прочностные свойства материала остаются на достаточно высоком уровне.

Таблица 4

**Влияние типа наполнителей на свойства резиноволокнистых
композитов на основе СКН–40**

Table 4

**The influence of the type of fillers on the properties
of NBR–40 rubber-fiber composites**

Наполнители:				
ПЗ24, м.ч.	50	70	50	50
ПА волокно, об %	10	10	10	10
Хлопковое волокно, об %	–	–	20	–
Стекловолокно, об %	–	–	–	10
Свойства матрицы:				
Прочность связи по Н-методу с кордом 23 к сур, кН/м	14,8	11,9	12,2	11,8
Условное напряжение при удлинении 300 %, МПа	9,7	–	11,8	11,0
Условная прочность при растяжении, МПа	20,1	19,0	20,5	19,0
Относительное удлинение при разрыве, %	580	280	480	490
Сопротивление раздиру, кН/м	–	59	61	58
Свойства композитов:				
Модуль жесткости при 5 % удлинения, МПа	94,0	119,3	124,2	104,0
Модуль жесткости при 20 % удлинения, МПа	74,7	106,2	83,0	79,4
Условная прочность при растяжении, МПа	23,7	27,9	19,4	19,5
Относительное удлинение при разрыве, %	43	30	30	34

позволяют отказаться от тканевых прослоек, заметно снизив, тем самым, трудоемкость изготовления шевронных уплотнений.

**Научная новизна и практическая
значимость**

Впервые установлена возможность создания резиноволокнистых композитов на основе маслостойкого бутадиен-нитрильного каучука марки СКН–40, обладающих оптимальным комплексом жесткостных, прочностных свойств и сопротивлением тепловому старению. Это дает возможность создавать композиционные материалы для маслостойких шевронных уплотнений. Как правило, шевронные уплотнения армируют обрезиненными техническими тканями для обеспечения необходимой жесткости. Резиноволокнистые композиты

Выводы

Показано, что введение волокон различной природы в полимерную матрицу на основе каучуков не только общего, но и специального назначения позволяет значительно повысить жесткостные свойства материала и его сопротивление тепловому старению. Существенно важным является тот факт, что при этом удается сохранить необходимый уровень прочностных характеристик материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гришин, Б. С. Материалы резиновой промышленности (информационно-аналитическая база данных) : в 2 ч. : монография / Б. С. Гришин. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. – Ч. 2. – 485 с.
2. Дзюра Е.А. Увеличение эффективности бис-малеинимидов, как модификаторов адгезии резин к полиамидным монофиламентным и комплексным нитям // Резиновая промышленность: сырье, материалы, технология : Тез. докл. XX Межд. научн.-практ. конф. – Москва, 2015. – С. 100–102.
3. Красникова, И. В. Создание углерод-углеродных и углерод-минеральных гибридных систем методом каталитического наномодифицирования : дис ... канд. хим. наук : 02.00.04 / Красникова Ирина Вадимовна ; ин-т катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отд. РАН. – Новосибирск, 2017. – 186 с.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

4. Маркова, И. В. Гистерезисные свойства и теплообразование резиноволокнистых композитов / И. В. Маркова, Е. А. Дзюра // Вопросы химии и хим. технологии. – 2011. – № 3. – С. 59–62.
5. Никулин, С. С. Композиционные материалы на основе наполненных бутадиен-стирольных каучуков / С. С. Никулин, И. Н. Пугачева, О. Н. Черных. – Москва : Академия Естествознания, 2008. – 160 с.
6. Справочник химика 21 [Электронный ресурс] : Химия и химическая технология. – Режим доступа: chem21.info/info/820459 – Загл. с экрана. – Проверено : 02.01.2019.
7. Шадринов, Н. В. Модификация резины В-14 углеродными волокнами [Электронный ресурс] / Н. В. Шадринов // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 115 (01). Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/modifikatsiya-reziny-v-14-uglerodnymi-voloknami> – Загл. с экрана. – Проверено : 02.01.2019.
8. Karaağaç, B. Properties of NR and NR/ENR Based Rubber Compounds Reinforced with Chopped and Sized Carbon Fiber / B. Karaağaç, B. N. Yeşil // Anadolu University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering. – 2016. – Vol. 17. – Iss. 5. – P. 926–935. doi: 10.18038/auubtda.279860
9. Kashani, M. R. Aramid-short-fiber reinforced rubber as a tire tread composite / Mehdi Razzaghi Kashani // Journal of Applied Polymer Science. – 2009. – Vol. 113. – Iss. 2. – P. 1355–1363. doi: 10.1002/app.30026
10. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview / L. Mishnaevsky, K. Branner, H. Petersen, J. Beauson, M. McGugan, B. Sørensen // Materials. – 2017. – Vol. 10. – Iss. 11. – P. 1285. doi: 10.3390/ma10111285
11. Manufacturing Technology of Composite Materials – Principles of Modification of Polymer Composite Materials Technology Based on Polytetrafluoroethylene / A. Panda, K. Dyadyura, J. Valíček, M. Harničárová, J. Zajac, V. Modrák, I. Pandová, P. Vrábel, E. Nováková-Marcinčinová, Z. Pavelek // Materials. – 2017. – Vol. 10. – Iss. 4. – P. 377–397. doi: 10.3390/ma10040377
12. Sobhy, M. S. The Influence of Fiber Length and Concentration on the Physical Properties of Wheat Husk Fibers Rubber Composites / Maged S. Sobhy, M. T. Tammam // International Journal of Polymer Science. – 2010. – Vol. 2010. – P. 1–8. doi: 10.1155/2010/528173

І. В. МАРКОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Хімія та інженерна екологія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 425 35 77, ел. пошта markova60.i.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-7867-5380

ВПЛИВ ПОЛІМЕРНОЇ ОСНОВИ НА ВЛАСТИВОСТІ ГУМОВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ

Мета. У цій роботі передбачено дослідити вплив каучуків загального та спеціального призначення як полімерної матриці на жорсткісні властивості, міцність гумоволокнистих композитів та їх опір тепловому старінню. **Методика.** Гумоволокнисті композити виготовляли на основі каучуків загального (ізопреновий, бутадиєн-стирольний, дивініловий) і спеціального (бутадиєн-нітрильний) призначення. Як армувальні волокна використовували поліамідне, бавовняне та скло - волокна. Для забезпечення високої міцності зв'язку армувальних волокон із матрицею в гуми вводили хімічний модифікатор м-фенілен-біс-малеїнімід. Гумові суміші виготовляли в гумозмішувачі. Волокно в гумову матрицю вводили на вальцях за зазору між валками 1,0–1,5 мм. Наприкінці змішування отриману суміш 3 рази пропускали крізь зазор вальців 0,3–0,5 мм, не змінюючи напрямку вальцювання. Вулканізацію зразків проводили в гідравлічному пресі з паровим обігрівом за температури 143 °С та оптимального часу вулканізації. Для визначення модуля жорсткості гумоволокнистих композитів за малих деформацій (5, 20 %) розтягування знімали навантажувальну криву (залежність навантаження від деформації) для зразка у вигляді двосторонньої лопатки. За отриманою кривою визначали напругу у зразку, що відповідає деформації. Теплове старіння вулканікатів здійснювали в повітряному термостаті за 120 °С протягом 96 годин. **Результати.** Показано, що армування короткими волокнами гум на основі каучуків не тільки загального, але й спеціального призначення дозволяє значно підвищити їх жорсткісні властивості й опір тепловому старінню зі збереженням необхідного рівня міцності. Максимальні жорсткісні характеристики гумоволокнистих композитів досягаються в разі застосування комбінації армувальних волокон. **Наукова новизна.** Уперше була показана можливість створення гумоволокнистих композитів на основі бутадиєн-нітрильної еластомерної матриці з високими показниками жорсткості, міцності, а також опору тепловому старінню. **Практична значимість.** Отримані результати відкривають перспективи

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2018/154441

© І. В. Маркова, 2018

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

розробки матеріалів для шевронних ущільнювачів та інших конструкційних елементів, де необхідні високі показники не тільки жорсткості й теплостійкості, але й маслостійкості.

Ключові слова: гумоволокнисті композити; полімерна матриця; бутадиєн-нітрильний каучук; жорсткісні властивості; опір тепловому старінню

I. V. MARKOVA^{1*}

^{1*}Dep. «Chemistry and Engineering Ecology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St, 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 425 35 77, e-mail markova60.i.v@gmail.com, ORCID 0000-0001-7867-5380

INFLUENCE OF THE POLYMERIC BASIS ON THE PROPERTIES OF RUBBER-FIBER COMPOSITES

Purpose. This study investigates the influence of common and special rubbers as a polymer matrix on the stiffness, strength properties of rubber-fiber composites and their resistance to heat aging. **Methodology.** Rubber-fibre composites were made on the basis of general (isoprene, styrene-butadiene, divinyl) and special (nitrile-butadiene) rubbers. Polyamide, cotton and fiberglass were used as reinforcing fibers. To ensure high bond strength of the reinforcing fibers with the matrix, the chemical modifier m-phenylene-bis-maleimide was introduced into the rubber. Rubber mixtures were made in a rubber mixer. The fibre in the rubber matrix was introduced on the rollers with a gap between the rolls of $1.0 \div 1.5$ mm. At the end of mixing, the mixture was passed three times through the gap of rollers $0.3 \div 0.5$ mm without changing the direction of rolling. Vulcanization of the samples was carried out in a hydraulic press with steam heating at a temperature 143°C and the optimum time of vulcanization. To determine the stiffness modulus of rubber-fiber composites with small deformations (5%, 20%) of tension, the load curve was received (strain deformation dependency) for the sample in the form of a double-sided blade. According to the obtained curve, the tension in the sample corresponding to the strain was determined. Thermal aging of the vulcanizates was carried out in an air thermostat at 120°C for 96 hours. **Findings.** The article shows that the reinforcement of vulcanized rubbers based not only on common rubbers, but also on the rubbers of special purposes by short fibres allows significantly increasing their stiffness properties and resistance to heat aging at maintaining the required level of strength characteristics. The maximum stiffness characteristics of rubber-fiber composites were achieved by using a combination of reinforcing fibres. **Originality.** For the first time, the possibility of creating rubber-fibre composites based on a nitrile-butadiene elastomer matrix with high rates of stiffness, strength properties, as well as resistance to heat aging was shown. **Practical value.** The obtained results open the prospects for the development of materials for chevron seals and other constructive elements where high rates of not only stiffness and heat resistance, but also oil resistance were necessary.

Key words: rubber-fibre composites; polymer matrix; nitrile-butadiene rubber; stiffness properties; heat aging resistance

REFERENCES

1. Grishin, B. S. (2010). *Materialy rezinovoy promyshlennosti (informatsionno-analiticheskaya baza dannykh): monografiya*. (Vol. 1-2). Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. (in Russian)
2. Dzyura, Y. A. (2015). Uvelichenie effektivnosti bis-maleinimidov, kak modifikatorov adgezii rezin k poli-amidnym monofilamentnym i kompleksnym nityam. *Rezinovaya promyshlennost: syre, materialy, tekhnologiya : Tezisy dokladov KhKh Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow. (in Russian)
3. Krasnikova, I. V. (2017). *Sozdanie uglerod-uglerodnykh i uglerod-mineralnykh gibridnykh sistem metodom kataliticheskogo nanomodifitsirovaniya*. (Dysertatsiya kandydata khimicheskikh nauk). Institut kataliza im. G. K. Boreskova Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk. Novosibirsk. (in Russian)
4. Markova, I. V., & Dzyura, Y. A. (2011). Gisterezisnye svoystva i teploobrazovanie rezinovoloknistykh kompozitov. *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 3, 59-62. (in Russian)
5. Nikulin, S. S., Pugacheva, I. N., & Chernykh, O. N. (2008). *Kompozitsionnye materialy na osnove napolnen-nykh butadien-stirolnykh kauchukov*. Moscow: Akademiya Yestestvoznaniya. (in Russian)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

6. Spravochnik khimika 21. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. Retrieved from chem21.info/info/820459 (in Russian)
7. Shadrinov, N. V. (2016). Modifikatsiya reziny V-14 uglerodnymi voloknami. *Nauchnyy zhurnal KubGAU, 115(01)*. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/v/modifikatsiya-reziny-v-14-uglerodnymi-voloknami>. (in Russian)
8. Karaağaç, B., & Yeşil, B. N. (2016). Properties of NR and NR/ENR Based Rubber Compounds Reinforced with Chopped and Sized Carbon Fiber. *Anadolu University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering, 17(5)*, 926-935. doi: 10.18038/aubtda.279860
9. Kashani, M. R. (2009). Aramid-short-fiber reinforced rubber as a tire tread composite. *Journal of Applied Polymer Science, 113(2)*, 1355-1363. doi: 10.1002/app.30026 (in English)
10. Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials, 10(11)*, 1285. doi: 10.3390/ma10111285 (in English)
11. Panda, A., Dyadyura, K., Valíček, J., Harničárová, M., Zajac, J., Modrák, V., ... Pavelek, Z. (2017). Manufacturing Technology of Composite Materials – Principles of Modification of Polymer Composite Materials Technology Based on Polytetrafluoroethylene. *Materials, 10(4)*, 377-397. doi: 10.3390/ma10040377 (in English)
12. Sobhy, M. S., & Tammam, M. T. (2010). The Influence of Fiber Length and Concentration on the Physical Properties of Wheat Husk Fibers Rubber Composites. *International Journal of Polymer Science, 2010*, 1-8. doi: 10.1155/2010/528173 (in English)

Поступила в редколлегию: 02.08.2018

Принята к печати: 30.11.2018

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

UDC 004.7:004.032.26

V. M. PAKHOMOVA^{1*}, I. D. TSYKALO^{2*}

^{1*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

^{2*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail ihor.tsykalo@gmail.com, ORCID 0000-0002-1629-5873

OPTIMAL ROUTE DEFINITION IN THE NETWORK BASED ON THE MULTILAYER NEURAL MODEL

Purpose. The classic algorithms for finding the shortest path on the graph that underlie existing routing protocols, which are now used in computer networks, in conditions of constant change in network traffic cannot lead to the optimal solution in real time. In this regard, the purpose of the article is to develop a methodology for determining the optimal route in the unified computer network. **Methodology.** To determine the optimal route in the computer network, the program model «MLP 34-2-410-34» was developed in Python using the TensorFlow framework. It allows to perform the following steps: sample generation (random or balanced); creation of a neural network, the input of which is an array of bandwidth of the computer network channels; training and testing of the neural network in the appropriate samples. **Findings.** Neural network of 34-2-410-34 configuration with ReLU and Leaky-ReLU activation functions in a hidden layer and the linear activation function in the output layer learns from Adam algorithm. This algorithm is a combination of Adagrad, RMSprop algorithms and stochastic gradient descent with inertia. These functions learn the most quickly in all volumes of the train sample, less than others are subject to re-evaluation, and reach the value of the error of 0.0024 on the control sample and in 86% determine the optimal path. **Originality.** We conducted the study of the neural network parameters based of the calculation of the harmonic mean with different activation functions (Linear, Sigmoid, Tanh, Softplus, ReLU, L-ReLU) on train samples of different volumes (140, 1400, 14000, 49000 examples) and with various neural network training algorithms (BGD, MB SGD, Adam, Adamax, Nadam). **Practical value.** The use of a neural model, the input of which is an array of channel bandwidth, will allow in real time to determine the optimal route in the computer network.

Keywords: computer network; optimal route; neural network; sampling; harmonic mean; activation function; optimization algorithm

Introduction

One of the main requirements for routing algorithms is their rapid matching to an optimal solution, dictated by the need for their protocol realization in real time in the conditions of continuous change in the characteristics of network traffic, topology and load of computer networks used in the rail transport. Classic algorithms for finding the

shortest path on the graph used in modern routing protocols cannot do this. One of the approaches to solving routing problems in computer networks is the use of neural network technology [8, 15–16]. For example, in [12] it is shown that with the help of a neural network (NN) it is possible to find a solution, close to the optimal, to the travelling salesman problem and to find the shortest path on the graph. In [3] for solving routing problems there

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

is studied the possibility of applying the following neural networks: Multi Layer Perceptron; RBF network; Hopfield network. It is established that the most promising means for solving the routing problem are the direct distribution neural network and the Hopfield network, which are capable of operating under conditions of dynamic change in the topology of the computer network and the characteristics of the data transmission channels [1–2]. In particular, when using the Hopfield network, additional research is required on the transfer functions of the neurons and on the energy of the neural network [18]. In [7], it was discovered that the Hopfield network finds a satisfactory route that differs from the optimal one by 7-8% in average (in the case of more than 15 seats). The possibility of using the Hopfield network to find the shortest path on the route graph in the computer network of railway transport is analysed [5–6]. In [3], the use of the direct distribution neural network created in MatLAB for the purpose of determining the route in a computer network of five nodes was investigated. But the integrated computer network of rail transport consists of a much larger number of nodes, which requires additional research. In particular, [20] proposed an intellectual control subsystem with the use of network technology, [17] – a subsystem of prediction based on a neural fuzzy network.

Purpose

To develop a methodology for determining the optimal route in the unified computer network based on the created software model «MLP34-2-410-34» using the TensorFlow framework.

Methodology

A combined computer network that works on different technologies can be represented as an unoriented graph $G(V, W)$, where V is the set of

graph vertices, the number of which is N , with each vertex modelling a node (router) of the computer network; W is the set of graph edges, the number of which is M . Each graph edge is assigned with a certain weight corresponding to the bandwidth (the maximum amount of data transmitted by the network per unit time):

$$C = \{c_{ij}\}, \quad (1)$$

where c_{ij} – bandwidth of the communication channel between the i -th and j -th network nodes, Mbps.

To solve the routing problem, it is necessary to find the optimal path between the two routers assigned to the unified computer network. As an example, we will consider a hypothetical computer network whose structure is shown in Fig. 1

Let us introduce the array:

$$X = \{x_{ij}\}, \quad (2)$$

where x_{ij} – availability of traffic transmitted within the network between the i -th and j -th vertices. As a limit $x_{ij} \in \{0, 1\}$, i.e. the variable takes value 1, if the traffic flows through the channel (i, j) ; otherwise – 0.

As the criterion of optimality, the following expression is supported:

$$\min_X F \cdot X, \quad (3)$$

where $f_{ij} = \frac{125000000}{c_{ij}}$, which guarantees the search for a path with the maximum bandwidth.

If there is no connection between the nodes of the unified computer network, then $c_{ij} = c_{ji} = 0$ (hence, $f_{ij} = \infty$).

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

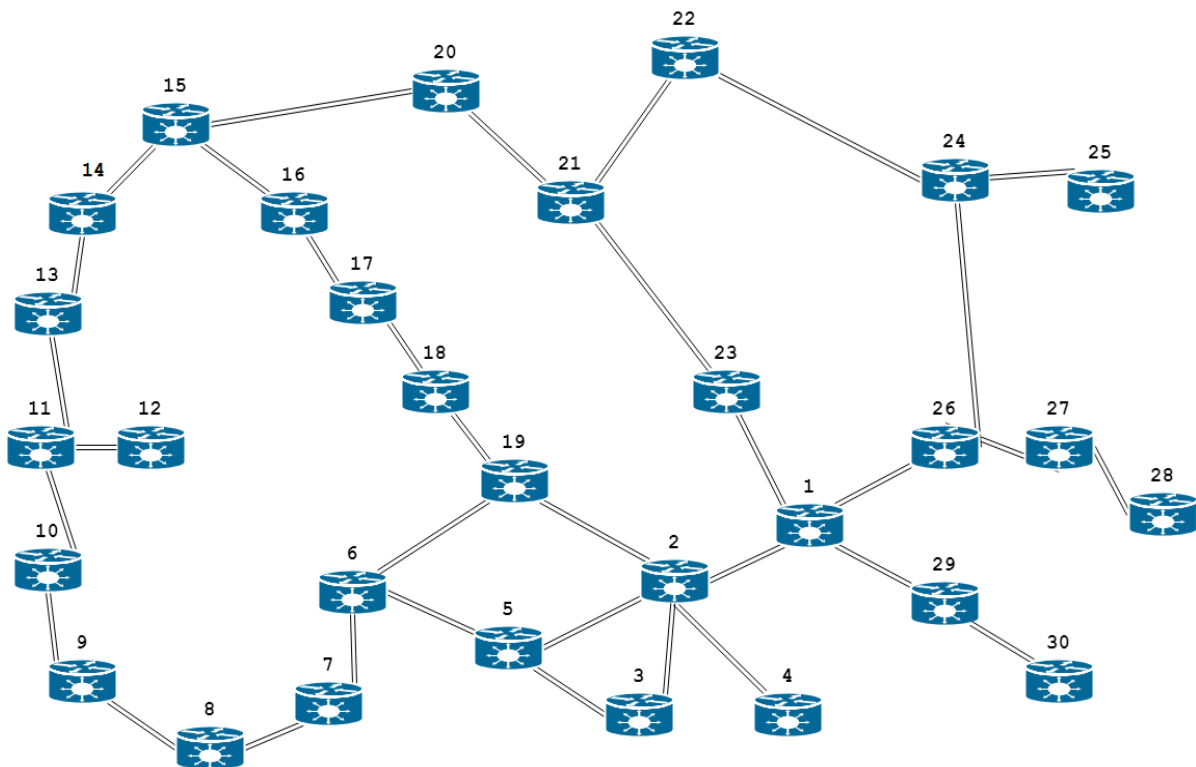


Fig. 1. Graph of router connections of unified computer network

Findings

Neural network as the main mathematical tool for solving the problem. In the unified computer network there are 30 routers and 34 communication channels. As an example, let us consider the solution to the problem of determining the optimal route between the nodes «12» and «1». Generally between the indicated nodes there are 14 unique paths.

- Path 1: [12, 11, 13, 14, 15, 20, 21, 23, 1];
 path 2: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 19, 2, 1];
 path 3: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 2, 1];
 path 4: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 3, 2, 1];
 path 5: [12, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 2, 1];
 path 6: [12, 11, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 24, 26, 1];
 path 7: [12, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 6, 5, 2, 1];
 path 8: [12, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 6, 5, 3, 2, 1];
 path 9: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 19, 18, 17, 16, 15, 20, 21, 23, 1];
 path 10: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 19, 18, 17, 16, 15, 20, 21, 22, 24, 26, 1];

path 11: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 2, 19, 18, 17, 16, 15, 20, 21, 23, 1];

path 12: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 3, 2, 19, 18, 17, 16, 15, 20, 21, 23, 1];

path 13: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 2, 19, 18, 17, 16, 15, 20, 21, 22, 24, 26, 1];

path 14: [12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 3, 2, 19, 18, 17, 16, 15, 20, 21, 22, 24, 26, 1].

To solve the routing problem, we used the NN, whose structure is shown in Fig. 2. To the NN input, there is applied a vector of bandwidth of the channels of the unified computer network X , which characterizes its current state $X = \{x_i\}$, where $i = 1, \dots, m$ ($m = 34$). For example, for NN, when using the train sample of 1,400 examples, the number of required neurons in the hidden layer is estimated as follows:

$$\frac{34 \cdot 1400}{(1 + \log_2 1400) \cdot (34 + 34)} \leq L \leq$$

$$\leq \frac{34 \cdot \left(\frac{1400}{34} + 1\right) \cdot (34 + 34 + 1) + 34}{34 + 34}$$

Hence, $62 \leq L \leq 1456$.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

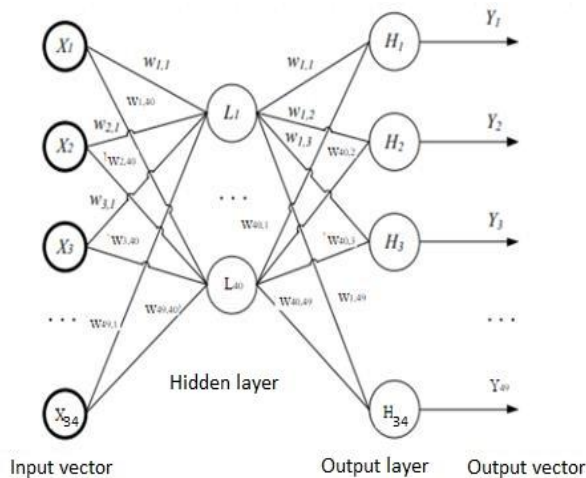


Fig. 2. Structure of multilayer NN

Sample preparation (preparatory stage). Formation of the sample is carried out according to the fixed structure of the unified computer network (see Fig. 1). The input vector X is constructed by randomly generating channel bandwidth values c_{ij} , while these values are formed by a uniform distribution onto the segments $[100; 100,000,000]$. The response vector Y is generated by calculating the optimal path according to the Dijkstra algorithm using the Python language of the Networkx library (open source software library used to work with graphs and networks).

The samples are constructed so that each of 14 unique paths is present at the same frequency. The test sample has 700 examples, validation sample has 700 examples, the first train sample has 140 examples (10 examples for each path), the second train sample has 1,400 examples (100 examples for each path), the third training sample – 14,000 examples (1,000 examples for each path), the fourth train sample – 49,000 examples (3,500 examples for each path).

All data is initially normalized to the range from 0 to 1 by the formula:

$$x = \frac{x - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}, \quad x \in X \quad (4)$$

The structure of the resulting vector is as follows: $Y = [y_{1,2}, y_{1,26}, y_{1,29}, y_{1,23}, y_{2,19}, y_{2,3}, y_{2,5}, y_{2,4}, y_{3,5}, y_{5,6}, y_{6,19}, y_{6,7}, y_{7,8}, y_{8,9}, y_{9,10}, y_{10,11}, y_{11,12}, y_{11,13}, y_{13,14}, y_{14,15}, y_{15,16}, y_{15,20}, y_{16,17}, y_{17,18}, y_{18,19}, y_{20,21},$

$y_{21,22}, y_{21,23}, y_{22,24}, y_{24,25}, y_{24,26}, y_{26,27}, y_{27,28}, y_{29,30}]$, where $y_{ij} \in \{0,1\}$, that corresponds to using or not using the appropriate channel in the route.

Justifying the choice of modelling tools. To solve the routing problem in the unified computer network, the Keras library was selected using TensorFlow and Numpy in the Python programming language [9–11, 13–14, 19].

Keras is an open neural network library in Python language capable of working on top of DeepLearning4, TensorFlow and Theano, designed for quick neural network deep learning experiments.

TensorFlow is an open source software library for machine learning. It is the second-generation GoogleBrain machine learning system released as open source software.

Numpy is an extension of the Python language that supports large, multidimensional arrays and matrices, along with a library of high-level mathematical functions for operations with these arrays.

Python is an interpreted object-oriented high-level programming language with strict dynamic typing. High-level data structures, along with dynamic semantics and dynamic linking, make it attractive for rapid development of applications, as well as a tool for existing components. Python supports modules and module packages, which facilitates modularity and reuse of the code. Python interpreter and standard libraries are available both in compilation and in source form on all major platforms. Python programming language supports several programming paradigms, including: object-oriented; procedural; functional; aspect-oriented.

Structure of MLP 34-2-410-34 software model. MLP 34-2-40-34 software model, created for modelling and research, consists of the main module «Main» and the following classes: Generator, MLPModel, NetworkX, Matplotlib, Keras.Model, Metrics, Tensorflow. The main module «Main» provides the menu tasks: 1 – sample generation; 2 – neural network training; 3 – neural network testing. «Generator» performs a sample preparation in two modes: random (calculating the random number of examples for each path, Fig. 3, a); balanced (the same number of examples for each possible path, Fig. 3, b). For example, a sample of 140 examples in balanced mode takes 5 minutes, while in random mode it takes less than one minute.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

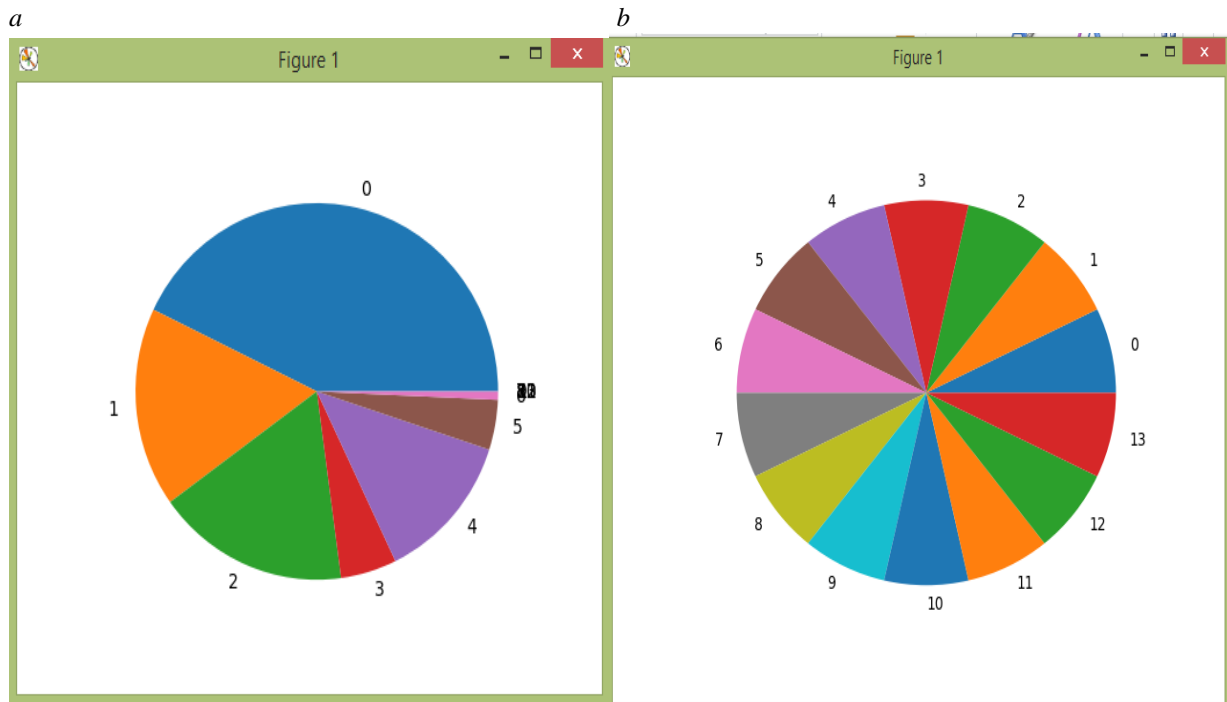


Fig. 3. Generation of sample:
a –random; b –balanced

«MLPModel» creates a neural network of 34-2-X-34 configuration (where X is the possible number of hidden neurons) and performs the following steps: training; testing; control on the corresponding samples and their normalization.

«NetworkX» (standard class) builds a graph of the computer network (Graph), calculates the existing paths between stations (all_simple_paths), the path between the specified stations according to the Dijkstra algorithm (bidirectional_dijkstra).

«Matplotlib» (standard class) builds a pie chart and histogram to show the ratio of the number of examples for each path.

«Keras.Model» (standard class) performs compilation in accordance with the given configuration of the neural network (compile), represents the standard functions (fit, predict) that are used during the training and testing of the neural network.

«Metrics» performs the calculation of the pro-

bability of the optimal and of correct answers.

«TensorFlow» (standard class) is called by the «Keras.Model» class when performing the appropriate calculations.

The overall structure of MLP 34-2-40-34 software model is shown in Fig. 4

In order to be able to unambiguously compare the NN models in two parameters – the probability of optimal responses and the probability of correct responses, we entered the value of the harmonic mean, which is calculated by the following formula:

$$H = \frac{2\rho^{opt}\rho^{cor}}{\rho^{opt} + \rho^{cor}}, \quad (5)$$

where ρ^{opt} – probability of optimal responses, ρ^{cor} – probability of correct responses.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

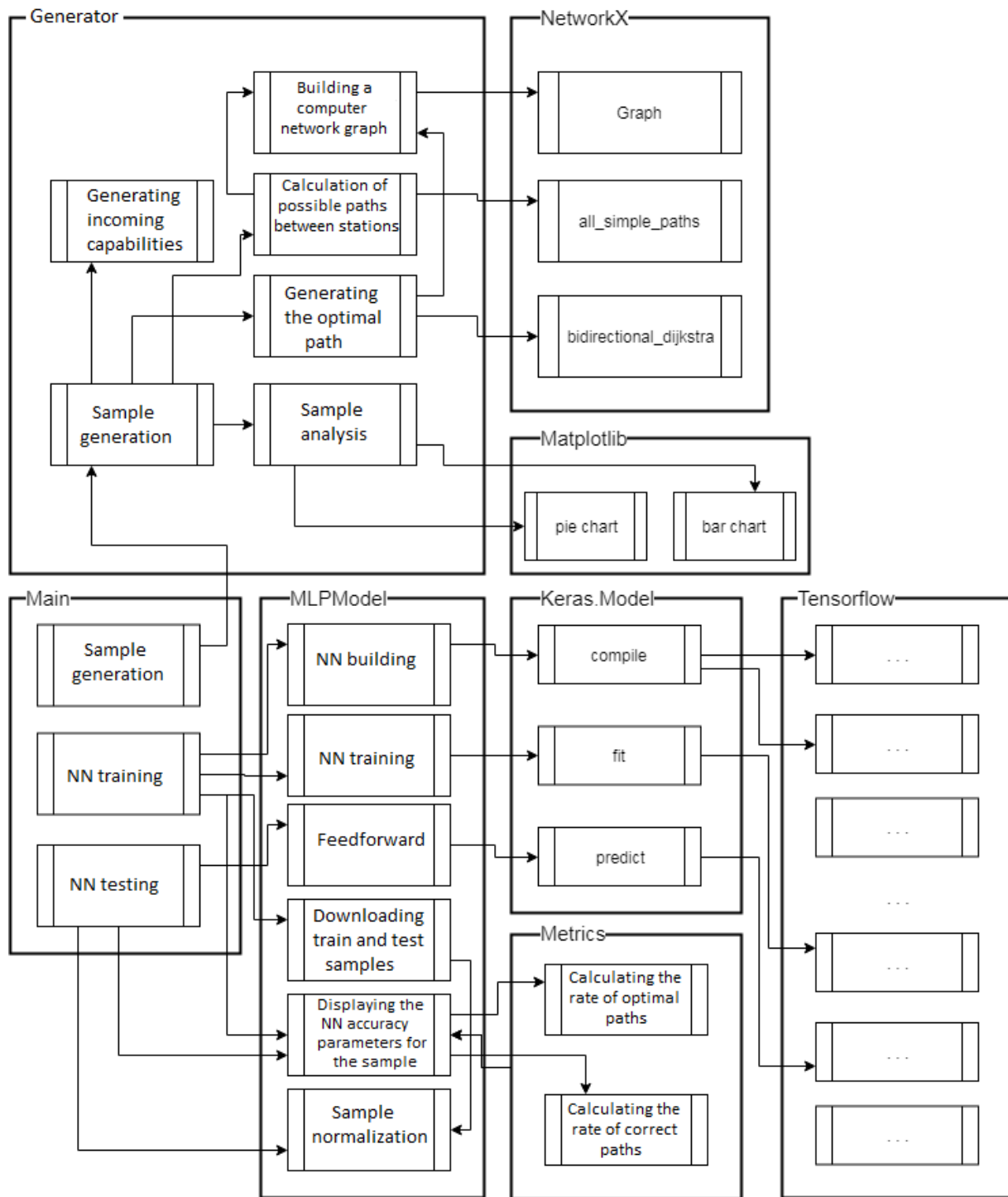


Fig. 4. Structure of MLP 34-2-40-34 software model

Testing MLP34-2-410-34 program. The resulting feature vector of channel entry to the optimal path is as follows: {0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,1,0,0,0,0,0,0},

which corresponds to the following connection of routers in the network: 1–23, 11–12, 11–13, 13–14, 14–15, 15–20, 20–21, 21–23. The resulting path is shown in Fig. 5

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

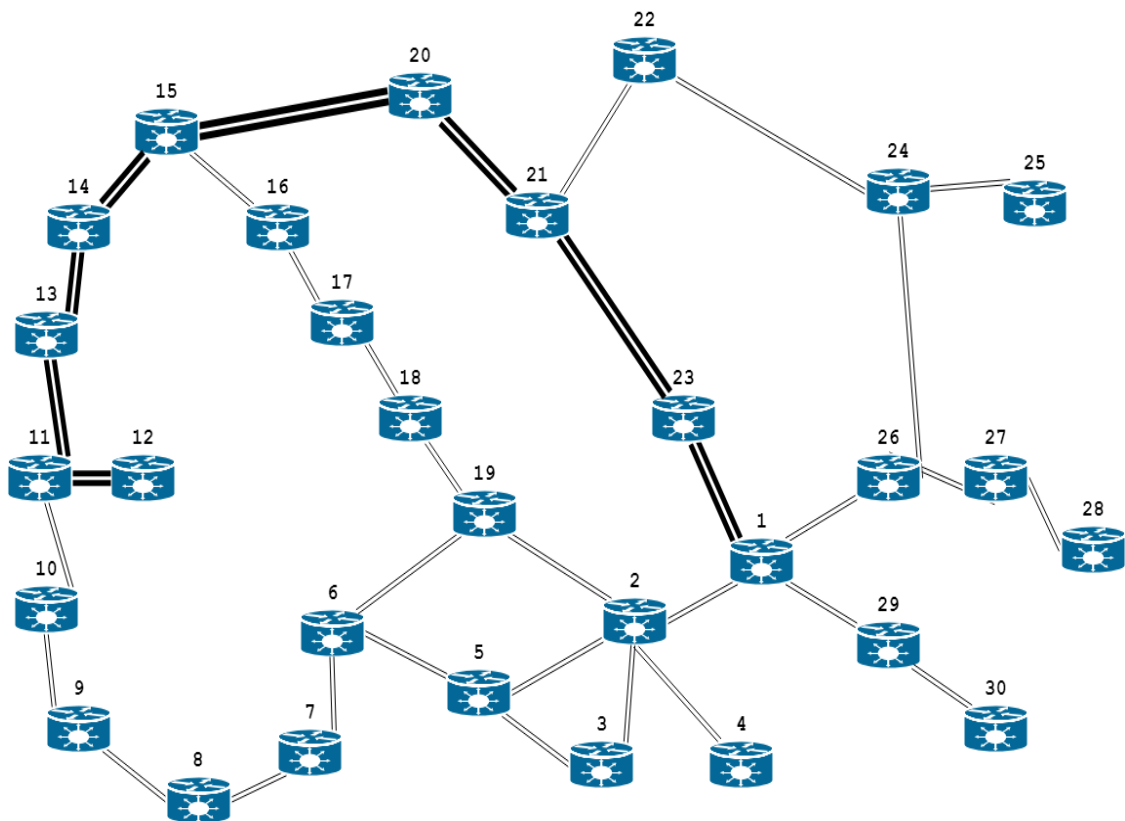


Fig. 5. The resulting optimal path consisting of channels:
12–11, 11–13, 13–14, 14–15, 15–20, 20–21, 21–23, 23–1

Study of the NN training effectiveness for different number of neurons in the hidden layer. The study on the NN model was performed using the stochastic gradient descent algorithm (batch size 64) with Adam optimization (training speed $\alpha = 0.001$, inertia $\beta_1 = 0.9$, RMSprop $\beta_2 = 0.999$, decay = 10^{-5}) on 1,400 study examples, over 1,000

epochs for different numbers of hidden neurons: $L = \{62, 410, 760, 1110, 1456\}$.

The results of the experiment are shown in the Table 1. From the table it is clear that for the train sample the best result of 0.99 is already achieved with 410 neurons in the hidden layer.

Table 1

Study of NN for different number of hidden neurons

Number of hidden neurons		62	410	760	1 110	1 456
Train sample	ρ^{opt}	0.77	0.99	0.99	0.99	0.99
	ρ^{cor}	0.81	0.99	0.99	0.99	0.992
	H	0.79	0.99	0.99	0.99	0.99
Test sample	ρ^{opt}	0.55	0.52	0.51	0.52	0.51
	ρ^{cor}	0.71	0.7	0.69	0.7	0.71
	H	0.62	0.6	0.59	0.6	0.59

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

The NN training process is illustrated in the objective function-epoch dependency graphs for the train and test samples in Fig. 6-10.

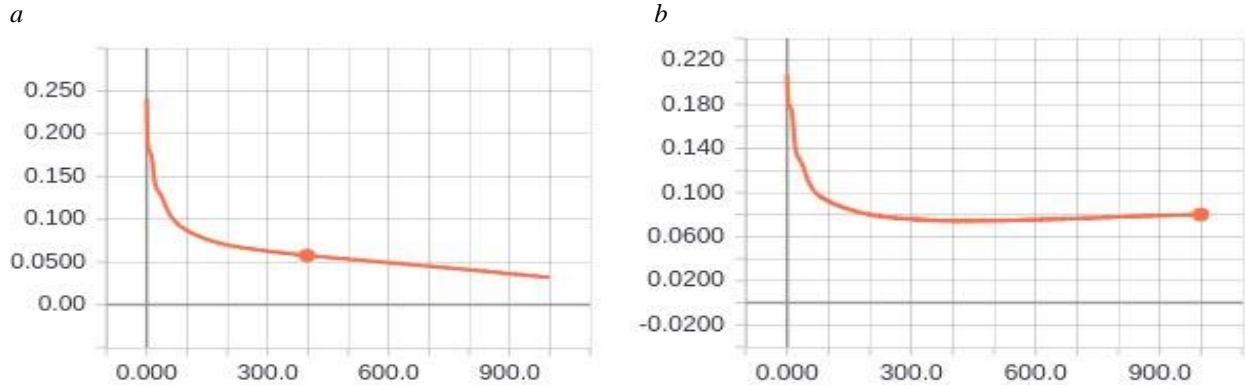


Fig. 6. The 34-2-64-34 NN error-epoch dependency graph on samples:

a – train; *b* – test

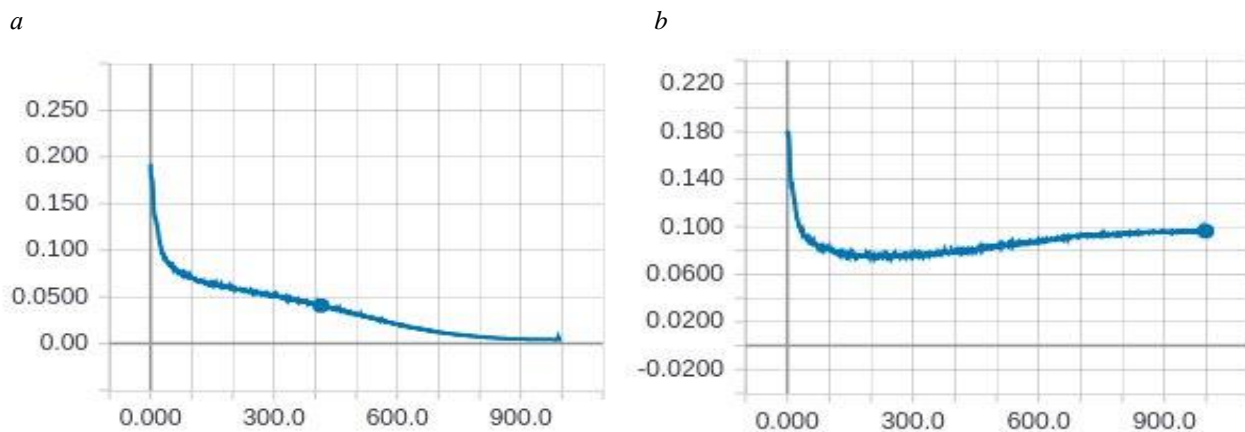


Fig. 6. The 34-2-410-34 NN error-epoch dependency graph on samples:

a – train; *b* – test

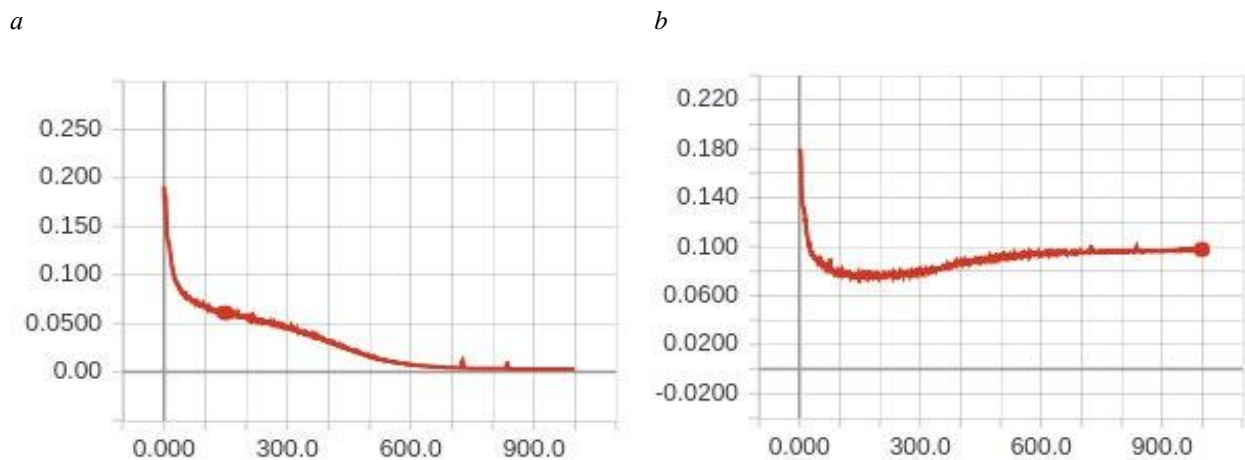


Fig. 6. The 34-2-760-34 NN error-epoch dependency graph on samples:

a – train; *b* – test

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

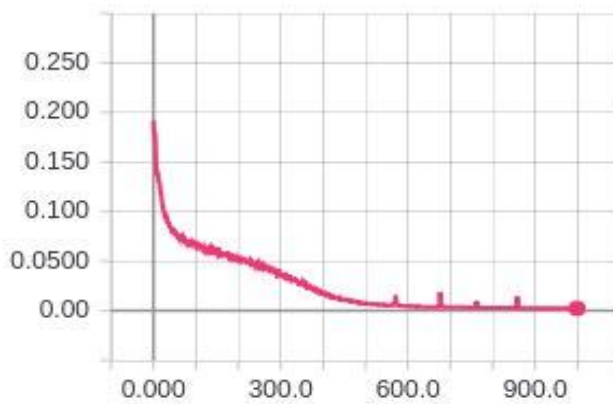
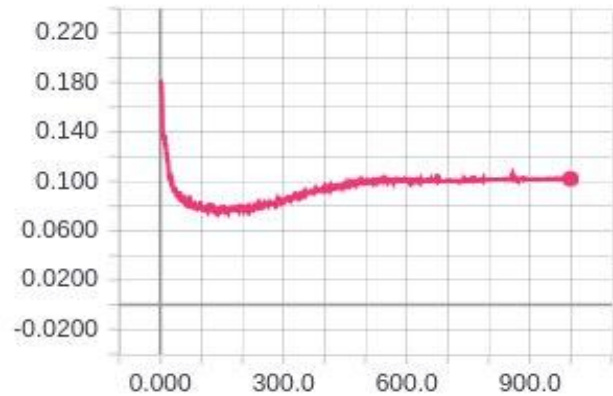
a*b*

Fig. 6. The 34-2-1110-34 NN error-epoch dependency graph on samples:

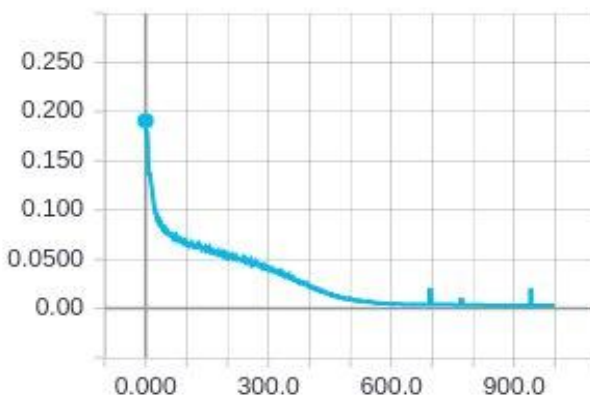
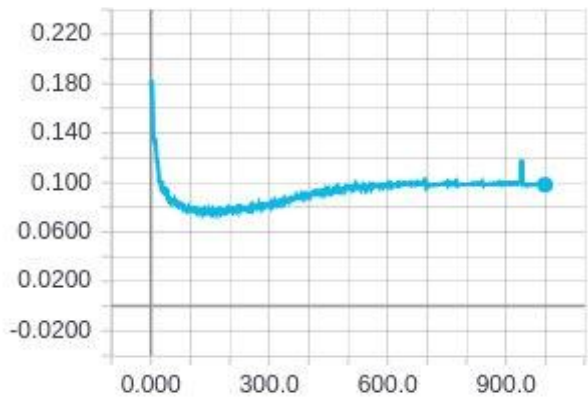
a – train; *b* – test*a**b*

Fig. 6. The 34-2-1456-34 NN error-epoch dependency graph on samples:

a – train; *b* – test

Figures 6-10 show that all of the proposed NN models feature re-training after the 200th epoch. Since the NN model of 34-2-410-34 configuration gives the best result for a relatively small number of neurons, it is selected for further research as the most promising one.

Study of the NN training effectiveness for various activation functions and train sample sizes. The efficiency of the 34-2-410-34 NN model is studied for various neuron activation functions in the hidden layer. The output layer has a linear activation function. The training was carried out using

the stochastic gradient descent algorithm (batch size 64) with Adam optimization (learning speed $\alpha = 0.001$, inertia $\beta_1 = 0.9$, RMSprop $\beta_2 = 0.999$, decay $= 10^{-5}$) for 1,000 epochs. Experiments were performed for various activation functions in the hidden layer (linear, sigmoid, hyperbolic tangent, Softplus, ReLU, Leaky-ReLU $\alpha = 0.1$; Table 2) and for different train sample sizes (140, 1,400, 14,000 and 49,000 examples). The results of NN modelling are given in Table 2-4, the NN training process is illustrated in Fig. 11-14.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

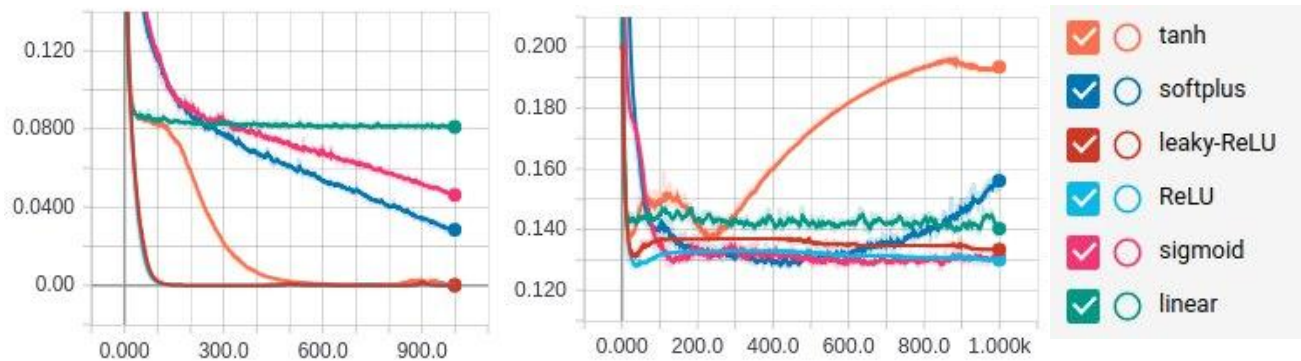


Fig. 11. The MSE error-epoch dependency graph for train and test samples of 140 examples:

The study showed that NN training for Softplus and Sigmoid activation functions did not stop, and it is possible to achieve greater accuracy during

further training. In addition, one can see the attributes of the NN re-training for Tanh and Softplus activation functions.

Table 2

Study of NN for various activation functions on train sample of 140 examples

Activation function		Linear	Sigmoid	Tanh	Softplus	ReLU	L-ReLU
Train sample	ρ^{opt}	0.28	0.58	1	0.78	1	1
	ρ^{cor}	0.32	0.61	1	0.78	1	1
	H	0.3	0.6	1	0.78	1	1
Test sample	ρ^{opt}	0.07	0.17	0.03	0.1	0.16	0.16
	ρ^{cor}	0.11	0.29	0.05	0.18	0.25	0.28
	H	0.09	0.21	0.04	0.13	0.19	0.2

The table shows that on the small volumes of data the activation functions Sigmoid, ReLU and Leaky-ReLU showed themselves the most successfully on the test sample. The best result of accuracy

in training data was shown by the activation functions Tanh, ReLU, Leaky-ReLU, so they can be considered promising for larger sample sizes.

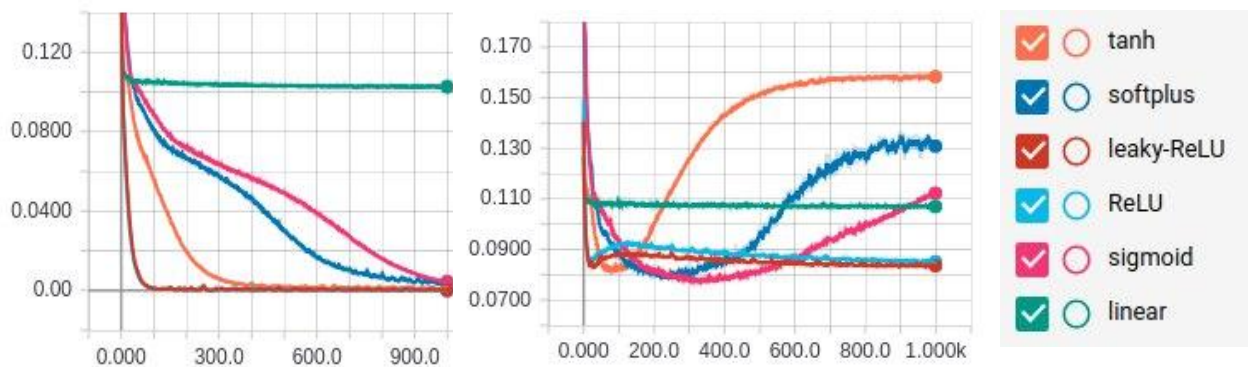


Fig. 12. The MSE error-epoch dependency graph for train and test samples of 1,400 examples.

Table 3

Study of NN for various activation functions on train sample of 1,400 examples

Activation function		Linear	Sigmoid	Tanh	Softplus	ReLU	L-ReLU
Train sample	ρ^{opt}	0.2	0.98	1	0.99	1	1
	ρ^{cor}	0.24	0.99	1	0.99	1	1
	H	0.22	0.98	1	0.99	1	1
Test sample	ρ^{opt}	0.19	0.53	0.06	0.3	0.46	0.46
	ρ^{cor}	0.24	0.7	0.06	0.35	0.61	0.61
	H	0.21	0.6	0.6	0.32	0.53	0.52

The table shows that on the average data volumes, Sigmoid, Tanh, ReLU and Leaky-ReLU activation functions were most successful on the

test sample. Except for the linear activation function, all functions have given maximum accuracy on the training data.

Table 4

Study of NN for various activation functions on train sample of 14,000 examples

Activation function		Linear	Sigmoid	Tanh	Softplus	ReLU	L-ReLU
Train sample	ρ^{opt}	0.2	1	0.99	0.99	1	1
	ρ^{cor}	0.24	1	0.99	0.99	1	1
	H	0.22	1	0.99	0.99	1	1
Test sample	ρ^{opt}	0.19	0.66	0.57	0.61	0.76	0.74
	ρ^{cor}	0.24	0.78	0.63	0.67	0.86	0.83
	H	0.21	0.71	0.6	0.64	0.81	0.79

The table shows that on the data volumes bigger than the average, Sigmoid, ReLU and Leaky-ReLU activation functions were most successful on

the test sample. Except for the linear activation function, all functions have given maximum accuracy on the training data.

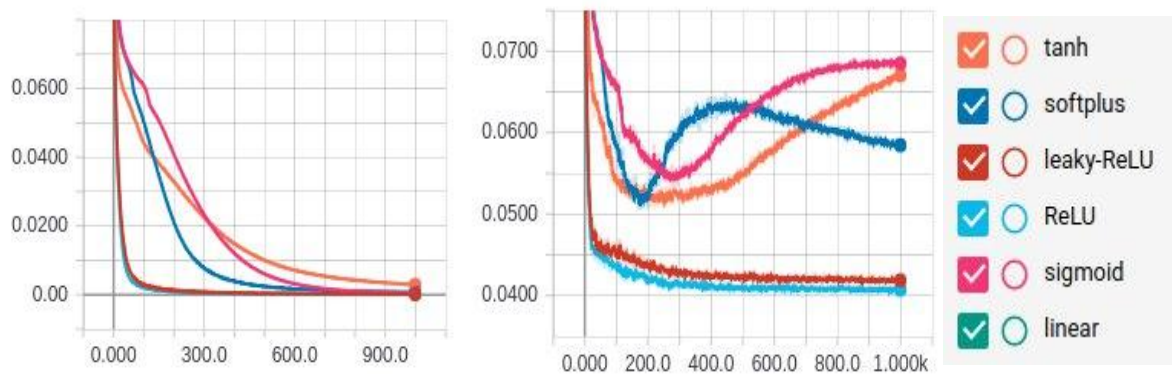
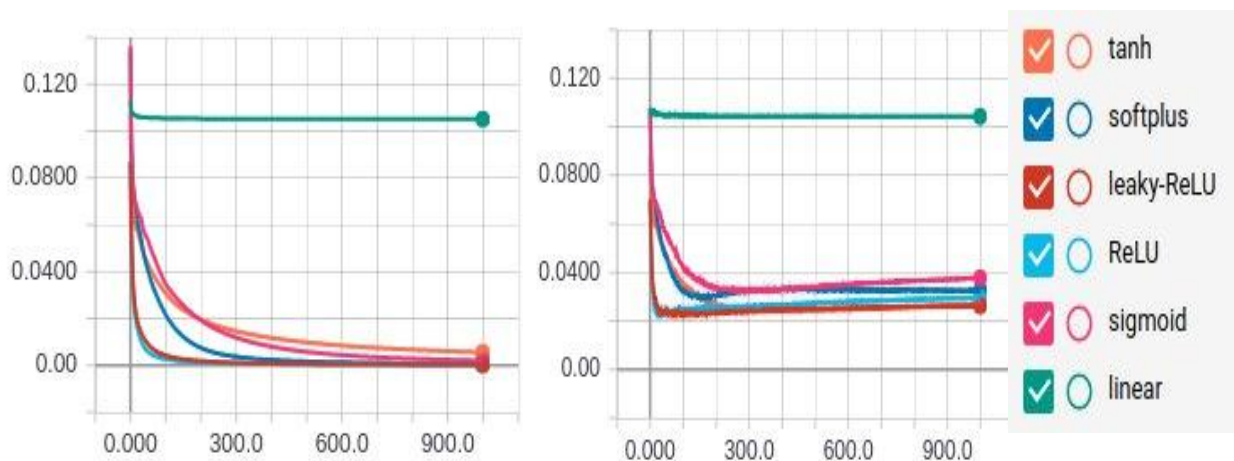


Fig. 13. The MSE error-epoch dependency graph
for train and test samples of 1 14,000 examples

Table 5

Study of NN for various activation functions
on train sample of 49,000 examples

Activation function		Linear	Sigmoid	Tanh	Softplus	ReLU	L-ReLU
Train sample	ρ^{opt}	0.2	1	0.96	1	1	1
	ρ^{cor}	0.24	1	0.96	1	1	1
	H	0.22	1	0.96	1	1	1
Test sample	ρ^{opt}	0.19	0.81	0.8	0.76	0.83	0.85
	ρ^{cor}	0.24	0.86	0.84	0.8	0.9	0.9
	H	0.21	0.83	0.82	0.78	0.86	0.88

Fig. 14. The MSE error-epoch dependency graph for train
and test samples of 49,000 examples

The resulting NN of 34-2-410-34 configuration with the activation function Leaky-ReLU ($\alpha = 0.1$) in the hidden layer and the linear activation function in the output layer after training with 49,000 examples for 1,000 epochs reached MSE value of 0.0024 on the control sample and in 86% determines the optimal path.

Originality and practical value

The NN of 34-2-410-34 configuration with activation function Leaky-ReLU ($\alpha = 0.1$) in the hidden layer and with linear function in the output

layer was studied. Experiments were conducted for various training optimization algorithms during 100 epochs for the sample size of 49,000 examples. The results of experiments are shown in the table 6, the training process is illustrated in Fig. 15.

According to the results of experiments, it is evident that the NN in the classical gradient descent learns very slowly; the NN in the stochastic gradient descent shows a significant improvement. Adam, AdaMax and Nadam training algorithms showed almost identical results.

Table 6

Study of NN of 34-2-410-34 configuration by different algorithms

Algorithm		BGD	MB SGD	Adam	Adamax	Nadam
Train sample	ρ^{opt}	0	0.09	0.99	0.96	0.99
	ρ^{cor}	0	0.1	1	0.97	0.99
	H	0	0.1	0.99	0.96	0.99
Test sample	ρ^{opt}	0	0.11	0.87	0.85	0.87
	ρ^{cor}	0	0.12	0.92	0.9	0.92
	H	0	0.11	0.89	0.87	0.9

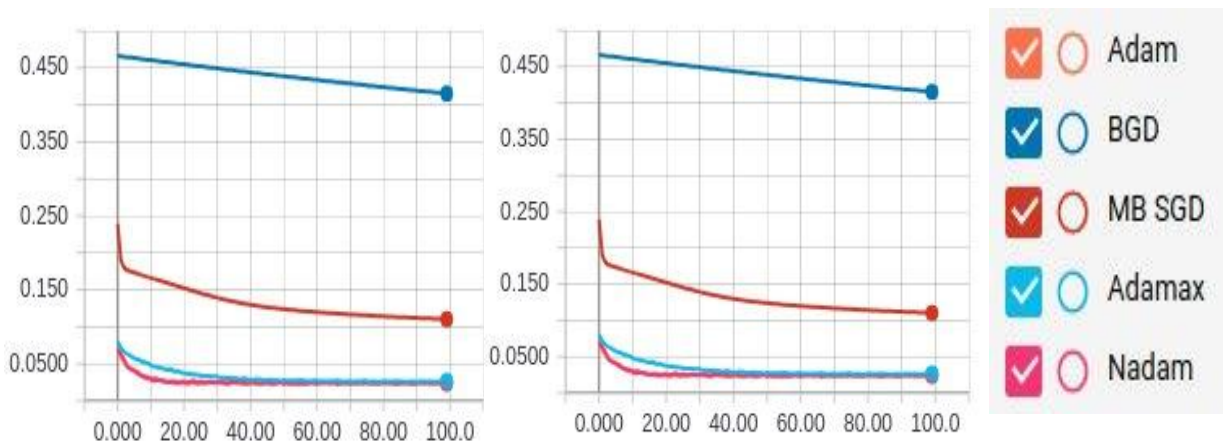


Fig. 15. The MSE error-epoch dependency graph for train and test samples for different training algorithms

Conclusions

1. The routing problem in the unified computer network is solved based on the developed software model «MLP 34-2-410-34» using the Python language and the TensorFlow framework, which allows generating the samples: train (140, 1 400, 14,000, 49,000 examples); test (700 examples); control (700 examples), as well as modelling the work of the neural network and studying its parameters.

2. Efficiency was studied based on the harmonic mean of the NN of 34-2-X-34 configuration with sigmoid activation function in the hidden layer and linear function in the output layer for different number of hidden neurons: 62; 410; 760; 1 110; 1 456. During NN training we used the

modern Adam algorithm for optimizing stochastic gradient descent with recommended hyperparameters: learning speed $\alpha = 0.001$; inertia $\beta_1 = 0.9$; RMSprop $\beta_2 = 0.999$; decay $= 10^{-5}$. The study showed that the accuracy of the neural network can be reached with 410 hidden neurons, and the further increase does almost nothing to improve the results.

3. Efficiency was studied based on the harmonic mean of the NN of 34-2-410-34 configuration under different activation functions: linear; sigmoid hyperbolic tangen-som; Softplus, ReLU; Leaky-ReLU using the Adam algorithm on train samples of different size (140, 1 400, 14,000, 49 000 examples). The study has shown that the activation functions ReLU and Leaky-ReLU train the most rapidly at all levels of the train sample and

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

less than other activation functions are subject to re-training. The NN of 34-2-410-34 configuration for activation functions Tanh and Softplus can achieve 100% accuracy on the train sample, but these functions are less slowly learned than ReLU and Leaky-ReLU and are strongly subject to re-training with insignificant sizes of the train sample (140, 1,400 and 14,000 examples). When using the sigmoid activation function, the neural network is also retrained, but with a large size of train examples (49,000 examples) it is able to achieve accuracy

(83%) close to Leaky-ReLU (88%) or ReLU (86%).

4. Efficiency of the NN of 34-2-410-34 configuration was studied with activation function Leaky-ReLU ($\alpha = 0.1$) in the hidden layer and with linear function in the output layer. Experiments were conducted by different optimization algorithms (BGD, MB SGD, Adam, Adamax, Nadam) during 100 epochs with the train sample of 49,000 examples. Adam, Adamax, and Nadam algorithms showed almost identical results, with 89, 87, and 90% accuracy, respectively.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Колесніков, К. В. Аналіз результатів дослідження реалізації задачі маршрутизації на основі нейронних мереж та генетичних алгоритмів / К. В. Колесніков, А. Р. Карапетян, В. Ю. Баган // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. Серія: Технічні науки. – 2016. – № 1. – С. 28–34.
2. Кутыркин, А. В. Использование нейронной сети Хопфилда для решения оптимизационных задач маршрутизации : метод. указания / А. В. Кутыркин, А. В. Семин. – Москва : Изд-во Моск. гос. ун-та путей сообщения, 2007. – 15 с.
3. Павленко, М. А. Анализ возможностей искусственных нейронных сетей для решения задач однопутевой маршрутизации в ТКС [Electronic resource] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – Available at: <http://pt.journal.kh.ua/index/0-139> – Title from the screen. – Accessed : 20.11.2018.
4. Палмер, М. Проектирование и внедрение компьютерных сетей / М. Палмер, Р. Б. Синклер. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2004. – 752 с.
5. Пахомова, В. М. Аналіз методів з природними механізмами визначення оптимального маршруту в комп'ютерній мережі Придніпровської залізниці / В. М. Пахомова, Р. О. Лепеха // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2014. – № 4. – С. 82–91.
6. Пахомова, В. М. Рішення задачі маршрутизації в комп'ютерній мережі Придніпровської залізниці на основі нейронної моделі Хопфілда / В. М. Пахомова, Ю. О. Федоренко // Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2012. – № 4. – С. 76–84.
7. Реалізація задачі вибору оптимального маршруту нейронною мережею Хопфілда / А. М. Бриндас, П. І. Рожак, Н. О. Семиншин, Р. Р. Курка // Наук. вісн. НЛТУ України : зб. наук.-техн. пр. – Львів, 2016. – Вип. 26.1. – С. 357–363.
8. Хайкин, С. Нейронные сети. Полный курс : [пер. с англ.] / С. Хайкин. – 2-е изд., испр. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с.
9. An open source machine learning framework for everyone [Electronic resource] : [веб-сайт] / TensorFlow. – Електрон. текст. дані. – Available at: <https://www.tensorflow.org> – Title from the screen. – Accessed : 05.06.2018.
10. A Survey of Artificial Immune System Based Intrusion Detection / Hua Yang, Tao Li, Xinlei Hu, Feng Wang, Yang Zou // The Scientific World Journal. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–11. doi: 10.1155/2014/156790
11. CiscoTips [Electronic resource] : [веб-сайт]. – Електрон. текст. дані. – Available at: <http://ciscotips.ru/ospf> – Title from the screen. – Accessed : 20.05.2018.
12. Hopfield, J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities / John J. Hopfield // Proceedings of National Academy of Sciences. – 1982. – Vol. 79. – Iss. 8. – P. 2554–2558. doi: 10.1073/pnas.79.8.2554
13. IBM [Електронний ресурс] : [веб-сайт] / IBM Knowledge Center. – Електрон. текст. дані. – Available at: <https://u.to/G-giFA> – Title from the screen. – Accessed : 20.05.2018.
14. Keras [Electronic resource] : [веб-сайт]. – Електрон. текст. дані. – Available at: <https://keras.io> – Title from the screen. – Accessed : 05.06.2018.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

15. Neural Network Based Near-Optimal Routing Algorithm / Chang Wook Ahn, R. S. Ramakrishna, In Chan Choi, Chung Gu Kang // Neural Information Processing, 2002. ICONIP'02 : Proc. of the 9th Intern. Conf. (18–22 Nov. 2002). – Singapore, 2002. – Vol. 5. – P. 1771–1776. doi: 10.1109/iconip.2002.1198978
16. New algorithm for packet routing in mobile ad-hoc networks / N. S. Kojić, M. B. Zajeganović-Ivančić, I. S. Reljin, B. D. Reljin // Journal of Automatic Control. – 2010. – Vol. 20. – Iss. 1. – P. 9–16. doi: 10.2298/jac1001009k
17. Pakhomova, V. M. Network Traffic Forecasting in information-telecommunication System of Prydniprovsk Railways Based on Neuro-fuzzy Network // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 6 (66). – С. 105–114. doi: 10.15802/stp2016/90485
18. Schuler, W. H. A novel hybrid training method for hopfield neural networks applied to routing in communications networks / W. H. Schuler, C. J. A. Bastos-Filho, A. L. I. Oliveira // International Journal of Hybrid Intelligent Systems. – 2009. – Vol. 6. – Iss. 1. – P. 27–39. doi: 10.3233/his-2009-0074
19. Security Lab.ru [Електронний ресурс] : [веб-сайт]. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://www.securitylab.ru> – Назва з екрана. – Перевірено : 20.05.2018.
20. Zhukovyts'kyi, I. Research of Token Ring network options in automation system of marshalling yard / I. Zhukovyts'kyi, V. Pakhomova // Transport Problems. – 2018. – Vol. 13. – Iss. 2. – P. 145–154.

В. М. ПАХОМОВА^{1*}, І. Д. ЦИКАЛО^{2*}

^{1*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

^{2*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта ihor.tsykalo@gmail.com, ORCID 0000-0002-1629-5873

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ В КОМП'ЮТЕРНІЙ МЕРЕЖІ ЗАСОБАМИ БАГАТОШАРОВОЇ НЕЙРОННОЇ МОДЕЛІ

Мета. Класичні алгоритми пошуку найкоротшого шляху на графі, що лежать в основі наявних протоколів маршрутизації, які сьогодні використовують у комп'ютерних мережах, в умовах постійної зміни завантаженості мережі не можуть привести до оптимального рішення в реальному часі. У зв'язку з цим метою статті є розробити методику визначення оптимального маршруту в об'єднаній комп'ютерній мережі. **Методика.** Для визначення оптимального маршруту в об'єднаній комп'ютерній мережі, що працює за різними технологіями, розроблено на мові Python із використанням фреймворку TensorFlow програмну модель «MLP 34-2-410-34». Вона дозволяє виконувати наступні етапи: генерацію вибірки (випадкову або збалансовану); створення нейронної мережі, на вхід якої подають масив пропускних спроможностей каналів комп'ютерної мережі; навчання й тестування нейронної мережі на відповідних вибірках. **Результати.** Нейронна мережа конфігурації 34-2-410-34 з функціями активації ReLU та Leaky-ReLU у прихованому шарі та лінійною функцією активації у вихідному шарі навчається за алгоритмом Adam. Цей алгоритм є комбінацією алгоритмів Adagrad, RMSprop та стохастичного градієнтного спуску з інерцією. Зазначені функції навчаються найбільш швидко на всіх обсягах навчальної вибірки, менш за інші піддаються перенавчанню, й досягають значення помилки в 0,0024 на контрольній вибірці й у 86 % визначає оптимальний шлях. **Наукова новизна.** Проведено дослідження параметрів нейронної мережі на основі розрахунку середнього гармонійного за різних функцій активації (Linear, Sigmoid, Tanh, Softplus, ReLU, L-ReLU) на навчальних вибірках різного обсягу (140, 1 400, 14 000, 49 000 прикладів) та за різними алгоритмами оптимізації навчання нейронної мережі (BGD, MB SGD, Adam, Adamax, Nadam). **Практична значимість.** Використання нейронної моделі, на вхід якої подають значення пропускних спроможностей каналів, дозволить у реальному часі визначити оптимальний маршрут в об'єднаній комп'ютерній мережі.

Ключові слова: комп'ютерна мережа; оптимальний маршрут; нейронна мережа; вибірка; середнє гармонійне; функція активації; алгоритм оптимізації

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

В. Н. ПАХОМОВА^{1*}, И. Д. ЦЫКАЛО^{2*}^{1*}Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X^{2*}Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта ihor.tsykalo@gmail.com, ORCID 0000-0002-1629-5873**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА
В КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ СРЕДСТВАМИ МНОГОСЛОЙНОЙ
НЕЙРОННОЙ МОДЕЛИ**

Цель. Классические алгоритмы поиска кратчайшего пути на графе, что лежат в основе существующих протоколов маршрутизации, которые сегодня используют в компьютерных сетях, в условиях постоянного изменения загруженности сети не могут привести к оптимальному решению в реальном времени. В связи с этим целью статьи является разработать методику определения оптимального маршрута в объединенной компьютерной сети. **Методика.** Для определения оптимального маршрута в объединенной компьютерной сети, которая работает по разным технологиям, написана на языке Python с использованием фреймворка TensorFlow программная модель «MLP 34-2-410-34». Она позволяет выполнять следующие этапы: генерацию выборки (случайную или сбалансированную); создание нейронной сети, на вход которой подаются массив пропускных способностей каналов компьютерной сети; обучение и тестирование нейронной сети на соответствующих выборках. **Результаты.** Нейронная сеть конфигурации 34-2-410-34 с функциями активации ReLU и Leaky-ReLU в скрытом слое и линейной функцией активации в результирующем слое обучается по алгоритму Adam. Этот алгоритм является комбинацией алгоритмов Adagrad, RMSprop и стохастического градиентного спуска с инерцией. Указанные функции учатся наиболее быстро на всех объемах учебной выборки, меньше других поддаются переобучению, и достигают значения ошибки в 0,0024 на контрольной выборке и в 86 % определяют оптимальный путь. **Научная новизна.** Проведено исследование параметров нейронной сети на основе расчета среднего гармоничного при разных функциях активации (Linear, Sigmoid, Tanh, Softplus, ReLU, L-ReLU) на учебных выборках разного объема (140, 1 400, 14 000, 49 000 примеров) и за различными алгоритмами оптимизации обучения нейронной сети (BGD, MB SGD, Adam, Adamax, Nadam). **Практическая значимость.** Использование нейронной модели, на вход которой подаются значения пропускных способностей каналов, позволит в реальном масштабе времени определить оптимальный маршрут в объединенной компьютерной сети.

Ключевые слова: компьютерная сеть; оптимальный маршрут; нейронная сеть; выборка; среднее гармоничное; функция активации; алгоритм оптимизации

REFERENCES

1. Kolesnikov, K. V., Karapetian, A. R., & Bahan, V. Y. (2016). Analiz rezultativ doslidzhennia realizatsii zadachi marshrutyzatsii na osnovi neironnykh merezh ta henetychnykh alhorytmiv. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 1, 28-34. (in Ukrainian)
2. Kutyrkin, A. V., & Semin, A. V. (2007). *Ispolzovanie neyronnoy seti Khopfilda dlya resheniya optimizatsionnykh zadach marshrutizatsii: Metodicheskie ukazaniya*. Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya. (in Russian)
3. Pavlenko M. A. (2011). Analysis opportunities of artificial neural networks for solving single-path routing in telecommunication network. *Problemy telekommunikatsii*, 2(4). Retrived from <http://pt.journal.kh.ua/index/0-139> (in Russian)
4. Palmer, M., & Sinkler, R. B. (2004). *Proektirovanie i vnedrenie kompyuternykh setey*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg. (in Russian)
5. Pakhomova, V. M., & Lepekha, R. O. (2014). Analiz metodiv z pryrodnymy mekhanizmy vyznachennia optymalnoho marshrutu v komp'uternii merezhi Prydniprovskoi zaliznytsi. *Information and control systems at railway transport*, 4, 82-91. (in Ukrainian)

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

6. Pakhomova, V. M., & Fedorenko, Y. O. (2012). Rishennia zadachi marshrutyzatsii v komp'uternii mrezi Prydniprovskoi zaliznytsi na osnovi neironnoi modeli Khopfilda. *Information and control systems at railway transport*, 4, 76-84. (in Ukrainian)
7. Bryndas, A. M., Rozhak, P. I., Semynshyn, N. O., & Kurka, R. R. (2016). Realizatsiia zadachi vyboru opty-malnoho marshrutu neironnoi mrezei Khopfilda. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 26(1), 357-363. (in Ukrainian)
8. Khaykin, S. (2006). *Neyronnye seti. Polnyy kurs*. Moscow: Vilyams. (in Russian)
9. An open source machine learning framework for everyone. *TensorFlow*. Retrieved from <https://www.tensorflow.org> (in English)
10. Yang, H., Li, T., Hu, X., Wang, F., & Zou, Y. (2014). A Survey of Artificial Immune System Based Intrusion Detection. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-11. doi: 10.1155/2014/156790 (in English)
11. CiscoTips. Retrieved from <http://ciscotips.ru/ospf> (in Russian)
12. Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(8), 2554-2558. doi: 10.1073/pnas.79.8.2554 (in English)
13. IBM. *IBM Knowledge Center*. Retrieved from <https://u.to/G-giFA> (in Russian)
14. Keras. Retrieved from <https://keras.io> (in English)
15. Chang Wook Ahn, Ramakrishna, R. S., In Chan Choi, & Chung Gu Kang. (n.d.). Neural network based near-optimal routing algorithm. *Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing, 2002. ICONIP'02*. doi: 10.1109/iconip.2002.1198978 (in English)
16. Kojic, N., Zajeganovic-Ivancic, M., Reljin, I., & Reljin, B. (2010). New algorithm for packet routing in mobile ad-hoc networks. *Journal of Automatic Control*, 20(1), 9-16. doi: 10.2298/jac1001009k (in English)
17. Pakhomova, V. M. (2016). Network Traffic Forecasting in Information-telecommunication System of Prydniprovsk Railways Based on Neuro-fuzzy Network. *Science and Transport Progress*, 6(66), 105-114. doi: 10.15802/stp2016/90485 (in English)
18. Schuler, W. H., Bastos-Filho, C. J. A., & Oliveira, A. L. I. (2009). A novel hybrid training method for hopfield neural networks applied to routing in communications networks1. *International Journal of Hybrid Intelligent Systems*, 6(1), 27-39. doi: 10.3233/his-2009-0074 (in English)
19. Security Lab.ru. Retrieved from <https://www.securitylab.ru> (in Russian)
20. Zhukovyts'kyi, I., & Pakhomova, V. (2018). Research of Token Ring network options in automation system of marshalling yard. *Transport Problems*, 13(2), 145-154. (in English)

Received: July 27, 2018

Accepted: Nov. 06, 2018

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

UDC 656.223.2

D. V. LOMOTKO^{1*}, D. V. ARSENENKO², N. A. NOSKO³, O. V. KOVALOVA⁴^{1*}Dep. «Transport System and Logistic», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 19 55, e-mail den@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-7624-2925²Dep. «Transport System and Logistic», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 19 55, e-mail TSL@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-7757-8706³Dep. «Transport System and Logistic», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 19 55, e-mail TSL@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-4741-5890⁴Dep. «Operation Transportation Processes», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 85, e-mail kovalova.uvkr@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-5342-0795

FORMALIZATION OF ROLLING STOCK DISTRIBUTION PROCESSES BY USING DYNAMIC MODEL

Purpose. The scientific article formalized process improving the efficiency of rolling stock distribution in railways for loading goods by introducing concentration of loading at the terminal by using a dynamic model. **Methodology.** According to the experience, the distribution of rolling stock by the infrastructure operator is a complex process. The questions on transport expeditionary service, working technologies of separate subjects of railway industry and the question of forming organization principles of running carriages with different patterns of ownership are considered. The system of rolling stock distribution based on logistical control principles on railways should meet the next methodological criteria: reduction of empty run and waiting time under one freight operation, forming the correct informative area for all participants of the transportation, arranging conditions for rapid and maximally profitable decision-making as for the further movement of the rolling stock. **Findings.** Created a list of the necessary conditions under which there must be a dynamic development of the transport sector and meet the current market requirements. The algorithm and process logistic control allocation of railway rolling stock are considered. Proved that relationship between the participants of the transportation process of initial conditions for reform be composed based on non-discriminatory access to cargoes resources. **Originality.** The work of dispatcher staff in transportation process management as an employee of the transportation department in terms of demand for rolling stock at all stages of transportation management analyzed. For the first time proposed a dynamic model, that reproduces the information field for all participants in traffic. It established that the railways have to create a system of distribution of rolling stock, which must meet the following criteria: reduction in empty mileage and waiting time under one cargo operation; create conditions for rapid and most profitable decision for further movement of rolling stock. **Practical value.** Application of the developed method of rolling stock distribution for the formation of unit trains will significantly reduce the logistics costs in the supply chain and increase its competitiveness in foreign markets. The development of such a system is intended to create a truly independent regulator of the logistic – transportation process in the conditions of creation of the unified information space.

Keywords: logistics technology; rolling stock; railway transport; management of railway; dynamic model of resource distribution

Introduction

Increasing the efficiency of cargo transporting by rail and water transportation is one of the key tasks that be addressed to reduce logistics costs.

Rational use of infrastructure resources [12] in general and the rolling stock resources in particular is the absent chain in the branch reforming now. So nowadays according to the LLC Ukrzaliznytsia data the total waiting time of technological operations is nearly 30% more than the execution

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

time of these operations, while this index is 60% less than in the European countries. This statistics visually displays the level of operating consumptions, which connected with the infrastructure maintenance in waiting time.

Taking into account a swift tendency to integrate railway industry into market conditions, which related to considerable reduction of the majority of the qualitative work indexes and deficit of budgetary investments, the guidance of the industry had to solve questions for overcoming this problem as soon as possible. The most important task is to create favorable conditions for involving investors and to set up preconditions for logistic infrastructure development.

Purpose

The scientific article formalized process improving the efficiency of rolling stock distribution in railways for loading goods by introducing concentration of loading at the terminal by using a dynamic model.

Methodology

The main regulations of a new law «On the railway transport of Ukraine» [1] worked out exactly for the solution of the question. So, it is planned to substitute the term «railway» into the new one «infrastructure operator», to form a new organ the National Commission on Transport Adjusting (NCTA) for correcting the rate compound and involving private ferrymen for transportation. Now days there are a lot of non-solving problems which concern investment constituent, calculation of the railway rate (NCTA) without customer and others like that, but the obvious thing is to solve problem concerning the creation of equivalent terms for ferrymen in the real conditions of the operative transportation planning.

Findings

The distribution of rolling stock by the infrastructure operator is a complex process. A list of scientific sources that contain solutions to the problem of rolling stock management analyzed. Having regarded to the setting task in the context of reformatting in modern terms, the questions on

transport expeditionary service [4], working technologies of separate subjects of railway industry and the question of forming organization principles of running carriages with different patterns of ownership [1], [10] are considered. The economic constituent at forming the transport-logistic system of carriages control taking into account the internal generalize economic efficiency and corresponding quality of services are important [6]. This approach takes into account the economic component and can used by developed EU railways. The geographical position of Ukrainian railways as a whole obligates to examine any innovations in management with a review on further integration of the accrued system into international transport network [5], [7] using the up-to-date information and intellectual technologies.

Taking into account the orientation of today's reformation and raising of our task as one of the basic principles is introduction the EU railway experience to the existent realities [13]. For this reason, reform the rolling stock distribution process along with European railways.

Thus, make the system of rolling stock distribution based on logical control principles on railways. The system should meet the next criteria:

- reduction of empty run and waiting time under one freight operation;
- forming the correct informative area for all participants of the transportation;
- arranging conditions for rapid and maximally profitable decision-making as for the further movement of the movable unit.

Developing of such system is to make really self-contained regulator of transporting process without changes in staff constituent and significant [8].

Relations between the participants of the transportation process under reformation conditions must base on the principles of non-discriminatory access to the infrastructure resources [9].

According to the prospective state of the relationship between participants of the transportation [11] on the domestic railways, each of them is able to influence on the transportation quality in whole. The participants of the transportation process as for the degree of

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

responsibility and influence on the transportation insurance in right quality distributed in relationship shown in Figure 1. This approach can use as a basis to ground the distribution of financial results in terms of improving quality, due to rolling stock supply.

Shown in Figure 1 system on the today's stage of the industry reformation divides the functions of infrastructure management and rolling stock management, the eventual result must be the acceptance of existent EU directives within the framework of the real conditions of LLC «Ukrzaliznytsia» (UZ). New methods in client relations, fundamentally new strategic approach in transportation planning [7], cooperation of the comprehensive efforts of the industry with economic strategy of the country development on the whole, and others like that belong to the basic requirements and standards of the railway system which must be formed as a result of the reformation process.

As the infrastructure owner (UZ) is responsible for the compliance of the main indicators quantity of the transportation quality, it is the owner has the priority right to financial result. However, it means that the most cost of transportation activity be take into account in the results of the participant work. Thus, when applying specific transport technology and providing rolling stock for each participant of the transportation process, the share of financial results (revenue rate) for freight transportation be calculate individually depending on the performed transportation work and activities.

The practical objective of this system is to create conditions for putting the carriage under loading which is under unloading at the particular ground.

Look at the work of dispatcher staff in transportation process management as an employee of the transportation department in terms of demand for rolling stock at all stages of transportation management.

Taking into account, the existing operational management model the hierarchical scheme of rolling stock management levels on the railway

and the allocation of responsibilities for commitments show in Figure 2. In this context, the ground of active work that subordinates to the employee who associated with transportation within his competence is considered as hierarchical level of transportation.

The process of the system running begins with the instructions on the freight operation completion provided by the consignee, after unloading car or group of cars. For the time that remains to prepare the car commercially (removal mounting elements, removal of freight residues, etc.), to supply shunting locomotive, the employee of the transportation department must make the right decision on further «destiny» of the car. A similar problem concerns the distribution of empty rolling stock on the sorting and polling stations but in reverse hierarchical direction.

The authors suggested presenting and formalizing information as to distribution of the rolling stock on the operating domain using the method of dynamics of averages. The choice of the method is due to the possibility of its application to practical purpose in the form of the system of automated workplace. Taking into account the set tasks, the rational method of solving the problem will be the application of the classical Runge-Kutt method. Among many methods for solving tasks with method of dynamics of averages the most common in practical application will be Runge-Kutt method of the fourth order, which has necessary parameters. It is this method that allows to obtain necessary results required by the accuracy of the calculations and it differs from others by relative simplicity.

Model activities of the dispatcher staff as a queuing model system, which aims to create a right market competitive condition of using rolling stock. Thus, an approach to modeling operational activities of the dispatcher staff according to the distribution of cars based on the principles of the queuing theory. The main objective of the model is to get an important information to assess transition probability of the cars state from empty to load considering initial system parameters.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

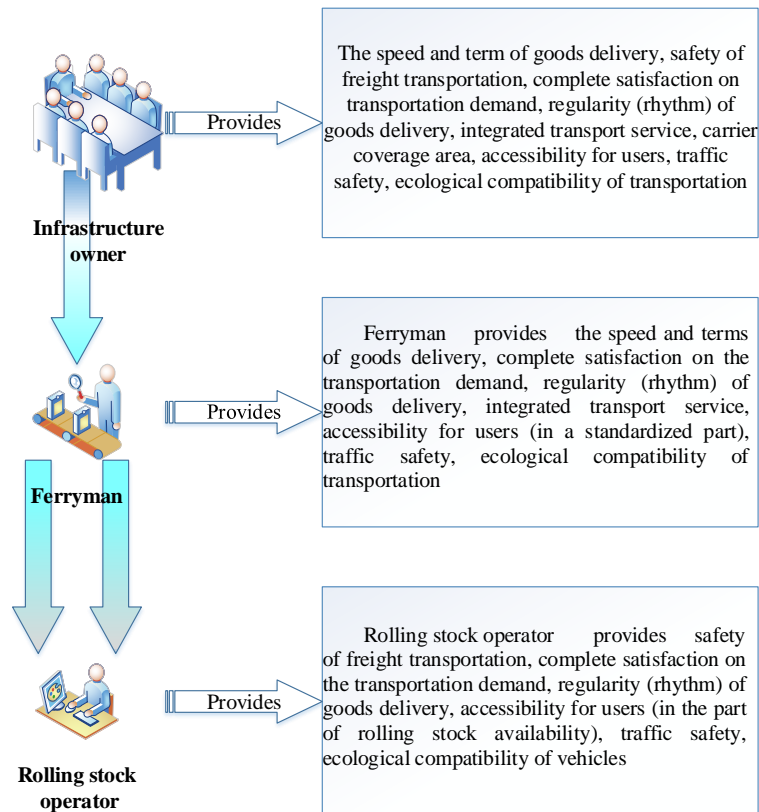


Fig. 1. Rolling stock management operator in the existent railway system on the way of reformation.

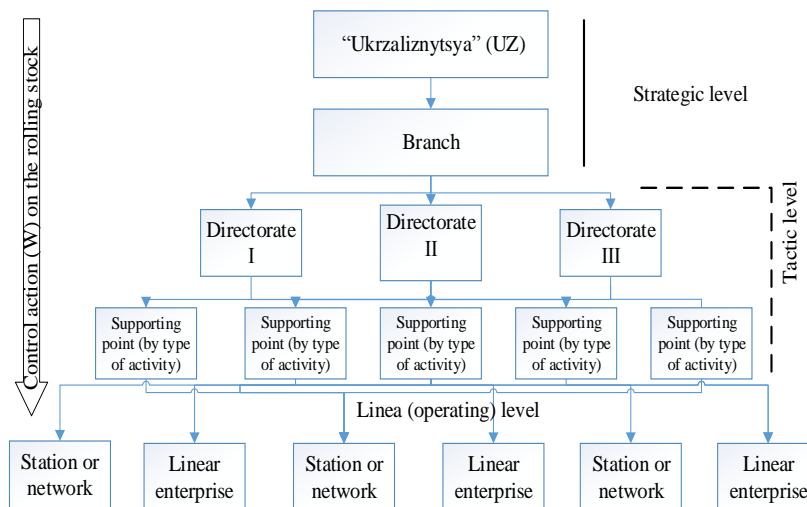


Fig. 2. Hierarchical scheme of rolling stock management levels on the railway.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

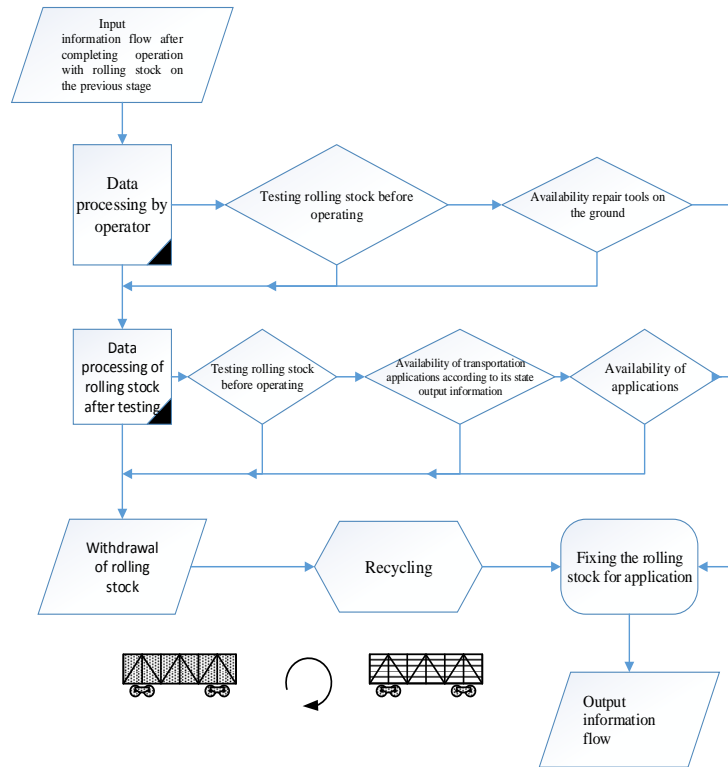


Fig. 3. Structural – logical model of the infrastructure operator work of rolling stock distribution

$$\begin{cases}
 \frac{dU_1^L(t)}{dt} = -U_1^L(t)W_1 + \sum_{i=1}^n U_1^E(t)W_{i,1}, \\
 \frac{dU_2^L(t)}{dt} = -U_2^L(t)W_2 + \sum_{i=1}^n U_2^E(t)W_{i,2}, \\
 \dots, \\
 \frac{dU_n^L(t)}{dt} = -U_n^L(t)W_n + \sum_{i=1}^n U_i^E(t)W_{i,n}, \\
 \frac{dU_1^E(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n U_i^L(t)W_i - U_1^E(t) \sum_{j=1}^n W_{1,j}, \\
 \frac{dU_2^E(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n U_i^L(t)W_i - U_2^E(t) \sum_{j=1}^n W_{2,j}, \\
 \dots \\
 \frac{dU_n^E(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n U_i^L(t)W_i - U_n^E(t) \sum_{j=1}^n W_{n,j}.
 \end{cases} \quad (1)$$

In the model (1):

$U_i^L(t)$ – part of loaded cars involved in the i -th loading area, which is equal n ; $U_i^E(t)$ – part of

empty cars that can be used in the i -th loading area is accepted that $\sum_{i=1}^n U_i^E(t) = 1$; $W_{i,j}$ – probability

that the empty car of the i -th loading area will be used for loading in the loading area j in the time interval $(t; t + \Delta t)$; W_i – probability of discharging the loaded car in the loading area i , is accepted that $\sum_{i=1}^n W_i = 1$.

For calculating the model work the conditional data are taken, W_i parameters are hypothetical, calculations in real time scale are connected with heavy implementation expenses and can be used without big error.

The system (1) is linear, in matrix form can be written $U(t) = WU(t)$ and was shown in normal Cauchy form. The problem of the stability simulation in providing loading resource of railway ground is come to a range forecasting of eigenvalues in W matrix. An important task of the system is that the railway ground saved not only resistance of some of its state as a whole and will

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

have stable operation at the variation of parameters, which consists of the following:

- type of freight and its transportation requirements;
- car specifications, such as type, carrying capacity, design features, etc.;
- technological requirements for loading;
- economic component as the primary goal of customer and owner of rolling stock.

For calculating the model work the conditional data are taken, W parameters are hypothetical, calculations in real time scale are connected with

$$W = \begin{pmatrix} -W_1 & 0 & \dots & 0 & W_{1,1} \\ 0 & -W_2 & \dots & 0 & W_{1,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -W_n & W_{1,n} \\ W_1 & W_2 & \dots & W_n & -W_{1,1} - \dots - W_{1,n} \\ W_1 & W_2 & \dots & W_n & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_1 & W_2 & \dots & W_n & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

When solving this problem, modeling of stable and control system of the particular ground acquires eigenvalues λ_i from possible probabilities of the W_i and $W_{i,j}$ matrix (3). Characteristic feature of this dependence is function λ_i from W_i and $W_{i,j}$ that can be evaluated through its own vectors R_i and S_i of the W matrix.

Vector of loading resources $N(t)$ can be shown as

$$u_k(t) = \sum_{i=1}^n c_i e^{\lambda_i t} r_{k,i}, k \in [1; m], \quad (4)$$

where $r_{k,i}$ – components with number k of eigenvector R_i , m – matrix dimension (2),

heavy implementation expenses and can be used without big error.

$$U_i^L(t) = f[(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_z), (t)], \quad (2)$$

where $\tilde{\beta}_{1,z}$ – vector constraint requirements for a car.

One of the most important examples of the restriction on space 1520 mm is the index of throughput and estimated capacity.

The states matrix is:

$$\begin{pmatrix} W_{2,1} & \dots & W_{n,1} \\ W_{2,2} & \dots & W_{n,2} \\ \dots & \dots & \dots \\ W_{2,n} & \dots & W_{n,n} \\ 0 & \dots & 0 \\ -W_{2,1} - \dots - W_{2,n} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -W_{n,1} - \dots - W_{n,n} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$c_i = S_i^T U_0$ – is determined by the initial values vector of loading resource (loaded, empty) U_0 and eigenvectors S_i of the transpose matrix state (3).

Examine the conventional railway ground E , which consists of three directions and has a working gondola park numbered 1000 units. Assume that all gondola cars are interchangeable. If using cars on each direction is equal for rolling stock operator ($U_1^H(t) = U_2^H(t) = U_3^H(t) = 1/3$), then the system come to a relatively steady state in 10 hours from the beginning the cars distribution actions with a coincidence of all three schedules in one (Figure 4).

Table 1

Tabulating general given data for subsequent calculations in evident comparison.

Directorate on the conventional ground	Distribution of rolling stock in the first variant	Distribution of rolling stock in the second variant
U_1^H	1/3	1/2
U_2^H	1/3	3/10
U_3^H	1/3	1/5

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

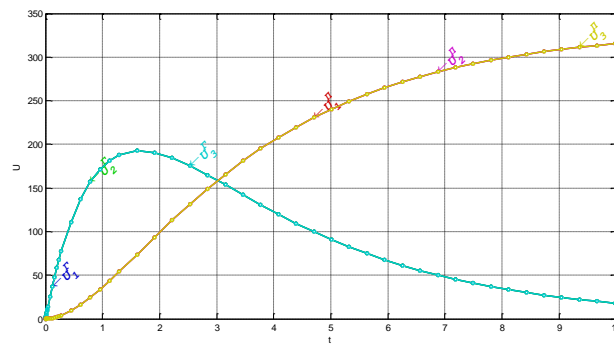


Fig. 4. The simulation results for conventional ground II and three equal- weighted directions ($U_1^H(t) = U_2^H(t) = U_3^H(t) = 1/3$)

If using cars on each direction is not equal for rolling stock operator, the first conventional direction has the highest priority, the third one has – the least priority (i.e. is approved $U_1^H(t) = 0.5, U_2^H(t) = 0.3, U_3^H(t) = 0.2$), even

through the day from the starting the cars distribution actions (Figure 5) the system will not come to a steady state (the state of the gondola distribution comes to a relatively steady state only in 30 hours.).

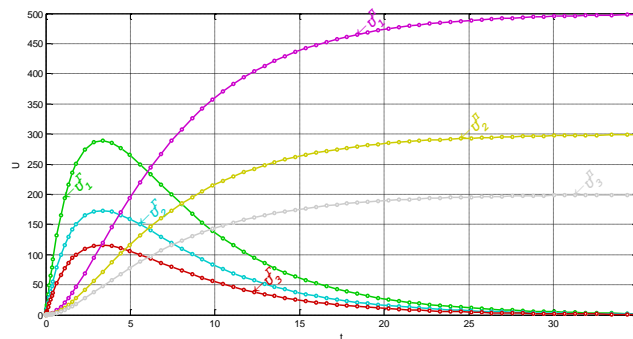


Fig. 5. The simulation results for the conventional ground II and three directions with different weight characteristics ($U_1^H(t) = 0.5, U_2^H(t) = 0.3, U_3^H(t) = 0.2$)

It points out to the necessity to consider the uniformity while reallocating rolling stock along the ground in terms of non-discriminatory access to their infrastructure.

Originality and Practical value

Thus, the model allows conclude about the ability to manage some parameters over time that is it will characterize the process stability to ensure railway ground by the loading resource. Further development of the model may be carried out by taking into account the interchangeability of rolling stock and its state.

The task set solve owing to the modern methods of statistics and mathematical simulation.

The analysis of methods and facilities, which use by the author of the thesis work for solving the set task, afford ground for the conclusion as for the authenticity of results, received in the researches. It can be confirmed by the representativeness of the statistical material selection, considerable amount of grounds researches and carrying out the verification model test for adequacy and accuracy according to the known criteria.

This result used as a basis to ground the distribution of financial effect in terms of improving quality. Model of decision support system for optimal distribution of rolling stock in the transportation process shown in Figure 6.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

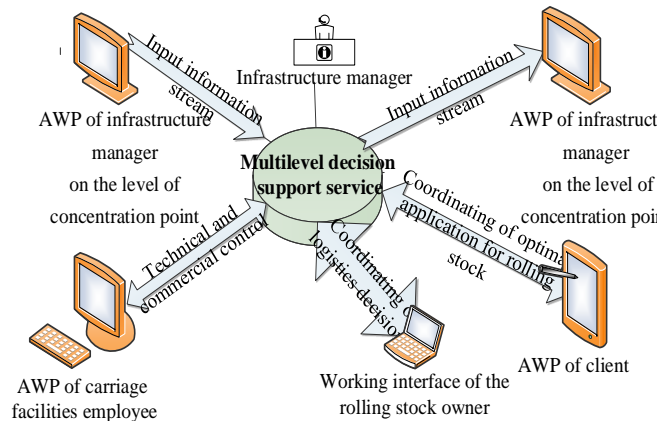


Fig. 6. Model of decision support system for optimal distribution of rolling stock.

Conclusions

The offered logistic model, in terms that formed towards restructuring the rail transport, allows developing optimal technology work of the concentration point with rational use of rolling stock and the work of locomotive with all transport network requirements. Using the offered models allows infrastructure operator to reduce operating costs while managing (W) rolling stock, to reduce local car circulation and as a result, the period of delivery. The offered approach is its use in the intellectual control system of optimal distribution of rolling stock. The model allows us to predict rolling stock location by the type and stat in each

period of time that will significantly increase the rate of useful work on the railway ground.

Conclusions, methods and practical recommendations are collect personally by the author at the direct analysis of the work of the Railway Transport Directorate. The authors developed the main functions of the automated workplace, improved the model for the distribution of rolling stock using the method of dynamics of averages, taking into account the condition of the car, identified the basic conditions for forming new approach to the management of rolling stock among which the creation of a competitive market of grain cargoes transportation.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Данько, Н. И. Разработка организационно-технологической модели управления парком грузовых вагонов разной формы собственности / Н. И. Данько, Д. В. Ломотко, В. В. Кулешов // Инновационный транспорт. – 2012. – № 4. – С. 8–13.
2. Ломотко, Д. В. Формування нечіткої системи підтримки прийняття рішення щодо придатності у комерційному відношенні рухомого складу при його розподілі / Д. В. Ломотко, А. О. Ковальов, О. В. Ковальова // Схід-Європ. журнал передових технологій. – 2015. – Т. 6, № 3 (78). – С. 11–17. doi: 10.15587/1729-4061.2015.54496
3. Проект Закону про залізничний транспорт України від 17.11.2017 р. № 7316 [Electronic resource] / Верховна Рада України. – Available at: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?id=&pf3511=62929 – Title from the screen. – Accessed : 06.03.2018.
4. Удосконалення технології організації вагонопотоків шляхом формування автоматизованої системи розрахунку і забезпечення виконання плану формування поїздів / С. В. Панченко, Т. В. Бутко, В. М. Прохоров, Л. О. Пархоменко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2017. – № 3. – С. 136–142.
5. Bielecki, M. Total logistics management concept and principles in manufacturing enterprise / M. Bielecki, B. Galinska // Business Logistics in Modern Management : 17-th Intern. Sci. Conf. (Oct. 12–13, 2017, Osijek, Croatia). – Osijek, 2017. – P. 93–107.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

6. Hao, C. Optimization on Combination of Transport Routes and Modes on Dynamic Programming for a Container Multimodal Transport System / C. Hao, Y. Yue // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 137. – P. 382–390. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.272
7. How planners' use and non-use of expert knowledge affect the goal achievement potential of plans: Experiences from strategic land-use and transport planning processes in three Scandinavian cities / A. Tennøy, L. Hansson, E. Lissandrello, P. Næss // *Progress in Planning*. – 2016. – Vol. 109. – P. 1–32. doi: 10.1016/j.progress.2015.05.002
8. Jarašūnienė, A. Analysis of Application Management Theories and Methods for Developing Railway Transport / A. Jarašūnienė, G. Sinkevičius, A. Mikalauskaitė // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 187. – P. 173–184. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.363
9. Kozachenko, D. M. Creation of export-oriented network of grain elevators in Ukraine / D. M. Kozachenko, R. V. Vernigora, R. S. Rustamov // *Наука та прогрес транспорту*. – 2017. – № 2 (68). – С. 56–70. doi: 10.15802/stp2017/99952
10. Lomotko, D. V. Methodological Aspect of the Logistics Technologies Formation in Reforming Processes on the Railways / D. V. Lomotko, E. S. Alyoshinsky, G. G. Zambrybor // *Transportation Research Procedia*. – 2016. – Vol. 14. – P. 2762–2766. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.482
11. Nikitinas, V. The Models of Management of Railway Companies in the European Union: Holding, the German Experience / V. Nikitinas, S. Dailydka // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 134. – P. 80–88. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.042
12. Scheduling preventive railway maintenance activities with resource constraints / R. Macedo, R. Benmansour, A. Artiba [et al.] // *Electronic Notes in Discrete Mathematics*. – 2017. – Vol. 58. – P. 215–222. doi: 10.1016/j.endm.2017.03.028
13. Štefancová, V. Connection of Dynamic Quality Modeling and Total Service Management in Railway Transport Operation / V. Štefancová, E. Nedeliaková, C. López-Escolano // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 192. – P. 834–839. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.144
14. The Impact of Human Resource Management on the Competitiveness of Transport Companies / N. Batarlienė, K. Čižiūnienė, K. Vaičiūtė [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2017. – Iss. 187. – P. 110–116. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.356
15. Záhumenská, Z. Supporting the Connection the Logistics Centers to Rail Network / Z. Záhumenská, J. Gašparík // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 192. – P. 976–981. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.168

Д. В. ЛОМОТЬКО^{1*}, Д. В. АРСЕНЕНКО², Н. А. НОСКО³, О. В. КОВАЛЬОВА⁴

^{1*}Каф. «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта den@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-7624-2925

²Каф. «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта TSL@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-7757-8706

³Каф. «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта TSL@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-4741-5890

⁴Каф. «Управління вантажною та комерційною роботою», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 85, ел. пошта kovalova.uvkr@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-5342-0795

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОДІЛУ РУХОМОГО СКЛАДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ

Мета. Стаття спрямована на формалізацію процесу підвищення ефективності розподілу рухомого складу на залізницях під завантаження шляхом концентрації навантажувальних робіт на терміналах за допомогою динамічної моделі. **Методика.** Як показує досвід, для оператора інфраструктури розподіл рухомого складу є складним процесом. У роботі проаналізовано транспортно-експедиційне обслуговування, технологію роботи окремих суб'єктів залізничної галузі й формування організаційних принципів керування вагонами підприємств різних форм власності. Установлено, що система розподілу рухомого складу, заснована на принципах логістичного контролю на шляху прямування, повинна відповідати наступним методологічним

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

критеріям: скорочення часу пропуску й очікування вантажних операцій, формування достовірного інформаційного середовища для всіх учасників транспортування, створення умов для прийняття швидкого й максимально вигідного рішення щодо подальшого руху рухомого складу. **Результати.** Створено перелік необхідних умов для динамічного розвитку транспортного сектора відповідно до поточних вимог ринку. Розглянуто алгоритм логістичного управління процесом розподілу залізничного рухомого складу. Доведено, що відносини між учасниками транспортного процесу на початкових етапах реформ формуються на основі недискримінаційного доступу до ресурсів вантажів. **Наукова новизна.** Проаналізована робота диспетчерського персоналу з точки зору попиту на рухомий склад на всіх етапах управління транспортним процесом. Уперше запропонована динамічна модель, яка відтворює інформаційне поле для всіх учасників переміщення рухомого складу. За її допомогою встановлено, що залізниці повинні створювати систему розподілу рухомого складу, яка має відповідати наступним критеріям: зменшення пробігу й тривалості очікування вантажних операцій, створення умов прийняття швидкого й вигідного рішення щодо подальшого просування рухомого складу. **Практична значимість.** Застосування розробленого методу розподілу рухомого складу для формування одиничних поїздів дозволить значно зменшити логістичні витрати в ланцюгу постачання й підвищити його конкурентоспроможність на зовнішньому ринку. Розвиток такої системи покликаний створити справді незалежний регулятор транспортно-логістичного процесу в умовах формування єдиного інформаційного середовища.

Ключові слова: логістична технологія; рухомий склад; залізничний транспорт; управління залізницею; динамічна модель розподілу ресурсів

Д. В. ЛОМОТЬКО^{1*}, Д. В. АРСЕНЕНКО², Н. А. НОСКО³, О. В. КОВАЛЕВА⁴

^{1*}Каф. «Транспортные системы и логистика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, эл. почта den@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-7624-2925

²Каф. «Транспортные системы и логистика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55, эл. почта TSL@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-7757-8706

³Каф. «Транспортные системы и логистика», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 19 55+38 (057) 730 19 55, эл. почта TSL@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-4741-5890

⁴Каф. «Управление грузовой и коммерческой работой», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 85, эл. почта kovalova.uvkr@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-5342-0795

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Цель. Статья предполагает формализацию процесса повышения эффективности распределения подвижного состава на железных дорогах под погрузку путем концентрации погрузочных работ на терминалах с помощью динамической модели. **Методика.** Как показывает опыт, для оператора инфраструктуры распределение подвижного состава является сложным процессом. В работе проанализировано транспортно-экспедиционное обслуживание, технология работы отдельных субъектов железнодорожной отрасли и формирование организационных принципов управления вагонами предприятий различных форм собственности. Установлено, что система распределения подвижного состава, основанная на принципах логистического контроля в пути следования, должна отвечать следующим методологическим критериям: сокращение времени пропуски и ожидания грузовых операций, формирование достоверной информационной среды для всех участников транспортировки, создание условий для принятия быстрого и максимально выгодного решения по дальнейшему продвижению подвижного состава. **Результаты.** Создан перечень необходимых условий для динамического развития транспортного сектора в соответствии с современными требованиями рынка. Рассмотрен алгоритм логистического управления процессом распределения железнодорожного подвижного состава. Доказано, что отношения между участниками транспортного процесса в начальных условиях реформ строятся на основе недискриминационного доступа к ресурсам грузов. **Научная новизна.** Проанализирована работа диспетчерского персонала с точки зрения спроса на подвижной состав на всех этапах управления

Creative Commons Attribution 4.0 International

doi: 10.15802/stp2018/154410

© D. V. Lomotko, D. V. Arsenenko, N. A. Nosko, O. V. Kovalova, 2018

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

транспортним процесом. Вперше предложена динамическая модель, которая воспроизводит информационное пространство для всех участников перемещения подвижного состава. С ее помощью установлено, что железные дороги должны создавать систему распределения подвижного состава, соответствующую следующим критериям: уменьшение пробега и времени ожидания грузовых операций, создание условий для принятия быстрого и выгодного решения по дальнейшему продвижению подвижного состава. **Практическая значимость.** Применение разработанного метода распределения подвижного состава для формирования одиночных поездов позволит значительно уменьшить логистические затраты в цепочке поставок и повысить его конкурентоспособность на внешнем рынке. Развитие такой системы призвано создать действительно независимый регулятор транспортно-логистического процесса в условиях формирования единой информационной среды.

Ключевые слова: логистическая технология; подвижной состав; железнодорожный транспорт; управление железной дорогой; динамическая модель распределения ресурсов

REFERENCES

1. Danko, N. I., Lomotko, D. V., Kuleshov, V. V. (2012). Developing an organizational technologic model for management of freight car fleet of various ownership forms. *Innotrans*, 4, 8-13. (in Russian)
2. Lomotko, D. V., Kovalov, A. O., & Kovalova, O. V. (2015). Formation of fuzzy support system for decision-making on merchantability of rolling stock in its allocation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(3(78)), 11-17. doi: 10.15587/1729-4061.2015.54496 (in Ukrainian)
3. Proekt Zakonu pro zaliznychnyi transport Ukrainy. *Verkhovna Rada Ukrainy*. Retrieved from http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?id=&pf3511=62929 (in Ukrainian)
4. Panchenko, S. V., Butko, T. V., Prohorov, V. M., & Parhomenko, L. O. (2017). Udoshkonalennia tekhnolohii orhanizatsii vahonopotokiv shliakhom formuvannia avtomatyzovanoi systemy rozrakhunku i zabezpechennia vykonannia planu formuvannia poizdiv. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 3, 136-142. (in Ukrainian)
5. Bielecki, M., & Galinska, B. (2017). Total logistics management concept and principles in manufacturing enterprise. *Business Logistics in Modern Management: 17-th international scientific conference (October 2017, Osijek, Croatia)*, 93-107. (in English)
6. Hao, C., & Yue, Y. (2016). Optimization on Combination of Transport Routes and Modes on Dynamic Programming for a Container Multimodal Transport System. *Procedia Engineering*, 137, 382-390. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.272 (in English)
7. Tennøy, A., Hansson, L., Lissandrello, E., & Næss, P. (2016). How planners' use and non-use of expert knowledge affect the goal achievement potential of plans: Experiences from strategic land-use and transport planning processes in three Scandinavian cities. *Progress in Planning*, 109, 1-32. doi: 10.1016/j.progress.2015.05.002 (in English)
8. Jarašūnienė, A., Sinkevičius, G., & Mikalauskaitė, A. (2017). Analysis of Application Management Theories and Methods for Developing Railway Transport. *Procedia Engineering*, 187, 173-184. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.363 (in English)
9. Kozachenko, D. M., Vernigora, R. V., & Rustamov, R. S. (2017). Creation of export-oriented network of grain elevators in Ukraine. *Science and Transport Progress*, 2(68), 56-70. doi: 10.15802/stp2017/99952 (in English)
10. Lomotko, D. V., Alyoshinsky, E. S., & Zambrybor, G. G. (2016). Metodologikal Aspekt of the Logistics Tehnologies Formation in Reforming on the Railways. *Transportation Research Procedia*, 14, 2762-2766. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.482 (in English)
11. Nikitinas, V., & Dailydka, S. (2016). The Models of Management of Railway Companies in the European Union: Holding, the German Experience. *Procedia Engineering*, 134, 80-88. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.042 (in English)
12. Macedo, R., Benmansour, R., Artiba, A., Mladenović, N., & Urošević, D. (2017). Scheduling preventive railway maintenance activities with resource constraints. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 58, 215-222. doi: 10.1016/j.endm.2017.03.028 (in English)
13. Štefancová, V., Nedeliaková, E., & López-Escolano, C. (2016). Connection of Dynamic Quality Modeling and Total Service Management in Railway Transport Operation. *Procedia Engineering*, 192, 834-839. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.144 (in English)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

14. Batarlienė, N., Čižiūnienė, K., Vaičiūtė, K., Šapalaitė, I., & Jarašūnienė, A. (2017). The Impact of Human Resource Management on the Competitiveness of Transport Companies. *Procedia Engineering*, 187, 110-116. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.356 (in English)
15. Záhumenská, Z., & Gašparík, J. (2017). Supporting the Connection the Logistics Centers to Rail Network. *Procedia Engineering*, 192, 976-981. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.168 (in English)

Received: July 30, 2018

Accepted: Nov. 14, 2018

УДК 629.46-044.923+629.48

О. В. ФОМІН^{1*}, О. А. ЛОГВІНЕНКО², О. В. БУРЛУЦЬКИЙ³, А. М. ФОМІНА⁴^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури і технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +38 (067) 813 97 88, ел. пошта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946²Каф. «Механіка і проектування машин», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61001, тел. +38 (066) 373 03 50, ел. пошта logvinenko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-5731-7995³Каф. «Механіка і проектування машин», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61001, тел. +38 (095) 735 66 87, ел. пошта leha2006181@gmail.com, ORCID 0000-0003-1902-5809⁴ Каф. «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини», Східноукраїнський національний університет імені В.Даля, просп. Центральний, 59-а, Северодонецьк, Україна, 93400, тел. +38 (095) 142 90 74, ел. пошта anyta220885@gmail.com, ORCID 0000-0002-9810-8997

ТЕОРЕТИЧНО-ПРАКТИЧНИЙ БАЗИС ПРАВКИ ДЕФОРМОВАНИХ ВАГОНОКОНСТРУКЦІЙ ТЕРМІЧНИМ ВПЛИВОМ

Мета. Запропоноване дослідження спрямоване на обґрунтування доцільності використання методу термічної правки для усунення деформацій вагонних металоконструкцій, які мають місце під час їх виготовлення, експлуатації та ремонту. **Методика.** Для досягнення зазначеної мети створено математичний апарат, який базується на методах математичного планування експерименту. Розроблено узагальнений універсальний математичний запис оптимізаційного дослідження термічного правка вагоноконструкцій. Проведене моделювання термічного правка з використанням програмного комплексу систем автоматизованого проектування SolidWorks, а також експериментальне дослідження натурного зразка верхнього обв'язування напіввагона. **Результати.** На основі узагальненого математичного запису оптимізаційного дослідження термічного правка вагоноконструкцій створено математичні залежності для термічного правка хребтової балки та верхнього обв'язування універсальних напіввагонів. Ці залежності описують зміну величини деформаційного прогину з відповідними геометричними параметрами зон нагрівання (прогину хребтової балки та профілю верхнього обв'язування) залежно від варіювання керованих змінних (геометричних параметрів плям нагрівання й температури). Побудовані допоміжні графіки (бінарні перерізи) для обґрунтованого вибору оптимальних значень геометричних параметрів зон нагрівання у разі застосування термічного правка деформацій елементів вантажних вагонів, які виникають під час їх виготовлення, ремонту та експлуатації. На основі розроблених скінченно-елементних моделей виконано підтвердження ефективності термічного правка. Експериментальним шляхом доведена точність отриманого в ході комп'ютерного моделювання ефекту – відзначено усунення прогину елемента вагонної конструкції, який виник під час накладання зварного шва. **Наукова новизна.** Розроблений математичний апарат і створена на його основі модель для дослідження термічного правка вагоноконструкцій дозволяють обґрунтовано підходити до вибору оптимальних параметрів зазначеного правка під час його застосування для усунення деформацій, які виникають в елементах вантажних вагонів. **Практична значимість.** Урахування отриманих результатів сприятиме зниженню витрат на технологічні процеси побудови й ремонту вантажних вагонів, які складають основу вагонного парку залізниць України.

Ключові слова: вантажний вагон; вагоноконструкція; деформації; термічна правка; оптимізаційне дослідження; математичне моделювання; експериментальне дослідження

Вступ

Однією з важливих та перспективних галузей транспортного машинобудування, якому відводиться основна роль в прискоренні соціально-економічного розвитку країни, є вагонобудування. На особливу увагу заслуговують

питання підвищення технічного рівня вагонів, якого можна досягти за рахунок застосування нетрадиційних матеріалів із більш високими стійкими характеристиками, нових методів зварювання, а також прогресивних технологічних процесів.

Збереження провідного місця у перевезеннях вантажів залізницями вимагає постійного

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

поліпшення ефективності їх функціонування. Одним із ключових моментів забезпечення високого рівня продуктивності роботи залізниць є застосування більш економічних технологій виробництва й ремонту вантажних вагонів. При цьому на етапах життєвого циклу вантажних вагонів (під час виготовлення, ремонтів й експлуатації) їх конструкції зазнають різних видів деформацій.

Пошук шляхів протидії виникненню деформацій конструкцій вантажних вагонів та ефективного їх правка є важливою науково-прикладною проблемою. Відмічено обґрунтовується прямим зв'язком зменшення деформацій вагонних конструкцій із підвищенням рівня безпеки руху та збереження вантажів під час транспортування. Цим питанням приділяють особливу увагу не лише в науковій діяльності, але й під час практичної реалізації її результатів. Постійно проводять науково-дослідні й дослідно-конструкторські роботи, скеровані на удосконалення методів правка деформацій елементів одиниць рухомого складу за рахунок упровадження різних технологічних підходів і технічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій дозволив відзначити наступне. Так, у роботі [6] наведені перспективні шляхи поліпшення техніко-економічних показників вантажних вагонів, серед яких виділено ефективну протидію виникненню деформацій їх елементів. Але при цьому не зазначені можливі засоби вирішення поставленої задачі.

Заходи щодо вдосконалення несної конструкції кузова піввагона з метою зменшення деформацій у місцях його кріплення на палубі залізничного порома наведені в роботі [8]. Результати розрахунків на міцність кузова з урахуванням кріплення його до палуби за запропоновані конструкційні вузли в умовах морської качки дозволили зробити висновок про доцільність указаних рішень.

У статті [3] розглянуто перспективи вдосконалення протидеформаційних властивостей вантажних вагонів, збільшення яких можна досягти шляхом удосконалення їх конструкцій, наприклад, за рахунок упровадження матеріалів із поліпшеними характеристиками [10].

У роботі [2] висвітлені питання проектування рухомого складу для перевезення великовагових

вантажів із урахуванням деформаційних заходів. Дослідження динаміки й міцності здійснене за допомогою сучасних засобів програмного забезпечення ProMechanica і CosmosWorks. Також під час проектування несної конструкції транспортера проведено дослідження можливості його виконання з різнотипних матеріалів.

У науковій праці [7] розглянуті конструкційні особливості вагона для інтермодальних перевезень. Відзначено, що вагон має знижену середню частину, а наявність зворотної частини дає можливість здійснювати завантаження/розвантаження автотехніки на/з нього самокатом без деформацій.

У роботі [9] наведені результати досліджень із визначення характеру й ступеня впливу різних вантажних візків на міцність несних систем вагонів. Однак до завдань такого дослідження не включені питання визначення відповідного впливу ресор на протидію експлуатаційним деформаціям.

У дослідженні [1] наведені результати щодо отримання математичних моделей зміни основних показників базових несних елементів вантажних вагонів. При цьому питання їх термічного правка не розглянуті.

У статті [4] представлені матеріали про вплив профілю кочення передніх за рухом коліс візка на загальну динаміку одиниці рухомого складу. Однак взаємозв'язку з виникненням можливих деформацій встановлено не було.

У дослідженні [11] проаналізовані особливості руху й взаємодії одиниць рухомого складу з параметрами, які відповідають наявним технічним рішенням. А дослідження для одиниць із параметрами, які відображають можливості впровадження перспективних технологічних рішень, не проведені.

Наукова робота [5] присвячена висвітленню результатів удосконалення динамічних якостей рухомого складу під час проходження кривих ділянок колії шляхом поліпшення відповідних конструктивних елементів. Також визначені можливості і вплив впровадження таких інновацій на зношений рухомий склад.

Результати проведеного аналізу літературних джерел засвідчили, що питання наукового обґрунтування термічного правка деформацій вагонних конструкцій у повній мірі не були розглянуті.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Мета

Основним технологічним процесом вагонобудування та подальшого ремонту вантажних вагонів є зварювання. При цьому його наслідком є поява в зоні нагрівання температурних залишкових напружень, які в свою чергу призводять до появи залишкових деформацій у вагонних елементах. Усе це визначило мету дослідження, яка полягає в науковому обґрунтуванні процесу термічного правка деформованих вагоноконструкцій.

Методика

Огляд наявних підходів, скерованих на усунення деформацій вагоноконструкцій, дозволив обґрунтовано виділити застосування методів правка, серед яких на особливу увагу заслуговує термічне правка, засноване на місцевому нагріванні виділених зон із подальшим їх охолодженням. Основні етапи виникнення й правка післязварних деформацій у прив'язці до умовної балки наведені на рис. 1. За форму зони нагрівання було обрано рівнобічний трикутник, який отримав назву «клин».

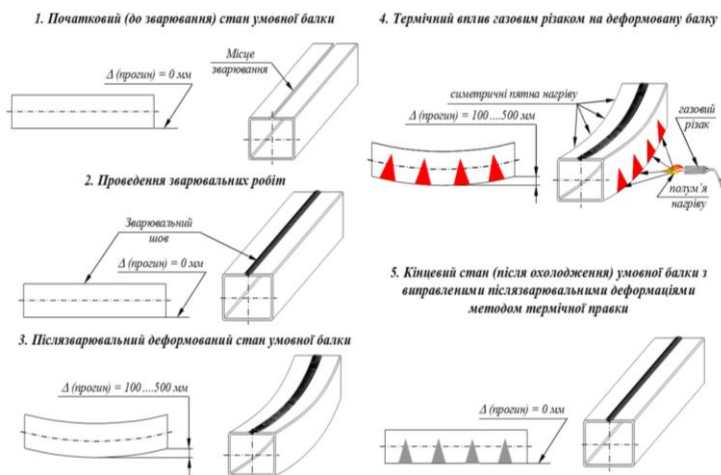


Рис. 1. Принципова схема виникнення й правка термічним правкам післязварних деформацій в умовній балці вантажного вагона термічною правкою

Fig. 1. Principle diagram of the development of post-welded deformations in a conventional beam of a freight car with thermal leveling

З урахуванням обраного критерію узагальнений універсальний математичний запис задачі оптимізаційного дослідження термічної правки з метою зниження післязварних деформацій буде мати наступний вигляд:

З метою дослідження процесів, які мають місце під час термічного правка вагонних елементів, автори розробили математичний апарат, який ґрунтується на методах оптимізації та математичного планування експерименту. Наведено узагальнений універсальний математичний запис оптимізаційного дослідження термічного правка для будь-якої вагонної металокопструкції:

$$F(\bar{X}) \rightarrow \text{extremum}$$

$$\bar{X} \in D_x \in D, \quad (1)$$

де F – головний критерій оптимальності; D_x – область припустимих рішень; D – область можливих рішень.

Результати

Проведені попередні дослідження показали, що для задачі оптимізаційного дослідження термічного правка вагонних металокопструкцій з метою зменшення їх післязварних деформацій за головний (основний) критерій оптимізації доцільно обирати деформацію (прогин) f .

$$f(\bar{X}) \rightarrow \min,$$

$$\bar{X} \in D_x \in D. \quad (2)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У наведеному математичному записі область можливих рішень D визначаються границями відповідних значень змінних факторів x_i (параметричними обмеженнями), а саме змінними параметрами, які характеризують: геометричні розміри плям нагрівання (висоту x_{Ba} , довжину x_{Dd} , ширину x_{She}); кількість

плям нагрівання (x_{Ij}); температуру нагрівання T при термічній правці (x_{Tk}).

З урахуванням вищенаведеного область можливих рішень D можна представити у наступному вигляді:

$$D = \left\{ \bar{X} \left| \begin{array}{l} x_{Ba \min} \leq x_{Ba} \leq x_{Ba \max}, x_{Dd \min} \leq x_{Dd} \leq x_{Dd \max}, \\ x_{She \min} \leq x_{She} \leq x_{She \max}, x_{Ij \min} \leq x_{Ij} \leq x_{Ij \max}, \\ x_{Tk \min} \leq x_{Tk} \leq x_{Tk \max}; a \in [1:n], d \in [1:c], \\ e \in [1:s], j \in [1:h], k \in [1:m]. \end{array} \right. \right\}. \quad (3)$$

Область припустимих рішень D_x , в якій знаходиться шукане рішення, виділяють із області D функціональними вимогами (обмеженнями вторинних критеріїв). Попередні дослідження показали, що за зазначені критерії та їх відповідні обмеження доцільно обирати: найбільше напруження σ_{\max} в небезпечному перерізі металокопункції, яке не повинно перевищувати допустиме напруження $[\sigma]$ для обраного матеріалу; жорсткість c_{\max} , значення якої не

повинно перевищувати допустиме $[c]$; напруження стійкості $\sigma_{cm \max}$, яке не повинно перевищувати допустиме $[\sigma_{cm}]$; модуль поздовжньої пружності E , який обирають залежно від матеріалу й позначають для сталі E_{cm} ; ефективний коефіцієнт корисної дії η нагрівання металокопункції.

Тоді область припустимих рішень D_x набуде наступного вигляду:

$$D_x = \left\{ \bar{X} \left| \begin{array}{l} \sigma_{\max} \leq [\sigma], c_{\max} \leq [c], \sigma_{cm \max} \leq [\sigma_{cm}], \\ E = E_{cm}, \eta \geq \eta_{\min}, \eta \leq \eta_{\max} \\ x_{Ba \min} \leq x_{Ba} \leq x_{Ba \max}, x_{Dd \min} \leq x_{Dd} \leq x_{Dd \max}, \\ x_{She \min} \leq x_{She} \leq x_{She \max}, x_{Ij \min} \leq x_{Ij} \leq x_{Ij \max}, \\ x_{Tk \min} \leq x_{Tk} \leq x_{Tk \max}; a \in [1:n], d \in [1:c], e \in [1:s], \\ j \in [1:h], k \in [1:m]. \end{array} \right. \right\}. \quad (4)$$

На основі наведеного вище узагальненого математичного запису термічної правки створені математичні залежності для термічного виправлення деформацій хребтової балки та верхнього обв'язування універсальних напіввагонів, які описують зміну основного показника (деформаційного прогину Δy хребтової балки (4.5) та профілю верхнього обв'язування (4.6) залежно від варіювання керованих змінних (геометричних параметрів «клини» – ширини b та висоти h , а також температури нагрівання t):

$$\Delta y = 1304,30333 - 55,074 \cdot b + 25,86856 \cdot h - 0,90952 \cdot t + 0,21511 \cdot b^2 - 0,13489 \cdot h^2 + 0,00108 \cdot t^2 + 0,115 \cdot b \cdot h + 0,0056 \cdot b \cdot t - 0,00805 \cdot h \cdot t, \quad (5)$$

$$\Delta y = -1889,03858 + 25,19875 \cdot b + 18,71944 \cdot h + 2,57497 \cdot t - 0,08472 \cdot b^2 + 0,1403 \cdot h^2 - 0,00108 \cdot t^2 - 0,17688 \cdot b \cdot h - 0,00142 \cdot b \cdot t - 0,01692 \cdot h \cdot t. \quad (6)$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Представлені вище математичні залежності дозволяють побудувати допоміжні графіки (бінарних перерізів) і провести їх подальший аналіз із метою обґрунтованого вибору геометричних параметрів зон нагрівання (ширини b^* та

висоти h^*). Так, на рис. 2 й 3 наведені приклади таких графіків для хребтової балки та верхнього обв'язування універсальних напіввагонів.

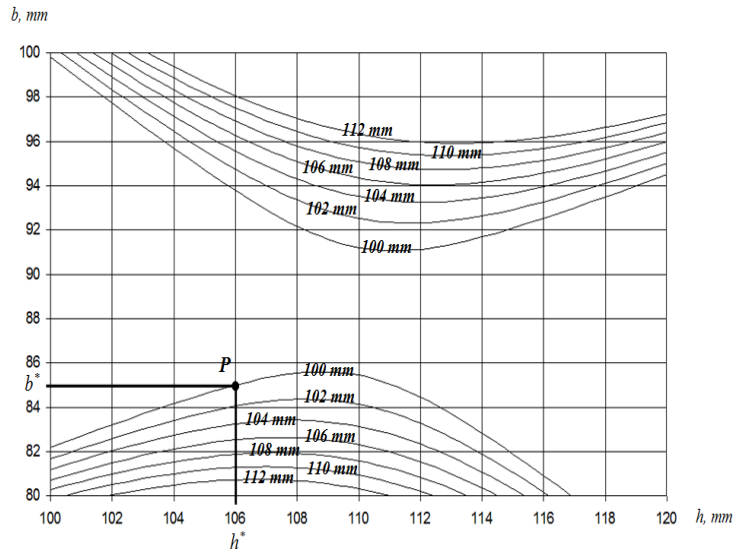


Рис. 2. Допоміжний графік вибору розмірів «клина» для правки балки хребтової за $t = 710^\circ \text{C}$

Fig. 2. Additional diagram for sorting out the dimensions of a «wedge» for the center sill leveling at $t = 710^\circ \text{C}$

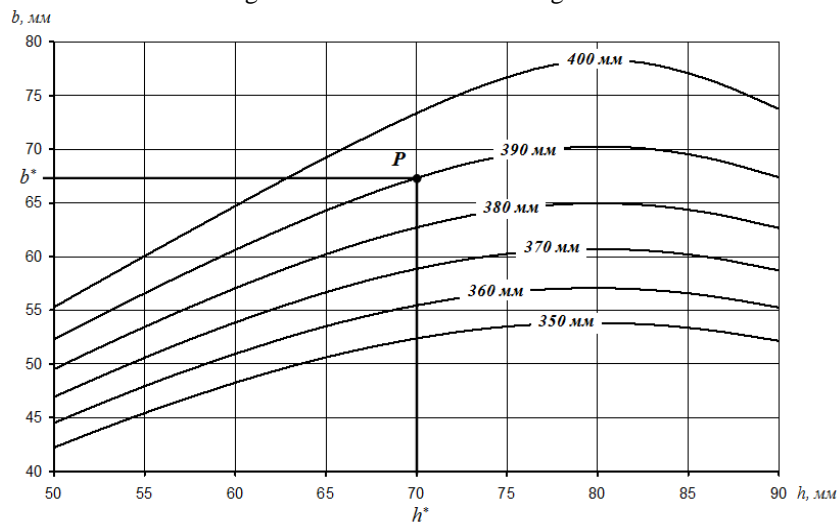


Рис. 3. Допоміжний графік вибору розмірів «клина» для правки обв'язування верхнього за $t = 610^\circ \text{C}$

Fig. 3. Additional diagram for sorting out the dimensions of a «wedge» for the top cord leveling at $t = 610^\circ \text{C}$

Отримані результати дозволили перейти до наступного етапу наукових досліджень, який полягає в підтвердженні ефективності терміч-

ної правки. При цьому авторами було відмічено, що таке підтвердження можливо отримати за результатами моделювання термічної правки

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

з використанням відповідних програмних комплексів систем автоматизованого проектування таких як ANSYS, Nastran, MARK, SolidWorks, T-flex та ін. Так авторами було проведено моделювання термічної правки обв'язування верхнього напіввагону та хребтової балки (на основі розроблених скінченно-елементних моделей) з використанням комплексу SolidWorks.

Також виконано підтвердження точності та отриманого в ході такого моделювання ефекту

(відміченого усунення, отриманого при накладанні зварювального шва, прогину елементу вагонної конструкції) в рамках експериментального дослідження натурального зразка обв'язування верхнього напіввагону.

Етапи комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження основних елементів конструкції напіввагону представлені на рис. 4.

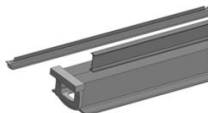
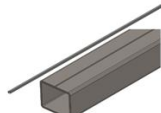
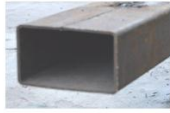

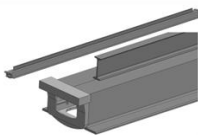
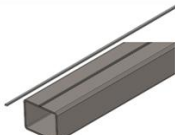

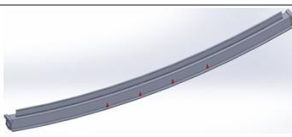
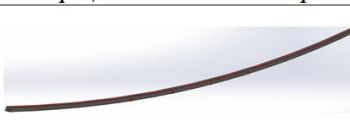
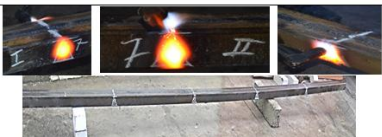
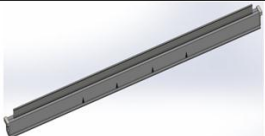


ЕТАПИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ		ЕТАПИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ ПРАВКИ ОБВ'ЯЗУВАННЯ ВЕРХНЬОГО	
Балка хребтова	Обв'язування верхнє	До накладання зварювального шва	
			
Процес проведення зварювальних робіт			
			
Процес накладання та нагрівання клинів			
			
Після здійснення технологічної операції термічної правки			
			

Рис. 4. Етапи моделювання процесу термічної правки комп'ютерного та експериментального досліджень вагонних конструкцій

Fig. 4. Stages of the thermal leveling process of computer and experimental research into car structures

Експеримент проводився на натурних зразках, які було виконано з урахуванням конструкції, технології та матеріалу, аналогічних реальним балки хребтової та верхньому обв'язуванню напіввагону.

Етапи експериментального дослідження такі:

- по всій довжині дослідного зразка накладається за допомогою зварювального обладнання зварювальний шов;

- після остигання зразка фіксується величина прогину, який при цьому виникає;

- залежно від величини прогину встановлюються розміри плям нагрівання (у нашому випадку формою плями нагрівання є рівнобічний трикутник, який отримав назву «клин») і температура нагрівання;

- за допомогою нагрівального обладнання (із використанням газокисневого полум'я) виконується прогрівання «клинів» до набуття ви-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

шнево-червоного – вишневого кольору сталі у зоні прогрівання;

– після виконання процесу прогрівання усіх «клинів» дослідний зразок залишається для остигання;

– після остигання зразка контролюється процес усунення прогину, який мав місце на етапі накладання зварювального шва.

Після експериментальних досліджень було проведено мікроскопію структури металу в зоні нагрівання для підтвердження працездатності сталі 09Г2С, з якої вироблено балку, після правочних робіт та досліджено структурні стани матеріалів несучих конструкцій вантажних вагонів у місцях температурного впливу при термічній правці.

Мікродослідження проводилися після правки при температурі нагрівання від 450-900°C на мікрошліфі за допомогою мікроскопа Digital Microscope CELESTRON 44302-B-CGL Deluxe Handheld. Мікроструктуру зразків виявляли методом хімічного й електролітичного травлення.

Визначення механічних характеристик зварювального з'єднання проводилося відповідно до вимог (ГОСТ 28840-90, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9651-84, ГОСТ 6996-66). Зразки вирізані з проб зі зварювального шва та проб після правки за схемою, наведеною на рис. 5 (вирізані заготовки для виготовлення плоских зразків, на яких вивчалися властивості металу шва та основного металу клина після правки).

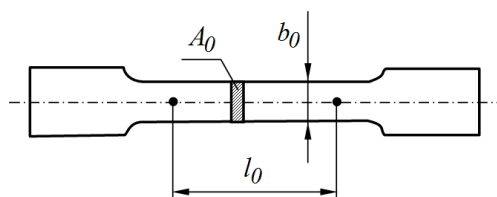


Рис. 5. Схема плоского зразка для випробувань матеріалів на розтягання

Fig. 5. Scheme of a flat sample for tensile materials testing

За допомогою універсальної випробувальної машини 2054 Р-5 (рис. 6) виготовлені зразки випробовувалися на розтягання при температурах 500°C, 600°C, 700°C, 800°C зусиллям до 50 кН.



Рис. 6. Універсальна машина для випробування зразків на статичне розтягання

Fig. 6. Universal testing machine static tensile specimens

Отримані в ході випробувань механічні характеристики металу в зоні нагрівання після правки натурного зразка вагонної металоконструкції підтвердили їх незначне відхилення від тих, що були визначені до правки. Це аргументується забезпеченням необхідного рівня характеристик матеріалу.

Наукова новизна та практична значимість

У роботі науково обґрунтовано напрямок виправлення деформацій вагонних металоконструкцій за допомогою методу термічного виправлення. Результати проведених досліджень дозволяють удосконалювати технології виробництва й ремонту вагонів.

Висновки

Запропонований у статті метод термічної правки дозволяє усувати деформації будь-яких вагонних конструкцій. Наведений математичний апарат і побудовані з його використанням допоміжні графіки дозволяють ефективно та швидко підібрати необхідні для термічної правки параметри й реалізувати вказаний підхід з усунення зварних деформацій у наявних виробничих умовах.

Матеріали даної публікації отримано в ході виконання заявки проекту Ф84 ДФФД.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Також результати проведеної оптичної мікроскопії та отримані в ході випробувань механічні характеристики зразка верхнього обв'язування напіввагона дозволили зробити висновок, що після проведення термічної прав-

ки практично не відбувається зміни структури основного металу елемента, а відхилення в механічних характеристиках до і після процесу правки є незначними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Математичні моделі зміни основних показників базових несучих елементів кузовів напіввагонів / О. В. Фомін, О. А. Логвіненко, Р. Ю. Дьомін, Г. П. Бородай, В. В. Фомін, О. В. Бурлуцький // Заліз. трансп. України. – 2013. – № 5/6 (102/103). – С. 95–104.
2. Divya Priya, G. Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley / G. Divya Priya, A. Swarnakumari // Intern. J. of Innovative Technology and Research. – 2014. – Vol. 2. – Iss. 6. – P. 1568–1580.
3. Fomin, O. V. Development and application of cataloging in structural design of freight car building / O. V. Fomin, O. V. Burlutsky, Yu. V. Fomina // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 2 – P. 250–256.
4. Impact of Wheelset Steering and Wheel Profile Geometry to the Vehicle Behavior when Passing Curved Track / V. Hauser, O. S. Nozhenko, K. O. Kravchenko, M. Loulová, J. Gerlici, T. Lack // Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 17, No. 3. – P. 306–312.
5. Kelrykh, M. Perspective directions of planning carrying systems of gondolas / M. Kelrykh, O. Fomin // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No. 6. – P. 64–67.
6. Krason, W. FE numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards / W. Krason, T. Niezgoda // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. – 2014. – Vol. 62. – Iss. 4. – P. 843–851. doi: 10.2478/bpasts-2014-0093
7. Lovska, A. A. Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge / A. A. Lovska // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 1. – P. 49–54.
8. Myamlin, S. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / S. Myamlin, L. Povilas Lingaitis, S. Dailydka, G. Vaičiūnas, M. Bogdevičius, G. Bureika // Transport. – 2015. – Vol. 30. – Iss. 1. – P. 88–92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565
9. Proposal of a Mechanism for Setting Bogie Wheelsets to Radial Position while Riding Along Track Curve / V. Hauser, O. S. Nozhenko, K. O. Kravchenko, M. Loulová, J. Gerlici, T. Lack // Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 17. – No. 2. – P. 186–192.
10. Research of the intermolecular interactions and structure in epoxyamine composites with dispersed oxides / Yu. Danchenko, V. Andronov, E. Barabash, T. Obigenko, E. Rybka, R. Meleshenko, A. Romin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6. – Iss. 12 (90). – P. 4–12. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118565
11. Tartakovskyi, E. Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems / E. Tartakovskyi, O. Gorobchenko, A. Antonovych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 5. – Iss. 3 (83). – P. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80198

А. В. ФОМИН^{1*}, А. А. ЛОГВИНЕНКО², А. В. БУРЛУЦКИЙ³, А. Н. ФОМИНА⁴

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Государственный университет инфраструктуры и технологий, ул. Кирилловская, 9, Киев, Украина, 04071, тел. +38 (067) 813 97 88, эл. почта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

²Каф. «Механика и проектирование машин», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61001, тел. +38 (066) 373 03 50, эл. почта logvinenko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-5731-7995

³Каф. «Механика и проектирование машин», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61001, тел. +38 (095) 735 66 87, эл. почта leha2006181@gmail.com, ORCID 0000-0003-1902-5809

⁴Каф. «Железнодорожный, автомобильный транспорт и подъемно-транспортные машины», Восточноукраинский национальный университет имени В. Даля, просп. Центральный, 59-а, Северодонецк, Украина, 93400, тел. +38 (095) 142 90 74, эл. почта anyta220885@gmail.com, ORCID 0000-0002-9810-8997

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКИЙ БАЗИС ПРАВКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ВАГОНОКОНСТРУКЦИЙ ТЕРМИЧЕСКИМ ВЛИЯНИЕМ

Цель. Предложенное исследование направлено на обоснование целесообразности использования метода термической правки для устранения деформаций вагонных металлоконструкций, которые имеют место при их изготовлении, эксплуатации и ремонте. **Методика.** Для достижения отмеченной цели создан математический аппарат, который базируется на методах математического планирования эксперимента. Разработана обобщенная универсальная математическая запись оптимизационного исследования термической правки вагоноконструкций. Проведено моделирование термической правки с использованием программного комплекса систем автоматизированного проектирования SolidWorks, а также экспериментальное исследование натурного образца верхней обвязки полувагона. **Результаты.** На основе обобщенной математической записи оптимизационного исследования термической правки вагоноконструкций созданы математические зависимости для термической правки хребтовой балки и верхней обвязки универсальных полувагонов. Эти зависимости описывают изменение величины деформационного прогиба с соответствующими геометрическими параметрами зон нагрева (прогиба хребтовой балки и профиля верхней обвязки) в зависимости от варьирования управляемых переменных (геометрических параметров пятен нагрева и температуры). Построены вспомогательные графики (бинарные сечения) для обоснованного выбора оптимальных значений геометрических параметров зон нагрева при применении термической правки возникающих деформаций элементов грузовых вагонов во время их изготовления, ремонта и эксплуатации. На основе разработанных конечно-элементных моделей выполнено подтверждение эффективности термической правки. Экспериментальным путем доказана точность полученного в ходе компьютерного моделирования эффекта – отмечено устранение возникшего при наложении сварочного шва прогиба элемента вагонной конструкции. **Научная новизна.** Разработанный математический аппарат и созданная на его основе модель для исследования термической правки вагоноконструкций позволяют обосновано подходить к выбору оптимальных параметров отмеченной правки при их использовании для устранения возникающих в элементах грузовых вагонов деформаций. **Практическая значимость.** Учет полученных результатов будет способствовать снижению затрат на технологические процессы изготовления и ремонта грузовых вагонов, которые составляют основу вагонного парка железных дорог Украины.

Ключевые слова: грузовой вагон; вагоноконструкция; деформации; термическая правка; оптимизационное исследование; математическое моделирование; экспериментальное исследование

O. V. FOMIN^{1*}, O. A. LOGVINENKO², O. V. BURLUTSKY³, A. M. FOMINA⁴

^{1*}Dep. «Cars and Car Facilities», State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska St., 9, Kyiv, Ukraine, 04071, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

²Dep. «Mechanics and Machine Design», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (066) 373 03 50, e-mail logvinenko@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-5731-7995

³Dep. «Mechanics and Machine Design», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (095) 735 66 87, e-mail leha2006181@gmail.com, ORCID 0000-0003-1902-5809

⁴Dep. «Railway, Road Transport and Handling Machines», East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Tsentralnyi av. 59-a, Sieverodonetsk, Ukraine, 93400, tel. +38 (095) 142 90 74, e-mail anyta220885@gmail.com, ORCID 0000-0002-9810-8997

THEORETIC-PRACTICAL BASIS OF LEVELING OF DEFORMED CARRIER CONSTRUCTIONS BY THERMAL INFLUENCE

Purpose. The proposed study is aimed at justifying the expediency of using the thermal leveling method to correct deformations of car metal structures that take place during their manufacture, operation and repair. **Methodology.** To achieve this purpose a mathematical apparatus was created, which is based on the methods of mathematical design of the experiment. A generalized universal mathematical record of the optimization study of the thermal leveling of car structures has been developed. Modelling of thermal leveling, using the software complex of CAD systems of Solid Works was carried out, as well as an experimental study of the full-size sample of the cantail in the gondola car. **Findings.** On the basis of a generalized mathematical record of the optimization study of the

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

thermal leveling of the railcar constructions, mathematical dependencies were created for the thermal leveling of the center sill and the cantrail in the universal gondola cars. These dependences describe the change in the magnitude of the deformation deflection with the corresponding geometric parameters in the heating zones (deflection of the center sill and the profile of the cantrail) depending on the variation of the controlled variables (geometric parameters of the heating spots and temperature). Auxiliary graphs (binary sections) have been constructed for a reasonable choice of the optimal values of the geometric parameters in the heating zones when using thermal leveling of the occurring deformations in the elements of freight cars during their manufacture, repair and operation. Based on the developed finite element models, the efficiency of thermal leveling has been confirmed. The accuracy of the effect obtained in the course of computer simulation is proved experimentally – elimination of the occurred deflection when applying the welding seam in the element of the car structure was noted). **Originality.** The developed mathematical apparatus and the model created on its basis for the study of the thermal correction in the car structures allow us to justify the selection of the optimal parameters of the marked correction when they are used to eliminate the deformations that occur in the elements of the freight cars. **Practical value.** Accounting of the obtained results will help to reduce costs in technological processes in the manufacture and repair of freight cars, which is the basis of the rail car fleet of Ukraine.

Keywords: freight car; car structure; deformation; thermal correction; optimization study; math simulation; experimental research

REFERENCES

1. Fomin, O. V., Logvinenko, O. A., Domin, R. Y., Fomin, V. V., Boroday, G. P., & Burlutskiy, O. V. (2013). Matematychni modeli zminy osnovnykh pokaznykh bazovykh nesuchykh elementiv kuzoviv napivvahoniv. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, 5/6(102/103), 95-104. (in Ukrainian)
2. Divya Priya, G., & Swarnakumari, A. (2014). Modeling and analysis of twenty tonne heavy duty trolley. *International Journal of Innovative Technology and Research*, 2(6), 1568-1580. (in English)
3. Fomin, O. V., Burlutskiy, O. V., & Fomina, Y. V. (2015). Development and application of cataloging in structural design of freight car building. *Metallurgical and Mining Industry*, 2, 250-256. (in English)
4. Hauser, V., Nozhenko, O. S., Kravchenko, K. O., Loulová, M., Gerlici, J., & Lack, T. (2017). Impact of wheelset steering and wheel profile geometry to the vehicle behavior when passing curved track. *Manufacturing Technology*, 17(3), 306-312. (in English)
5. Kelrykh, M., & Fomin, O. (2014). Perspective directions of planning carrying systems of gondolas. *Metallurgical and Mining Industry*, 6, 64-67. (in English)
6. Krason, W., & Niezgodá, T. (2014). FE numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 62(4), 843-851. (in English)
7. Lovska, A. A. (2015). Peculiarities of computer modeling of strength of body bearing construction of gondola car during transportation by ferry-bridge. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 49-54. (in English)
8. Myamlin, S., Lingaitis, L. P., Dailydka, S., Vaičiūnas, G., Bogdevičius, M., & Bureika, G. (2015). Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*, 30(1), 88-92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565 (in English)
9. Hauser, V., Nozhenko, O. S., Kravchenko, K. O., Loulová, M., Gerlici, J., & Lack, T. (2017). Proposol of a Mechanism for Setting Bogie Wheelsets to Radisl Position while Riding Along Track Curve. *Manufacturing Technology*, 17(2), 186-192. (in English)
10. Danchenko, Y., Andronov, V., Barabash, E., Obigenko, T., Rybka, E., Meleshenko, R., & Romin, A. (2017). Research of the intermolecular interactions and structure in epoxyamine composites with dispersed oxides. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(12), 4-12. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118565 (in English)
11. Tartakovskiy, E., Gorobchenko, O., & Antonovych, A. (2016). Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3), 4-11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80198 (in English)

Надійшла до редколегії: 16.07.2018

Прийнята до друку: 30.11.2018

UDC 629.463-049.32:331.101.3

V. Y. SHAPOSHNYK^{1*}

¹Dep. «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 vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-6491

HUMAN FACTOR INFLUENCE ON PERFORMING TECHNICAL MAINTENANCE AND REPAIR OF FREIGHT CARS

Purpose. The scientific work is aimed to: 1) study the indicators and criteria for evaluating the influence of human factor on failure-free operation of freight cars; 2) theoretically describe the probabilistic model of the human factor role during the maintenance and repair of freight cars according to technical state; 3) consider the model of situation development for the case of a critical defect of the freight car unit taking into account the human factor. **Methodology.** In order to achieve this purpose, the methodological approaches were considered: 1) to evaluation of the reliability indicators in the system «man – freight car» during maintenance and repair; 2) to evaluation of the level of traffic safety in case of transition from the existing system of maintenance and repair of freight cars to the system according to technical state. The model of the situation development for the case of a critical defect of the freight car unit with the consideration of the human factor was described. **Findings.** The approach to the evaluation of risk indicators of potential failures of freight cars is given. The probability of occurrence of negative events (risks) and possible economic damage from their manifestation were taken as the indicators. In the developed model of situation development for the case of a critical defect of the freight car unit with the consideration of the human factor, three possible states are shown: workable and limited workable, unworkable and emergency. Each initial state is characterized by the development of events, which is associated with designers' errors, with defects during manufacture of parts and units, with human factor. **Originality.** It is proposed to consider the value of the failure probability, which is related to the human factor, as a certain proportion of the overall probability of failure of the system «man – freight car». The interpretation of Harrington's desirability function for the case of application to freight cars is given. During maintenance and repair, it is suggested to introduce an indicator that characterizes the observance of the technology of use of maintenance services for freight cars, taking into account the human factor. **Practical value.** Based on the conducted research it is possible to evaluate the influence of the human factor on the maintenance and repair of freight cars. According to the developed model of situation development for the case of a critical defect it is possible to determine the critical level of the defect of the freight car unit taking into account the human factor to limit the risk of an accident or transport event.

Keywords: freight car; reliability; human factor; critical defect; maintenance; repair

Introduction

The main duties of the railway transport workers are the satisfaction of the requirements for the passengers and cargo transportation subject to unconditional compliance with traffic safety [9].

Many scientific works are devoted to the improvement of designs, maintenance, repair technology and rolling stock diagnostics, which greatly affect the traffic safety [1, 3, 5, 15]. According to research data, the human factor significantly influences the traffic safety level [16, 18].

The activities of railway transport workers, which are aimed at ensuring traffic safety in the system «man – freight car», are connected with mental and physical functions. At the same time,

a man carries out his/her activities according to deterministic and random procedures or rules, instructions, technological schedule. In the first case, this activity is strictly regulated. In the second case, during the maintenance or repair process the occurrence of unexpected events is possible, for example, the deterioration of the natural environment. In some processes, such events predict and prepare the appropriate guiding activities [4, 6, 17].

Mental work (intellectual activity) is associated with the reception and processing of information, and mainly requires concentration of attention, exertion of the sensory apparatus, memory, as well as the activation of thinking processes and emotions. The work of inspectors and mechanics during

maintenance and repair requires increased responsibility and high nervous-emotional tension. Such work is recognized by the high degree of information dynamism, its volume, the lack of time to prepare and make the right decisions, the need to resolve the conflict situations that arise occasionally during the maintenance and repair of freight cars [8].

The role of the human factor manifests itself in the influence on the process of training inspectors and mechanics for the maintenance and repair of freight cars (operation process) and in evaluating the results of its implementation. The human factor can be defined as a set of peculiar psychophysiological features that must be taken into account in order to exclude the causes of wrong actions [2, 11].

The human factor that caused erroneous actions is not always due to the psychological and psychophysiological characteristics of a person and does not always correspond to the level of complexity of tasks or problems. Mistakes caused by a human factor, as a rule, occur unintentionally. A person performs actions that are regarded by he/she as the most appropriate or correct.

The reasons for the erroneous actions of a person can be classified in the following groups:

- limitations of information provision, absence or lack of information support;
- mistakes caused by external factors;
- errors caused by the physical and psychological state and human properties;
- the limited resources of support and implementation of the taken decision;
- emotional tension;
- loss of attention that occurs when performing the necessary actions, especially in the event of unexpected equipment failure or a sudden change of situation.

It is necessary to improve the methods of facilitating the work of inspectors and mechanics and to take the necessary measures to reduce the human factor influence. For this purpose, it is necessary to develop a methodology for assessing the influence of the human factor on performing maintenance and repair.

Purpose

The scientific work is aimed to: 1) study the indicators and criteria for evaluating the influence of human factor on failure-free operation of freight cars; 2) theoretically describe the probabilistic model of the human factor role during the maintenance and repair of freight cars according to technical state; 3) consider the model of situation development for the case of a critical defect of the freight car unit taking into account the human factor.

Methodology

The main indicator of the reliability of work in the system «man – freight car» during the maintenance and repair is the probability that the time between failures will not exceed the given temporal restriction. It can be determined by the following expression:

$$P(T \leq t) = \{P_{FP}(T \leq t) \cdot P_{HF}(T \leq t)\}, \quad (1)$$

where P_{FP} and P_{HF} – the value of the failure probability, which is determined by the reliability of the freight car and the influence of the human factor, respectively;

T – is the time of freight car operation to the first failure; t – is the period of time during which the failure probability of freight car is established.

The regularities of the dependencies of the failure probability P_{FP} and P_{HF} , when T is less or equal to t for the inspector or mechanic of the freight car, are determined by the biological nature of the human body, on the one hand, and the design, material properties and conditions of freight car operation – on the other.

During analysis of the reliability of the system «man-freight car», the research objects are different occasional events and values that influence respectively both the state of a person and the freight car. The typical failure rate function of the freight car is shown in Fig. 1. One can distinguish in it three characteristic areas:

- from the beginning of operation to t_1 – the time interval at which the failure rate function decreases as a result of design improvements of freight cars in the process of production tests, running of parts and units and other technical reasons;

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

– t_1-t_2 – the time interval at which the failure rate function is practically constant and characterizes the stable operation of freight car;

– from t_2 to the limiting state – the time of the failure rate increasing due to the physical wear of freight car.

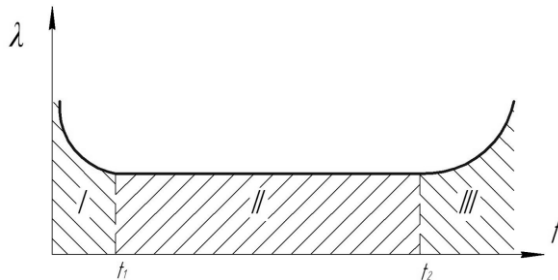


Fig. 1. Dependence of the failure rate function of freight car on the time between failure at $\lambda = \text{const}$

The human body, in accordance with the 1-st and 2-nd laws of thermodynamics of biological systems, is in a steady unbalanced thermodynamic state, unlike freight cars, which are always in an unstable unbalanced thermodynamic state. It is provided by human biorhythms throughout his/her work. In this regard, a person is periodically in workable and unworkable state. Researchers distinguish a daily alternation cycle of these states. As a result of loadings, after a change of workable state to unworkable one, a person needs rest for restoration.

The failure rate of freight cars due to the human factor during the workable period, consisting of erroneous solutions or actions, in the form almost coincides with the graph shown in Fig. 1.

The work of the inspector or mechanic, as well as the freight car failure rate, can also be divided into three time intervals [7]:

- characterizes the period of operative adaptation of man to the working process after the rest;
- characterizes the basic working process, during which it takes place a smooth, close to linear transition of person's thermodynamic state from weakly to a highly unbalanced one;
- characterizes a highly unbalanced thermodynamic state as a result of fatigue, in which the body loses its ability to work and goes to rest.

Graphically, daily changes in the failure rate of the inspector's or mechanic's body are shown in Fig. 2

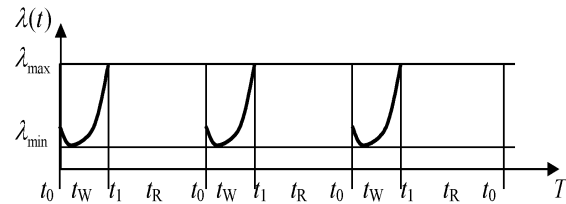


Fig. 2. Dependence of changes in the failure rate of inspector's or mechanic's body during the day:

t_w – work; t_R – rest

One can see from the dependence (Figure 2) that during the t_w time in the work of the system «man – freight car» there is a change in the thermodynamic state of the body of inspector or mechanic from a weakly unbalanced at the beginning of work to a highly unbalanced one at the end of it. During the rest t_R in the body of inspector or mechanic there is a complete restoration of its state, and from the beginning of the next day the processes are repeated. From the position of failure rate, the most favourable time of work in most cases is the work that begins in the morning, because before this, during sleep, usually the most complete restoration of all functions of the body occurs. However, the production processes associated with the maintenance of freight cars are around the clock, and inspectors and mechanics who carry out such maintenance tend to work double shifts. In this case the failure rate due to the human factor will correlate with the time of shift. Dependences of daily changes in the failure rate of inspector or mechanic, performing the freight car maintenance in the case of double-shift work, are shown in Fig. 3.

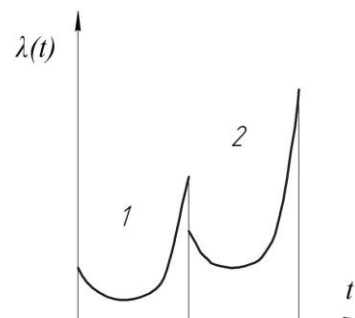


Fig. 3. Dependences of daily changes in the failure rate of inspector or mechanic, performing the freight car maintenance in the case of double-shift work:

$\lambda(t)$ – probability of failure rate;
 t – work shifts duration

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

The work of inspectors and mechanics in night shift during the freight car maintenance is characterized by significant fatigue, which reaches the maximum value until the end of the shift.

As can be seen from the dependences shown in Fig. 3, the first shift of work is characterized by the minimum failure rate function, the greater one falls to the second shift. The average ratio of the failure rate function is determined by the work conditions of inspector and mechanic, who carry out technical maintenance, technical parameters and operation conditions of freight cars [7, 19].

The value of failure probability associated with the human factor (P_{HF}) can be presented as a proportion of the overall failure probability of the system «man – freight car» in this form:

$$P_{HF} = \sum k_{HF} P_P, \quad (2)$$

where k_{HF} – is the significance coefficient the human factor affecting the reliability of the freight car during maintenance.

Failure indicators that have occurred under the influence of the human factor are almost the same as reliability indicators of freight cars. Here are the main ones:

- number of failures or violation of organizational and technological processes of freight cars maintenance, caused by negative events associated with the human factor;
- the probability of failure or violation of the organizational and technological process of freight car maintenance at a time interval less than the predetermined $P(T \leq t)$ caused by a negative event associated with the human factor;
- the failures rate or violation of organizational and technological processes of freight car maintenance due to the human factor;
- time of restoration of the workable state or organizational and technological processes of freight car maintenance after the influence of negative factors that arose as a result of the human factor;
- failure rate function of freight cars caused by negative events related to human factor (number of failures per unit time);
- failure rate function of freight cars, which occurred under the influence of the human factor (the rate of failure per t/km).

In this case, to control the human factor, it is necessary to consider and account the following indicators:

- the probability of negative event associated with human factor potentially capable of causing a freight car failure;
- the probability that in the freight car failure the human factor will not be detected;
- the probability of erroneous attribution of the freight car failure to the human factor cause;
- costs for restoration of the workable state of freight car after the failures that occurred under the influence of human factor.

Let us give one of the possible approaches to evaluating the above-mentioned indicators of the risks of potential freight car failures. We take the probability of occurrence of negative events (risks) and possible economic loss from their manifestation as indicators. By risk, we mean the events identified as probabilistic (stochastic) factors of negative influence on freight cars, causing violations of the maintenance process, reducing the reliability and durability of the structural elements of freight cars, traffic safety, financial and economic losses of the railway.

The probability of risks of freight car failures may serve as a criterion for quantifying additional financial costs for their elimination. In the first approximation of the zone of qualitative risks assessment one can take the generalized Harrington's desirability functions for the processes of freight car maintenance [12]. The Table 1 shows the interpretation of Harrington's desirability function for the case of application to freight cars.

Table 1

Scale ranges of risk assessment	
Desirability	Probability of risk
Unlikely critical risk	1.00–0.80
Expected minor risk	0.80–0.63
Expected moderate risk	0.63–0.37
Possible critical risk	0.37–0.20
Expected critical risk	0.20–0.00

The quantitative assessment of the risk of potential freight car failures is now hampered by the lack of information on the costs necessary for their

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

recovery. In the first stage, the assessment of economic losses can be determined expertly.

The maximum economic loss averaged by experts will be determined by the formula:

$$C_i = \sum_{j=1}^{R_{ij}} P_{ij} C_{ij}, \quad (3)$$

where i – is the certain number of freight car, $i = 1, 2, 3 \dots$; P_{ij} – the probability of potential risk for the i -th freight car; j – number of risk type, $j = 1, 2, 3 \dots$; C_{ij} – economic damage from the j -th number of the risk type for the i -th freight car.

We can also propose to assess the quality of indicator of the train traffic safety in the form of a coefficient, which will be determined by the ratio of the probability of freight car being in the working condition and the design probability of failure-free operation of freight car at the appropriate time interval [20]:

$$K_{DSI} = P_P / P_O, \quad (4)$$

where K_{DSI} – is the coefficient of decrease of traffic safety indicator (failure-free) P_O – is the design probability of failure-free operation of a freight car.

In addition, during maintenance and repair, one can enter an indicator characterizing compliance with the technology of carrying out maintenance work for freight cars taking into account the human factor:

$$T_M = \frac{P_{HF}}{n} \sum_{i=1}^n (1 - \frac{t_i}{t_{ki}}), \quad (5)$$

where t_i – is the number of violations of the work technology of the i -th maintenance of the freight car; t_{ki} – is the number of parameters and modes of technology, which is controlled during the works of i -th maintenance of freight car; n – is the number of maintenance of freight car.

Then, in order to compare the maintenance and repair of freight cars according to the available technology and technical state, it is possible to obtain an assessment as follows:

$$O_M = \frac{P_{HFexs}}{P_{HFtc}} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \frac{t_{iexs}}{t_{kitc}})}{(1 - \frac{t_{itc}}{t_{kitc}})}, \quad (6)$$

In the last expression, the indices *exs* and *tc* denote the existing maintenance and repair system and according to the technical state.

Then the coefficient (4), taking into account the expression (6), will have the following form:

$$K_{DSI} = \frac{P_P}{P_O} \frac{P_{HFexs}}{P_{HFtc}} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \frac{t_{iexs}}{t_{kitc}})}{(1 - \frac{t_{itc}}{t_{kitc}})}. \quad (7)$$

The obtained expression allows assessing the traffic safety level during the transition to the system of maintenance and repair of freight cars according to the technical state [10].

Findings

The available methods of forecasting the influence of the human factor during the analysis of the freight car reliability should include the following stages, which lie in [13, 14]:

- compilation of the lists of basic failures of freight car units;
- compilation of technology works for inspectors and mechanics, and similarly for other involved employees;
- estimating the frequency of human errors during the execution of technological operations;
- determining the effects of the frequency of human errors on the failure rate of the freight car units;
- developing recommendations and making the necessary changes in normative documentation.

The basic method, which takes into account the reliability of human work, can be set by constructing a probability tree (or results). The use of such a method involves some conditional probability associated with the successful or erroneous implementation of a particular technological operation by inspector or mechanic, or the probability associated with the occurrence of the relevant event. In this case, branches or links of the probability tree can represent the result of any event. It is possible to calculate the full probability of successful com-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

pletion of a certain task by summarizing certain probabilities that will be known for the end point of the path (in the case of a successful result) on the probability tree.

In this method, one can consider the factors with some refinements, for example: stress caused by lack of time; a load that determines the need for decision-making and its implementation in different non-standard situations; emotional load, etc.

It should be noted that the application of this method can provide a good visibility, and the mathematical calculations associated with it are quite simple, which also leads to a decrease in the probability of errors that can occur in this case.

In addition, the given method allows us to assess the conditional probability of performance of maintenance and repair work, which otherwise can only be obtained on the basis of solutions of complex equations of undefined nature.

We give an example related to the task performance by inspector or mechanic for the maintenance and repair of freight cars according to the available technology x and the technical state y . It is known that an inspector or mechanic can perform the task correctly or incorrectly. That is, the tasks performed incorrectly are errors that appear in a particular situation.

In this case, one can construct a tree of possible finals and reach the definition of the overall probability of improper performance of the set task. Then it is necessary to take statically independent probabilities of the task performance x , y as the basis.

In the tree of possible results, it is necessary to provide the following designations related to:

- probability of successful performance of the task (P_s);
- probability of non-performance of the task (P_f);
- successful performance of the task s ;
- non-performance of the set task f ;
- probability of successful performance of the set task x (P_x);
- probability of successful performance of the set task y (P_y);
- probability of non-performance of the set task x (P_{fx});
- probability of non-performance of the set task y (P_{fy}).

According to the tree of possible results, the probability of successful performance of the set task will be equal to: $P_s = P_x(P_y)$. Similarly, it is possible to find the probability of non-performance of the set task, which will have the following form: $P_f = 1 - P_x(P_y)$.

From the given formulas and the tree of possible solutions, one can conclude that the only way of successful performance of the complex maintenance and repair task is to perform successfully both tasks – the x and y . In addition, the above mentioned formulas show that for the probability of correct performance of the complex task there is a definition in the form $P_x(P_y)$.

The assessment of the work reliability, including the human factor (inspectors and mechanics), should be performed taking into account the factors associated with:

- the quality of teaching and practical training;
- the availability of quality instructions that exclude misinterpretation;
- the ergonomics of work stations;
- adequate work environment;
- the degree of independence of the actions of inspector or mechanic;
- psychological stresses.

It should be noted the need for human error databases to analyze and further forecast correctness of the maintenance and repair of freight cars with traffic safety compliance, as well as to prevent dangerous situations.

Such information bases are divided into categories:

- experimental data, including experimental results. However, despite the thoroughness of the formation of such databases, a subjectivity is inherent in them;
- operational data obtained in real operating conditions. Formation of such bases is difficult to implement, since registration of actions must be carried out in different conditions of freight cars` operation. Such databases are characterized by satisfactory results, better than the previous ones;
- subjective data based on expert assessments.

While creating such databases, one can do relatively small financial costs, and obtaining a large amount of information is possible from a small number of interviewed experts.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

To use subjective data in order to analyze the work reliability of inspector or mechanic one needs to bring into compliance:

- the required level of data accuracy;
- the reliability of expert assessments.

Subjective data should come from individuals who are highly skilled and able to cope with such work.

The main advantage of a database with subjective data is the multifaceted coverage of various parameters requiring availability of the information on errors.

We will construct a model of the situation development for the case of critical defect of the freight car unit taking into account the human factor, Fig. 4

At this, the types of technical states of freight cars are as follows:

- W – workable;
- LW – limited workable;
- U – unworkable;
- E – emergency;

P_1, P_2, P_3 – are the probabilities of the relevant events.

The developed model shows 3 possible states: workable and limited workable, unworkable and emergency. Each initial state is characterized by the development of events associated with designers' errors, with defects during manufacture of parts and units, with the human factor.

Then the border level of defect in the freight car unit q_0 , taking into account the human factor with the limiting of the risk of accident or transport event at the railway, can be determined as follows:

$$q_0 = \frac{P_r(A)}{[P_D P_{HF}(1 - P_d) + P_d P_{HF}(1 - P_D) + P_D P_d(1 - P_{HF})]}, \quad (8)$$

where $P_r(A)$ – is the probability of transition of design, a freight car unit or a technology into a failure state of different gradation.

In this case, the failure probability due to human factor, in the case of improper actions of inspector or mechanic for the maintenance and repair of freight cars, are determined by expression ($i = 1, n; j = 1, n; j \neq i$):

$$P_{OHF} = P_i \prod_{j=1}^n (1 - P_j), \quad (9)$$

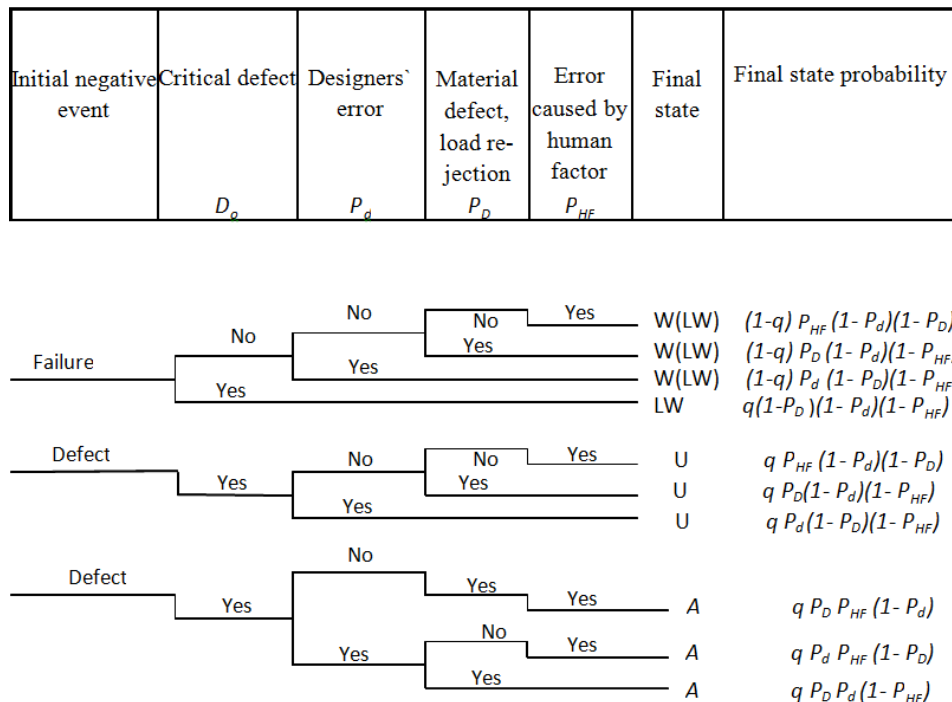


Fig. 4. Model of the situation development for the case of a critical defect of the freight car unit taking into account the human factor

Originality and practical value

The proposed value of the failure probability, which is related to the human factor, is considered as a certain share of the overall probability of failure of the system «man – freight car». For this purpose, the significance coefficient of the human factor that affects the freight car reliability during the maintenance is introduced. For a qualitative assessment of risks one can take an interpretation of the Harrington's desirability function for the processes of freight car maintenance.

During maintenance and repair, it is proposed to introduce an indicator characterizing compliance with the technology of performing maintenance works for freight cars taking into account the human factor.

According to the developed model of situation development for the case of a critical defect it is possible to determine the border level of deficiency of the freight car unit due to the human factor for limiting the risk of accident or traffic event.

Conclusions

The complexity of modern technical systems increases the probability of errors. The human factor is often interpreted and used during examination of the causes of accidents and transport events that have caused human losses or material damage. On the basis of the conducted research it is possible to estimate the influence of the human factor on the maintenance and repair of freight cars.

LISTR OF REFERENCE LINKS

1. Бабаєв, А. М. Візуальний контроль граничних зносів вузлів вагонів / А. М. Бабаєв, В. Ю. Шапошник // Заліз. трансп. України. – 2017. – № 2. – С. 32–38.
2. Барановський, Д. М. Визначення параметрів експлуатаційної надійності вантажних вагонів у системі технічного обслуговування та ремонту / Д. М. Барановський, Л. А. Мурадян // Заліз. трансп. України. – 2016. – № 5/6. – С. 47–52.
3. Капіца, М. І. Неруйнівні методи контролю стану ізоляції електричних машин та високовольтних силових кабелів / М. І. Капіца, Д. В. Бобир // Зб. наук. пр. Дон. ін-ту заліз. трансп. – Донецьк, 2007. – № 12. – С. 127–138.
4. Макаренко, Л. М. Вплив людського чинника на безпеку руху залізничного транспорту / Л. М. Макаренко // Заліз. трансп. України. – 2010. – № 1. – С. 46–51.
5. Мурадян, Л. А. Методологические основы определения эксплуатационных характеристик несамоходного подвижного состава / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, А. А. Мищенко // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 169–179. doi: 10.15802/stp2016/61044
6. Мурадян, Л. А. Побудова системи дослідження надійності вантажних вагонів / Л. А. Мурадян // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – № 10. – С. 90–95.
7. Мямлин, В. В. Теоретические основы создания гибких поточных производств для ремонта подвижного состава : монография / В. В. Мямлин. – Днепропетровск : Стандарт-Сервис, 2014. – 380 с.
8. Піх, Б. П. Надійність людського чинника як основа безпеки руху / Б. П. Піх, В. П. Думський // Медицина залізничного транспорту України. – 2004. – № 3. – С. 60–61.
9. Правила технічної експлуатації залізниць України : затв. 20.12.96 № 411 / М-во трансп. України. – Харків : Індустрія, 2007. – 117 с.
10. Проблеми існуючої системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів в Україні / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, А. М. Бабаєв, А. Л. Пуларія, В. Ю. Шапошник / Проблеми механіки залізничного транспорту. Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу та енергозбереження : тези доп. XIV Міжнар. конф. // Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Ін-т техн. мех. НАН України і нац. косміч. агентства України, НВП Укртранскад. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 89–91.
11. Сидоренко, Г. Г. Людський чинник як основа безпеки руху залізничного транспорту : аналітичний огляд / Г. Г. Сидоренко, О. А. Никифорова // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 6. – С. 86–89. doi: 10.15802/tst2013/24457
12. Харрингтон, Д. Управление качеством в американских корпорациях : [сокр. пер. с англ.] / Д. Харрингтон ; науч. ред. Л. А. Конярев. – Москва : Экономика, 1990. – 272 с.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

13. Человеческий фактор : [пер. с англ.] / Ж. Кристенсен, Д. Мейстер, П. Фоули [и др.] ; под ред. Г. Салвенди. – Москва : Мир, 1991. – Т. 1 : Эргономика – комплексная научно-техническая дисциплина. – 599 с.
14. Чернецкая, Н. Б. Влияние человеческого фактора на безопасность движения на железнодорожном транспорте / Н. Б. Чернецкая, Ю. А. Красникова, Л. Г. Волчок // Вісник Інженерної академії України. – 2010. – Вип. 3-4. – С. 168–172.
15. 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.
16. Britton, M. A. Analysis of train derailment cause and outcome in Victoria, Australia, between 2007 and 2013: Implications for regulation / Mark A. Britton, Shima Asnaashari, Gemma J. M. Read // Journal of Transportation Safety & Security. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 45–63. doi: 10.1080/19439962.2015.1088906
17. Černiauskaite, L. Research into safe traffic of Lithuanian railway lines / Laura Černiauskaite, Igoris Podagelis, Kazys Sakalauskas // Transport. – 2005. – Vol. 20 (4). – P. 154–159.
18. Marković, M. Fuzzy renewal theory about forecasting mistakes done by a locomotive driver: a Serbian railway case study / Milan Marković, Norbert Pavlović, Miloš Ivić // Transport. – 2011. – Vol. 26. – Iss. 4. – P. 403–409. doi: 10.3846/16484142.2011.641183
19. Roets, B. Shift work, fatigue, and human error: An empirical analysis of railway traffic control / Bart Roets, Johan Christiaens // Journal of Transportation Safety & Security. – 2017. doi: 10.1080/19439962.2017.1376022
20. Shaposhnyk, V. Y. Theoretical studies on the process of change of the technical condition of freight cars in operation / V. Y. Shaposhnyk // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 4 (76). – С. 134–141. doi: 10.15802/stp2018/140782

В. Ю. ШАПОШНИК^{1*}

^{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 vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-649

ВПЛИВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА НА ВИКОНАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Мета. У науковій роботі необхідно: 1) дослідити показники й критерії оцінки врахування впливу людського фактора на безвідмовність вантажних вагонів; 2) теоретично описати ймовірнісну модель ролі людського фактора під час виконання технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів за технічним станом; 3) розглянути модель розвитку ситуації для випадку критичного дефекту вузла вантажного вагона з урахуванням людського фактора. **Методика.** Для досягнення поставленої мети дослідження були розглянуті методологічні підходи: 1) до оцінки показників надійності в системі «людина – вантажний вагон» під час виконання технічного обслуговування й ремонту; 2) до оцінки рівня безпеки руху в разі переходу з наявної системи технічного обслуговування й ремонту вантажних вагонів на систему за технічним станом. Описана модель розвитку ситуації для випадку критичного дефекту вузла вантажного вагона з урахуванням людського фактора. **Результати.** Наведено підхід до оцінки показників ризиків потенційних відмов вантажних вагонів. За показники взято ймовірність появи негативних подій (ризиків) і можливий економічний збиток від їх прояву. У розробленій моделі розвитку ситуації для випадку критичного дефекту вузла вантажного вагона з урахуванням людського фактора показано три можливі стани: працездатний та обмежено працездатний, непрацездатний і аварійний. Для кожного вихідного стану характерний розвиток подій, що пов'язаний із помилками проектувальників, із дефектами під час виготовлення деталей та вузлів, із людським фактором. **Наукова новизна.** Запропоновано величину ймовірності відмов, що пов'язана з людським фактором, розглядати як певну частку загальної ймовірності відмов системи «людина – вантажний вагон». Наведена інтерпретація функції бажаності Харрінгтона для випадку застосування до вантажних вагонів. Під час проведення технічного обслуговування й ремонту запропоновано ввести показник, що характеризує дотримання технології використання робіт із технічного обслуговування вантажних вагонів з урахуванням людського фактора. **Практична значимість.** На основі проведеного дослідження можна оцінити вплив

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

людського фактора на виконання технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів. За розробленою моделлю розвитку ситуації для випадку критичного дефекту можна визначити граничний рівень дефектності вузла вантажного вагона з урахуванням людського фактора для обмеження ризику аварії чи транспортної події.

Ключові слова: вантажний вагон; надійність; людський фактор; критичний дефект; технічне обслуговування; ремонт

В. Ю. ШАПОШНИК^{1*}

^{1*}Каф. «Вагони и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта vladislav.sh91@gmail.com, ORCID 0000-0003-4701-6491

ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ВЫПОЛНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Цель. В научной работе необходимо: 1) исследовать показатели и критерии оценки учета влияния человеческого фактора на безотказность грузовых вагонов; 2) теоретически описать вероятностную модель роли человеческого фактора при выполнении технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов по техническому состоянию; 3) рассмотреть модель развития ситуации для случая критического дефекта узла грузового вагона с учетом человеческого фактора. **Методика.** Для достижения поставленной цели исследования были рассмотрены методологические подходы: 1) к оценке показателей надежности в системе «человек – грузовой вагон» при выполнении технического обслуживания и ремонта; 2) к оценке уровня безопасности движения при переходе от действующей системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов на систему по техническому состоянию. Описана модель развития ситуации для случая критического дефекта узла грузового вагона с учетом человеческого фактора. **Результаты.** Приведен подход к оценке показателей рисков потенциальных отказов грузовых вагонов. В качестве показателей приняты вероятность появления негативных событий (рисков) и возможный экономический ущерб от их проявления. В разработанной модели развития ситуации для случая критического дефекта узла грузового вагона с учетом человеческого фактора показаны три возможных состояния: работоспособное и ограничено работоспособное, неработоспособное и аварийное. Для каждого исходного состояния характерно развитие событий, связанное с ошибками проектировщиков, с дефектами при изготовлении деталей и узлов, с человеческим фактором. **Научная новизна.** Предложено величину вероятности отказов, связанных с человеческим фактором, рассматривать как определенную долю общей вероятности отказов системы «человек – грузовой вагон». Приведена интерпретация функции желательности Харрингтона для случая применения к грузовым вагонам. При проведении технического обслуживания и ремонта предложено ввести показатель, характеризующий соблюдение технологии проведения работ по техническому обслуживанию грузовых вагонов с учетом человеческого фактора. **Практическая значимость.** На основании проведенного исследования можно оценить влияние человеческого фактора на выполнение технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов. По разработанной модели развития ситуации для случая критического дефекта можно определить предельный уровень дефектности узла грузового вагона с учетом человеческого фактора для ограничения риска аварии или транспортного происшествия.

Ключевые слова: грузовой вагон; надежность; человеческий фактор; критический дефект; техническое обслуживание; ремонт

REFERENCES

1. Babaiev, A. M., & Shaposhnyk, V. Y. (2017). Vizualnyi kontrol hranychnykh znosiv vuzliv vahoniv. *Zaliznychnyj transport Ukrainy*, 2, 32-38. (in Ukrainian)
2. Kapitsa, M. I., & Bobyr, D. V. (2007). Neruinivni metody kontroliu stanu izoliatsii elektrychnykh mashyn ta vysokovoltnykh sylovykh kabeliv. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu*, 12, 127-138. (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Makarenko, L. M. (2010). Vplyv liudskoho chynnyka na bezpeku rukhu zaliznychnoho transportu. *Zaliznychnyj transport Ukrainy*, 1, 46-51. (in Ukrainian)
4. Baranovskyi, D. M., & Muradian, L. A. (2016). Vyznachennia parametriv ekspluatatsiinoi nadiinosti vantazhnykh vahoniv u systemi tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu. *Zaliznychnyj transport Ukrainy*, 5/6, 47-52. (in Ukrainian)
5. Muradian, L. A., Shaposhnyk, V. Y., & Mischenko, A. A. (2016). Methodological Fundamentals of Determination of Unpowered Rolling Stock Maintenance Characteristics. *Science and Transport Progress*, 1(61), 169-179. doi: 10.15802/stp2016/6104 (in Russian)
6. Muradian, L. A. (2015). Pobudova systemy doslidzhennia nadiinosti vantazhnykh vahoniv. *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, 10, 90-95. (in Ukrainian)
7. Myamlin, V. V. (2014). Teoreticheskie osnovy sozdaniya gibkikh potochnykh proizvodstv dlya remonta podvizhnogo sostava: monografiya. Dnepropetrovsk: Standart-Servis. (in Russian)
8. Pikh, B. P., & Dums'kyi, V. P. (2004). The reliability of the human element as the basis of train driving safety. *Medytsyna zaliznychnoho transportu Ukrainy*, 3, 60-61. (in Ukrainian)
9. *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii zaliznyts Ukrainy*. (2007). Kharkiv: Industriia. (in Ukrainian)
10. Miamlin, S. V., Muradian, L. A., Babaiev, A. M., Pulariia, A. L., & Shaposhnyk, V. Y. (2016). Problemy isnuiuchoi systemy tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu vantazhnykh vahoniv v Ukraini. *Problemy mekhaniky zaliznychnoho transportu. Bezpeka rukhu, dynamika, mitsnist rukhomoho skladu ta enerhozhberzhennia: tezy dopovidei KhIV Mizhnarodnoi konferentsii*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Ukrainian)
11. Sydorenko, H. H., & Nykyforova, O. A. (2013). The Human Factor as a Basis for Traffic Safety Railway Transport: Analytical Review. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 0(6), 86-89. doi: 10.15802/tst2013/24457 (in Ukrainian)
12. Kharrington, D. (1990). *Upravlenie kachestvom v amerikanskikh korporatsiyakh*. Moscow: Ekonomika. (in Russian)
13. Kristensen, Zh., Meyster, D., Fouli, P., & Salvendi, G. (Ed). *Chelovecheskiy faktor*. (Vol. 1). Moscow: Mir. (in Russian)
14. Chernetskaya, N. B., Krasnikova, Y. A., & Volchok, L. G. (2010). Vliyanie chelovecheskogo faktora na bezopasnost dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte. *Bulletin of Engineering Academy of Ukraine*, 3-4, 168-172. (in Russian)
15. 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)
16. Černiauskaite, L., Podagelis, I., & Sakalauskas, K. (2005). Research into safe traffic of Lithuanian railway lines. *Transport*, 20(4), 154-159. (in English)
17. Britton, M. A., Asnaashari, S., & Read, G. J. M. (2016). Analysis of train derailment cause and outcome in Victoria, Australia, between 2007 and 2013: Implications for regulation. *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(1), 45-63. doi: 10.1080/19439962.2015.1088906 (in English)
18. Marković, M., Pavlović, N., & Ivić, M. (2012). Fuzzy Renewal Theory About Forecasting Mistakes Done by a Locomotive Driver: a Serbian Railway Case Study. *Transport*, 26(4), 403-409. doi: 10.3846/16484142.2011.641183 (in English)
19. Roets, B., & Christiaens, J. (2017). Shift work, fatigue, and human error: An empirical analysis of railway traffic control. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1-18. doi: 10.1080/19439962.2017.1376022 (in English)
20. Shaposhnyk, V. Y. (2018). Theoretical studies on the process of change of the technical condition of freight cars in operation. *Science and Transport Progress*, 4(76), 134-141. doi: 10.15802/stp2018/140782 (in English)

Received: August 06, 2018

Accepted: Nov. 15, 2018

Тематичний показчик журналу «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна» за 2018 рік

Назва статті	№ журналу	Стор.
Наука та прогрес транспорту		
Розподіл транспортних подій на залізницях України за категоріями залежно від тяжкості наслідків <i>О. М. Огар, О. В. Розсоха, Г. В. Шаповал, Ю. В. Смачило</i>	3	7
Спогади про наукову школу академіка В. А. Лазаряна <i>М. І. Казакевич</i>	6	8
Автоматизовані системи управління на транспорті		
Метод планування недетермінованих процесів експлуатації парків залізничних технічних систем <i>В. В. Скалозуб, І. В. Клименко</i>	5	7
Імітаційна модель для оцінки пропускної спроможності залізниці <i>В. І. Бобровський, Р. Г. Коробйова, В. О. Баланов</i>	6	16
Екологія на транспорті		
Розрахунок територіального ризику під час теракту: експрес модель <i>М. М. Біляєв, І. В. Калашніков, В. А. Козачина</i>	1	7
Моделювання біологічної обробки стічної води на основі швидкодіючої чисельної моделі <i>М. М. Біляєв, М. В. Лемеш</i>	1	15
Перегородчастий змішувач коридорного типу з поперечними пористими перегородками <i>С. М. Епоян, В. А. Яркін, Г. І. Сухоруков, С. П. Бабенко</i>	1	24
Модель координації взаємодії органів управління при ліквідації великомасштабних надзвичайних ситуацій <i>О. М. Ляшенко</i>	1	33
Очищення стоків промислових підприємств природними металами <i>Л. Ф. Долина, Т. П. Решетняк</i>	2	7
3d чисельна модель для оцінки територіального ризику при теракті <i>М. М. Біляєв, І. В. Калашніков, І. В. Кліменко, В. А. Козачина</i>	3	20
Оцінка надзвичайних подій під час перевезення небезпечних вантажів у контексті техногенного навантаження регіонів <i>Ю. В. Буц, О. В. Крайнюк, Д. С. Козодой, В. В. Барбашин</i>	3	27
Очищення вод від залишків лікарських препаратів <i>Л. Ф. Долина, О. П. Савіна</i>	3	36
Математичне моделювання наслідків випаровування аварійного пролиття токсичних речовин на залізничному транспорті <i>Ю. О. Скоб, М. Л. Угрюмов</i>	3	52
Визначення меж поясу безпеки при терактах із використанням хімічних агентів <i>М. М. Біляєв, І. В. Калашніков, В. А. Козачина</i>	4	7
Термічна обробка твердих відходів, що утворюються на залізничному транспорті <i>О. П. Крот, О. І. Ровенський, В. В. Конєв</i>	4	15
Оцінка впливу залізничного транспорту на накопичення важких металів у ґрунта <i>А. В. Самарська, Ю. В. Зеленько</i>	4	25
Розрахунок зони «уразливості» об'єкта за можливого теракту із застосуванням хімічного агента <i>М. М. Біляєв, О. В. Берлов, І. В. Калашніков, В. А. Козачина</i>	5	19

Назва статті	№ журналу	Стор.
Антитерористичний інжиніринг при можливому теракті з використанням хімічного агента на вулиці <i>М. М. Біляєв, О. В. Берлов, І. В. Калашніков, В. А. Козачина</i>	6	28
Економіка та управління		
Підвищення рентабельності підприємства галузі автомобільних перевезень за напрямками комерційної діяльності <i>І. Г. Аберніхіна, Н. В. Валенюк, Г. О. Суботіна</i>	2	18
Аналітичне забезпечення фінансового аналізу на залізничному транспорті <i>О. А. Топоркова, Л. А. Шило</i>	2	31
Особливості формування фінансових ресурсів пат «українська залізниця» <i>І. М. Ломтєва, М. П. Сначов, О. А. Топоркова, Л. А. Шило</i>	3	67
Оптимізація постачально-збутової діяльності підприємства шляхом застосування логістичних принципів <i>О. А. Ходоскіна, В. Д. Анасович</i>	6	37
Експлуатація та ремонт засобів транспорту		
Удосконалення систем життєзабезпечення пасажирського рухомого складу: огляд патентів <i>С. Р. Колесников</i>	1	44
Математична модель вагона дизель-поїзда ДПКр-2 <i>С. А. Костриця, Ю. Г. Соболевська, А. Я. Кузишин, А. В. Батіг</i>	1	56
Визначення характеристик дроселюючого пристрою для пневматичної ресори <i>О. Г. Рейдемейстер, А. В. Лагуза</i>	1	66
Розподіл рухомого складу для відстою між шляхами загального та незагального користування <i>І. О. Єловий, Є. М. Потилкін</i>	2	44
Пропозиції щодо удосконалення процесу формування програм із реформування галузі залізничного транспорту <i>А. М. Окороков, М. О. Булах</i>	2	57
Особливості організації аварійно-відновлювальних робіт під час надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті <i>В. Г. Лоза</i>	4	36
Моделювання організації ремонту локомотивів методами теорії систем масового обслуговування <i>Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Є. Б. Боднар, Т. С. Гришечкина, М. В. Очеретнюк</i>	5	28
Вибір системи утримання локомотивів із урахуванням впливу залежних відмов <i>Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Т. С. Гришечкіна, Є. Б. Боднар</i>	6	47
Удосконалення диспетчерського регулювання руху поїздів за допомогою введення оперативних зон <i>Г. І. Нестеренко, П. В. Бех, М. І. Музикін, С. І. Авраменко</i>	6	59
Оцінка якості доставки вантажів за допомогою коефіцієнта відхилення часу прибуття поїзда <i>Б. О. Цейко</i>	6	71
Електричний транспорт		
Перспективна транспортно-енергетична система на основі інтеграції магнітолевітаційної технології та розподіленої фотоелектричної електростанції <i>В. О. Дзензерський, О. Б. Гниленко, С. В. Плаксін, Л. М. Погоріла, Ю. В. Шкіль</i>	1	77
Ідентифікація параметрів пристроїв систем електричної тяги методом часових рядів <i>Т. М. Міщенко</i>	2	67

Назва статті	№ журналу	Стор.
Фізико-технологічні аспекти роботи змащувальних шарів у трибосистемі «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» <i>Д. В. Устименко</i>	3	78
Методологія визначення параметрів відмов тягових електричних двигунів під час експлуатації тролейбусів <i>Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, В. І. Скуріхін, Н. П. Лукашова</i>	4	47
Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів <i>М. Г. Притула, О. А. Пасечник</i>	6	82
Залізнична колія		
Дослідження параметрів залізничної колії у плані за різними методами зйомки <i>М. Б. Курган, Д. М. Курган, С. Ю. Байдак, Н. П. Хмелевська</i>	2	77
Спеціальний метод лабораторних випробувань для оцінки руйнування часток матеріалу залізничного баласту <i>С. Фішер, А. Немес</i>	2	87
Спеціальний метод оцінки руйнування часток залізничного баласту на основі унікального лабораторного випробування <i>С. Фішер, А. Немес, Д. Харрач, Е. Юхас</i>	3	87
Урахування неоднорідності земляного полотна залізничної колії при визначенні його напружено-деформованого стану <i>Л. П. Теліпко, Л. М. Мамаєв, С. В. Ракша</i>	6	101
Матеріалознавство		
Підвищення об'ємної твердості сталевих молоткових куль використанням q-p-р термічної обробки <i>В. І. Зурнаджи, В. Г. Єфременко, Є. В. Дунаєв, А. Лекату, Р. О. Кусса</i>	2	103
Методика визначення технологічних характеристик процесу зварювання тертям із перемішуванням <i>С. О. Плітченко</i>	3	95
Вплив полімерної основи на властивості гумоволокнистих композитів <i>І. В. Маркова</i>	6	118
Моделювання задач транспорту та економіки		
Дослідження раціональних характеристик каналів передачі даних інформаційно-вимірювальної системи <i>І. А. Ключиник</i>	1	87
Виявлення загроз у комп'ютерній мережі на основі багатошарової нейронної мережі <i>І. В. Жуковицький, В. М. Пахомова</i>	2	114
Дослідження граничних часових показників програмних середовищ операційних систем реального часу <i>В. Я. Нечай, Д. О. Волошин, О. І. Нежуміра</i>	3	105
Реалізація динамічних, конкурентних і нечітких моделей планування багатопродуктових потоків у транспортних мережах <i>В. В. Скалозуб, Л. О. Панік</i>	3	113
Оптимальне структурне резервування технічних систем <i>С. М. Семенець, С. С. Насонова, Г. І. Семенець</i>	4	60
Інтелектуальне управління сортувальними станціями при перевезеннях небезпечних вантажів на основі багатоцільової оптимізації <i>Т. В. Бутько, В. М. Прохоров, Д. М. Чехунов</i>	5	41
Синергетичний підхід до розрахунку плану формування однокрупових поїздів <i>В. Я. Негрей, К. М. Шкурін</i>	5	53

Назва статті	№ журналу	Стор.
Визначення оптимального маршруту в комп'ютерній мережі засобами багаточислової нейронної моделі <i>В. М. Пахомова, І. Д. Цикало</i>	6	126
Нетрадиційні види транспорту. Машини та механізми		
Використання будівельно-орієнтованого ПК SCAD для аналізу роботи машинобудівних конструкцій <i>Д. О. Банніков</i>	1	98
Вплив опору коченню на динаміку механізмів підйому транспортуючих машин <i>В. М. Богомаз, Л. М. Бондаренко, О. В. Богомаз, М. Г. Брильова</i>	2	124
Нестационарні режими роботи головного привода карусельного верстата для обробки суцільнокатаних залізничних коліс <i>Р. П. Погребняк</i>	3	128
Удосконалення механічної системи електродотримача для зменшення вібрації електрода <i>А. О. Власов, С. В. Зданевич</i>	4	68
Повторювані зв'язки у схемах стрижневого повзунно-шатунного механізму захоплювального пристрою <i>Р. П. Погребняк</i>	4	81
Визначення варіюваних конструктивних параметрів зрівноважувальних пристроїв порталних кранів <i>В. В. Суглобов, С. В. Ракша, К. В. Ткачук</i>	4	89
Структурний аналіз і раціональне проектування механізмів косовалкових трубоправильних машин <i>С. С. Зданевич, Р. П. Погребняк, С. В. Зданевич</i>	5	65
Способи завдання граничних умов і геометрії гребного гвинта у flow vision <i>О. М. Корнелюк</i>	5	74
Моделювання проявів людського фактора у команди морського транспортного засобу <i>П. С. Носов, І. В. Паламарчук, М. С. Сафонов, В. І. Новиков</i>	5	82
Промисловий транспорт		
Евристичний метод відбору суден для узгодженої роботи водного транспорту <i>О. В. Щербина, О. Г. Шибаєв</i>	1	112
Рухомий склад і тяга поїздів		
Математична модель нестационарного теплообміну пасажирського вагона з системою опалення <i>Е. В. Білошицький</i>	1	121
Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей хребтової балки вантажного вагона <i>Л. О. Недужа, А. О. Швець</i>	1	131
Структурно-функціональне описання конструкції кришки люка <i>О. В. Фомін, М. І. Горбунов, Н. С. Кочешкова, В. В. Коваленко</i>	2	133
Комплексний розрахунок виконання кришки люка напіввагона з різнотипних матеріалів із проміжним ш-подібним об'язуванням <i>М. І. Горбунов, О. В. Фомін, А. О. Ловська, В. В. Коваленко</i>	3	138
Дослідження причин передчасного руйнування колінчастого вала тепловоза 2ТЕ116 <i>В. Л. Горобець, В. В. Коваленко</i>	4	101
Ефективність модернізації колісно-моторних блоків тепловоза з використанням моторно-осьових підшипників кочення <i>М. І. Капіца, О. М. Гненний, Д. В. Бобир</i>	4	111

Назва статті	№ журналу	Стор.
Чутливість напружень до сил, що діють на литі деталі візків вантажних вагонів <i>О. Г. Рейдемейстер, О. А. Шикун</i>	4	125
Теоретичні дослідження процесу зміни технічного стану вантажних вагонів під час експлуатації <i>В. Ю. Шапошник</i>	4	134
Стійкість руху залізничних екіпажів, що описують рівняння Лагранжа I роду <i>О. Г. Рейдемейстер, С. І. Левицька</i>	5	93
Дослідження поведінки механічної частини локомотива <i>В. А. Татарінова, Я. Калівода, Л. О. Недужа</i>	5	104
Вплив поздовжнього та поперечного зміщення центру ваги вантажу в піввагонах на їх динамічні показники <i>А. О. Швець</i>	5	115
Формалізація процесу розподілу рухомого складу з використанням динамічної моделі <i>Д. В. Ломотько, Д. В. Арсененко, Н. А. Носко, О. В. Ковальова</i>	6	143
Теоретично-практичний базис правки деформованих вагоноконструкцій термічним впливом <i>О. В. Фомін, О. А. Логвіненко, О. В. Бурлуцький, А. М. Фоміна</i>	6	155
Вплив людського фактора на виконання технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів <i>В. Ю. Шапошник</i>	6	165
Транспортне будівництво		
Рациональна висотна споруда для розміщення вітрового обладнання в умовах України <i>Р. А. Савченко, Д. О. Банніков, І. І. Кирпа</i>	2	147
Особливості формування експлуатаційних властивостей модифікованого бетону для споруд спеціального призначення <i>Д. В. Руденко</i>	5	129
Події		
Інженер третього тисячоліття <i>А. В. Безруков</i>	3	149

Тематический указатель журнала «Наука та прогрес транспорту».
Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна» за 2018 год

Название статьи	Номер журн.	Стр.
Наука и прогресс транспорта		
Распределение транспортных происшествий на железных дорогах Украины по категориям в зависимости от тяжести последствий <i>А. Н. Огар, А. В. Розсоха, А. В. Шаповал, Ю. В. Смачило</i>	3	7
Воспоминания о научной школе академика В. А. Лазаряна <i>М. И. Казакевич</i>	6	8
Автоматизированные системы управления на транспорте		
Метод планирования недетерминированных процессов эксплуатации парка железнодорожных технических систем <i>В. В. Скалозуб, И. В. Клименко</i>	5	7
Имитационная модель для оценки пропускной способности железных дорог <i>В. И. Бобровский, Р. Г. Коробьева, В. О. Баланов</i>	6	16
Экология на транспорте		
Расчет территориального риска при теракте: экспресс модель <i>Н. Н. Беляев, И. В. Калашиников, В. А. Козачина</i>	1	7
Моделирование биологической обработки сточной воды на основе быстродействующей численной модели <i>Н. Н. Беляев, М. В. Лемеш</i>	1	15
Перегородчатый смеситель коридорного типа с поперечными пористыми перегородками <i>С. М. Эпоян, В. А. Яркин, Г. И. Сухоруков, С. П. Бабенко</i>	1	24
Модель координации взаимодействия органов управления при ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций <i>Е. Н. Ляшенко</i>	1	33
Очистка сточных вод промышленных предприятий природными металлами <i>Л. Ф. Долина, Т. П. Решетняк</i>	2	7
3d численная модель для оценки территориального риска при теракте <i>Н. Н. Беляев, И. В. Калашиников, И. В. Клименко, В. А. Козачина</i>	3	20
Оценка чрезвычайных событий при перевозке опасных грузов в контексте техногенной нагрузки регионов <i>Ю. В. Буц, Е. В. Крайнюк, Д. С. Козодой, В. В. Барбашин</i>	3	27
Очистка вод от остатков лекарственных препаратов <i>Л. Ф. Долина, О. П. Савина</i>	3	36
Математическое моделирование последствий испарения аварийного пролива токсичного вещества на железнодорожном транспорте <i>Ю. А. Скоб, М. Л. Угрюмов</i>	3	52
Определение границ пояса безопасности при терактах с применением химических агентов <i>Н. Н. Беляев, И. В. Калашиников, В. А. Козачина</i>	4	7
Термическая обработка твердых отходов, образовавшихся на железнодорожном транспорте <i>О. П. Крот, А. И. Ровенский, В. В. Конев</i>	4	15
Оценка влияния железнодорожного транспорта на накопление тяжелых металлов в грунтах <i>А. В. Самарская, Ю. В. Зеленко</i>	4	25

Название статьи	Номер журн.	Стр.
Расчет зоны «уязвимости» объекта при возможном теракте с применением химического агента <i>Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, И. В. Калашников, В. А. Козачина</i>	5	19
Антитеррористический инжиниринг при возможном теракте с применением химического агента на улице <i>Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, И. В. Калашников, В. А. Козачина</i>	6	28
Экономика и управление		
Повышение рентабельности предприятия отрасли автомобильных перевозок по направлениям коммерческой деятельности <i>И. Г. Абернихина, Н. В. Валенюк, А. А. Субботина</i>	2	18
Аналитическое обеспечение финансового анализа на железнодорожном транспорте <i>Е. А. Топоркова, Л. А. Шило</i>	2	31
Особенности формирования финансовых ресурсов пао «украинская железная дорога» <i>И. Н. Ломтева, Н. П. Сначев, Е. А. Топоркова, Л. А. Шило</i>	3	67
Оптимизация снабженческо-сбытовой деятельности предприятия путем применения логистических принципов <i>О. А. Ходоскина, В. Д. Анасович</i>	6	37
Эксплуатация и ремонт средств транспорта		
Усовершенствование систем жизнеобеспечения пассажирского подвижного состава: обзор патентов <i>С. Р. Колесников</i>	1	44
Математическая модель вагона дизель-поезда дпкр-2 <i>С. А. Кострица, Ю. Г. Соболевская, А. Я. Кузышин, А. В. Батиг</i>	1	56
Определение характеристик дросселирующего устройства для пневматической рессоры <i>А. Г. Рейдемейстер, А. В. Лагуза</i>	1	66
Распределение подвижного состава для отстоя между путями общего и необщего пользования <i>И. А. Еловой, Е. Н. Потылкин</i>	2	44
Предложения по совершенствованию процесса формирования программ реформирования отрасли железнодорожного транспорта <i>А. М. Окороков, М. А. Булах</i>	2	57
Особенности организации проведения аварийно- восстановительных работ в чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте <i>В. Г. Лоза</i>	4	36
Моделирование организации ремонта локомотивов методами теории систем массового обслуживания <i>Б. Е. Боднарь, А. Б. Очкасов, Е. Б. Боднарь, Т. С. Гришечкина, М. В. Очеретнюк</i>	5	28
Выбор системы содержания локомотивов с учетом влияния зависимых отказов <i>Б. Е. Боднарь, А. Б. Очкасов, Т. С. Гришечкина, Е. Б. Боднарь</i>	6	47
Усовершенствование диспетчерского регулирования движения поездов с помощью введения оперативных зон <i>Г. И. Нестеренко, П. В. Бех, М. И. Музыкин, С. И. Авраменко</i>	6	59
Оценка качества доставки грузов с помощью коэффициента отклонения времени прибытия поезда <i>Б. А. Цейко</i>	6	71

Название статьи	Номер журн.	Стр.
Электрический транспорт		
Перспективная транспортно-энергетическая система на основе интеграции магнитолевитационной технологии и распределенной фотоэлектрической электростанции <i>В. А. Дзензерский, А. Б. Гниленко, С. В. Плаксин, Л. М. Погорелая, Ю. В. Шкиль</i>	1	77
Идентификация параметров устройств систем электрической тяги методом временных рядов <i>Т. Н. Мищенко</i>	2	67
Физико-технологические аспекты работы смазочных слоев в трибосистеме «контактный провод – контактная вставка токоприемника» <i>Д. В. Устименко</i>	3	78
Методология определения параметров отказов тяговых электрических двигателей при эксплуатации троллейбусов <i>Т. П. Павленко, В. М. Шавкун, В. И. Скурихин, Н. П. Лукашова</i>	4	47
Разработка алгоритмов формирования энергооптимальных режимов движения поездов <i>М. Г. Притула, А. А. Пасечник</i>	6	82
Железнодорожный путь		
Исследование параметров железнодорожного пути в плане на основе разных методов съемки <i>Н. Б. Курган, Д. Н. Курган, С. Ю. Байдак, Н. П. Хмелевская</i>	2	77
Специальный метод лабораторных испытаний для оценки разрушения частиц материала железнодорожного балласта <i>С. Фишер, А. Немес</i>	2	87
Специальный метод оценки разрушения частиц железнодорожного балласта на основе уникального лабораторного испытания <i>С. Фишер, А. Немес, Д. Харрач, Е. Юхас</i>	3	87
Учет неоднородности земляного полотна железнодорожного пути при определении его напряженно-деформированного состояния <i>Л. П. Телипко, Л. М. Мамаев, С. В. Ракша</i>	6	101
Материаловедение		
Повышение объемной твердости стальных мелющих шаров применением q-p-р термической обработки <i>В. И. Зурнаджи, В. Г. Ефременко, Е. В. Дунаев, А. Лекату, Р. А. Кусса</i>	2	103
Методика определения технологических характеристик процесса сварки трением с перемешиванием <i>С. А. Плитченко</i>	3	95
Влияние полимерной основы на свойства резиноволокнистых композитов <i>И. В. Маркова</i>	6	118
Моделирование задач транспорта и экономики		
Исследование рациональных характеристик каналов передачи данных информационно-измерительной системы <i>И. А. Ключник</i>	1	87
Выявление угроз в компьютерной сети на основе многослойной нейронной сети <i>И. В. Жуковицкий, В. Н. Пахомова</i>	2	114
Исследование предельных временных показателей программных сред операционных систем реального времени <i>В. Я. Нечай, Д. А. Волошин, А. И. Нежумира</i>	3	105
Реализация динамических, конкурентных и нечетких моделей планирования многопродуктовых потоков в транспортных сетях <i>В. В. Скалозуб, Л. А. Паник</i>	3	113

Название статьи	Номер журн.	Стр.
Оптимальное структурное резервирование технических систем <i>С. Н. Семенец, С. С. Насонова, Г. И. Семенец</i>	4	60
Интеллектуальное управление сортировочными станциями при перевозках опасных грузов на основе многоцелевой оптимизации <i>Т. В. Бутько, В. Н. Прохоров, Д. Н. Чехунов</i>	5	41
Синергетический подход к расчету плана формирования одногруппных поездов <i>В. Я. Негрей, К. М. Шкурин</i>	5	53
Определение оптимального маршрута в компьютерной сети средствами многослойной нейронной модели <i>В. Н. Пахомова, И. Д. Цыкало</i>	6	126
Нетрадиционные виды транспорта.		
Машины и механизмы		
Использование строительно-ориентированного ПК SCAD для анализа работы машиностроительных конструкций <i>Д. О. Банников</i>	1	98
Влияние сопротивлений качению на динамику механизмов подъема транспортирующих машин <i>В. М. Богомаз, Л. Н. Бондаренко, О. В. Богомаз, М. Г. Брылёва</i>	2	124
Нестационарные режимы работы главного привода карусельного станка для обработки цельнокатаных железнодорожных колес <i>Р. П. Погребняк</i>	3	128
Совершенствование механической системы электрододержателя для уменьшения вибрации электрода <i>А. А. Власов, С. В. Зданевич</i>	4	68
Повторяющиеся связи в схемах стержневого ползунно-шатунного механизма захватывающего устройства <i>Р. П. Погребняк</i>	4	81
Определение варьируемых конструктивных параметров равновешивающих устройств порталных кранов <i>В. В. Суглобов, С. В. Ракиша, Е. В. Ткачук</i>	4	89
Структурный анализ и рациональное проектирование механизмов косовалковых трубоправильных машин <i>С. С. Зданевич, Р. П. Погребняк, С. В. Зданевич</i>	5	65
Способы задания граничных условий и геометрии гребного винта в Flow Vision <i>О. Н. Корнелюк</i>	5	74
Моделирование проявлений человеческого фактора у команды морского транспортного средства <i>П. С. Носов, И. В. Паламарчук, М. С. Сафонов, В. И. Новиков</i>	5	82
Промышленный транспорт		
Эвристический метод отбора судов для согласованной работы водного транспорта <i>О. В. Щербина, А. Г. Шибяев</i>	1	112
Подвижной состав железных дорог и тяга поездов		
Математическая модель нестационарного теплообмена пассажирских вагонов с системой отопления <i>Э. В. Белошицкий</i>	1	121
Теоретические и экспериментальные исследования прочностных качеств хребтовой балки грузового вагона <i>Л. А. Недужая, А. А. Швец</i>	1	131
Структурно-функциональное описание конструкции крышки люка <i>А. В. Фомин, Н. И. Горбунов, Н. С. Кочешкова, В. В. Коваленко</i>	2	133

Название статьи	Номер журн.	Стр.
Комплексный расчет выполнения крышки люка полувагона из разнотипных материалов с промежуточной ш-образной обвязкой <i>Н. И. Горбунов, А. В. Фомин, А. А. Ловская, В. В. Коваленко</i>	3	138
Исследование причин преждевременного разрушения коленчатого вала тепловоза 2ТЭ116 <i>В. Л. Горобец, В. В. Коваленко</i>	4	101
Эффективность модернизации колесно-моторных блоков тепловоза с применением моторно-осевых подшипников качения <i>М. И. Капица, О. Н. Гненный, Д. В. Бобырь</i>	4	111
Чувствительность напряжений к силам, действующим на литые детали тележек грузовых вагонов <i>А. Г. Рейдемейстер, А. А. Шикун</i>	4	125
Теоретические исследования процесса изменения технического состояния грузовых вагонов при эксплуатации <i>В. Ю. Шапошник</i>	4	134
Устойчивость движения железнодорожных экипажей, описываемого уравнениями Лагранжа I рода <i>А. Г. Рейдемейстер, С. И. Левицкая</i>	5	93
Исследование поведения механической части локомотива <i>В. А. Татарина, Я. Каливода, Л. А. Недужая</i>	5	104
Влияние продольного и поперечного смещения центра тяжести груза в полувагонах на их динамические показатели <i>А. А. Швец</i>	5	115
Формализация процесса распределения подвижного состава с использованием динамических моделей <i>Д. В. Ломотько, Д. В. Арсененко, Н. А. Носко, О. В. Ковалева</i>	6	143
Теоретико-практический базис правки деформированных вагоноконструкций термическим влиянием <i>А. В. Фомин, А. А. Логвиненко, А. В. Бурлуцкий, А. Н. Фомина</i>	6	155
Влияние человеческого фактора на выполнение технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов <i>В. Ю. Шапошник</i>	6	165
Транспортное строительство		
Рациональное высотное сооружение для размещения ветрового оборудования в условиях Украины <i>Р. А. Савченко, Д. О. Банников, И. И. Кирпа</i>	2	147
Особенности формирования эксплуатационных свойств модифицированных бетонов для сооружений специального назначения <i>Д. В. Руденко</i>	5	129
События		
Инженер третьего тысячелетия <i>А. В. Безруков</i>	3	149

Subject index to the journal «Nauka ta Progres Transportu. Vîsnik
Dnìpropetrovs'kogo Naciònal'nogo Unì versitetu Zalizničnogo Transportu
= Science and Transport Progress» for 2018

Article title	Journal number	Page
Science and Transport Progress		
Transport accidents distribution at Ukrainian railways according to categories depending on severity of consequences <i>O. M. Ohar, O. V. Rozsocha, G. V. Shapoval, Y. V. Smachylo</i>	3	7
Memories of scientific school of academician V. A. Lazaryan <i>M. I. Kazakevich</i>	6	8
Transport Automated Control Systems		
Method for planning non-determined operation processes of railway technical system par <i>V. V. Skalozub, I. V. Klymenko</i>	5	7
Simualtion model for evaluating the carrying capacity of railways <i>V. I. Bobrovskiy, R. G. Korobyova, V. O. Balanov</i>	6	16
Transport Ecology		
Calculation of tertorial risk in the terrorist action: express model <i>M. M. Biliaiev, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna</i>	1	7
Modeling of biological wastewater treatment on the basis of quick-computing numerical model <i>M. M. Biliaiev, M. V. Lemesh</i>	1	15
Corridor-type baffled mixing basin with cross porous barriers <i>S. M. Epoyan, V. A. Yarkin, G. I. Sukhorukov, S. P. Babenko</i>	1	24
Control body coordination model in the process of response to large-scale emergencies <i>O. M. Liashenko</i>	1	33
Wastewater treatment of industrial enterprises by the natural metals <i>L. F. Dolina, T. P. Reshetniak</i>	2	7
3d numerical model for territorial risk assesment after terrorist act <i>M. M. Biliaiev, I. V. Kalashnikov, I. V. Klimenko, V. A. Kozachyna</i>	3	20
Evaluation of emergency events at the transportation of dangerous goods in the context of the technogenic load in regions <i>Y. V. Buts, E. V. Kraynyuk, D. S. Kozodoy, V. V. Barbashin</i>	3	27
Water cleaning from residues of medicinal preparations <i>L. F. Dolina, O. P. Savina</i>	3	36
Mathematical modeling of evaporation consequences of toxic substance emergency spillage at railway transport <i>Y. O. Skob, M. L. Ugryumov</i>	3	52
Calculation of «vulnerability» zone in case of terrorist attack with chemical agents <i>M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna</i>	5	19
Anti-terror engineering in the case of possible terrorist attacks with chemical agents <i>M. M. Biliaiev, O. V. Berlov, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna</i>	6	28
Economics and Management		
Increase in profitability of the enterprise of the automobile transportation industry by directions of commercial activity <i>I. G. Abernikhina, N. V. Valeniuk, A. A. Subbotina</i>	2	18
Analytical support of financial analysis at the railway transport <i>O. A. Toporkova, L. A. Shylo</i>	2	31
Formation peculiarities of financial resources of pjsc «ukrainian railway» <i>I. M. Lomtíeva, M. P. Snachov, O. A. Toporkova, L. A. Shylo</i>	3	67
Definition of «safety boundary» in case of terrorist attack with chemical agents <i>M. M. Biliaiev, I. V. Kalashnikov, V. A. Kozachyna</i>	4	7

Article title	Journal number	Page
Thermal treatment of solid waste generated by railway transport <i>O. P. Krot, O. I. Rovenskyi, V. V. Koniev</i>	4	15
Assesment of the railway influence on the heavy metal accumulation in soil <i>A. V. Samarska, Y. V. Zelenko</i>	4	25
Optimization of supply and sales activities of the enterprise through the application of logistic principles <i>O. A. Hodoskina, V. D. Anasovich</i>	6	37
Operation and Repair of Transport Means		
Improvement of life support systems of passenger rolling stock: patent review <i>S. R. Kolesnykov</i>	1	44
Mathematical model of DPKR-2 dyzel train car <i>S. A. Kostritsa, Y. H. Sobolevs'ka, A. Y. Kuzyshyn, A. V. Batih</i>	1	56
Determination of characteristics of throttling device for pneumatic spring <i>O. H. Reidemeister, A. V. Laguza</i>	1	66
Rolling stock distribution for parking between public and non-public railway tracks <i>I. A. Yelovoy, Y. N. Potykin</i>	2	44
Proposals for improving the process of forming programs of reforming the railway transport industry <i>A. M. Okorokov, M. O. Bulakh</i>	2	57
Organization peculiarities of accident recovery works during emergency situations at railway transport <i>V. G. Loza</i>	4	36
Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory <i>B. E. Bodnar, O. B. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina, M. V. Ocheretnyuk</i>	5	28
Choosing the system of locomotive maintenance in view of the effect of dependent failures <i>B. E. Bodnar, O. B. Ochkasov, E. B. Bodnar, T. S. Hryshechkina</i>	6	47
Improvement of supervisory control of train movement by means of introduction of operational zones <i>H. I. Nesterenko, P. V. Bech, M. I. Muzykin, S. I. Avramenko</i>	6	59
Evaluating the quality of cargo delivery using the coefficient of deviation in the arrival time of trains <i>B. A. Tseyko</i>	6	71
Electric Transport		
Perspective transport-power system based on the integration of maglev-technology and distributed photo-electric station <i>V. O. Dzenzerskiy, A. B. Gnilenko, S. V. Plaksin, L. M. Pogorelaya, Y. V. Shkil'</i>	1	77
Parameters identification of three-phase to continuous current systems devices by the time series method <i>T. M. Mishchenko</i>	2	67
Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» <i>D. V. Ustymenko</i>	3	78
Methodology of determining the parameters of traction electric motor failures when operating trolleybuses <i>T. P. Pavlenko, V. M. Shavkun, V. I. Skurikhin, N. P. Lukashova</i>	4	47
Development of the algorithms formation of energy- optimized trains traffic modes <i>M. G. Prytula, O. A. Pasechnyk</i>	6	82
Railway Track		
Research of railway track parameters in the plan based on the different methods of survey <i>M. B. Kurhan, D. M. Kurhan, S. Y. Baidak, N. P. Khmelevska</i>	2	77

Article title	Journal number	Page
Special laboratory testing method for evaluation particle breakage of railway ballast material <i>S. Fischer, A. Németh</i>	2	87
Specific assessment method of railway ballast particle degradation based on unique laboratory test <i>S. Fischer, A. Nemeth, D. Harrach, E. Juhasz</i>	3	87
The subgrade heterogeneity consideration of a railway track when determining its stress-strain state <i>L. P. Telipko, L. M. Mamaev, S. V. Raksha</i>	6	101
Information and communication technologies and mathematical modeling		
Research of rational characteristics of the data communication links of the information and measuring system <i>I. A. Kliushnyk</i>	1	87
Material Science		
Increasing volume hardness of steel grinding balls using q-n-p heat treatment <i>V. I. Zurnadzhy, V. G. Efremenko, E. V. Dunaev, A. Lekatou, R. A. Kussa</i>	2	103
Procedure for determining process characteristics of friction stir welding <i>S. O. Plitchenko</i>	3	95
Influence of the polymeric basis on the properties of rubber-fiber composites <i>I. V. Markova</i>	6	118
Transport and economic tasks modeling		
Identifying threats in computer network based on multilayer neural network <i>I. V. Zhukovyts'kyi, V. M. Pakhomova</i>	2	114
Research of limit time indices of software environments of real time operating systems <i>V. Y. Nechay, D. O. Voloshyn, O. I. Nezhumira</i>	3	105
Implementation of the dynamic, competitive and fuzzy models for planning of the multi-product flows in transport networks <i>V. V. Skalozub, L. O. Panik</i>	3	113
Optimal structural reservation of technical systems <i>S. N. Semenets, S. S. Nasonova, G. I. Semenets</i>	4	60
Intelligent control of marshalling yards at transportation of dangerous goods based on multiobjective optimization <i>T. V. Butko, V. M. Prokhorov, D. M. Chekhunov</i>	5	41
Synergetic approach to the calculation of one-group train formation plan <i>V. Y. Negrey, K. M. Shkuryin</i>	5	53
Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model <i>V. N. Pakhomova, I. D. Tsykalo</i>	6	126
Non-Traditional Transport Modes. Machines and Mechanism		
Usage of construction-oriented software scad for analysis of work of machine-building structures <i>D. O. Bannikov</i>	1	98
Effect of resistance to rolling on the dynamics of the lifting mechanisms of the transporting machines <i>V. M. Bohomaz, L. M. Bondarenko, O. V. Bohomaz, M. G. Brylyova</i>	2	124
Unsteady operating modes of the main drive unit of a machine-tools for solid railway wheels processing <i>R. P. Pogrebnyak</i>	3	128
Improving the mechanical system of the electrode holder to reduce electrode vibration <i>A. O. Vlasov1, S. V. Zdanevich</i>	4	68
Repeated connections in the schemes of link slider-crank mechanism of gripping device <i>R. P. Pogrebnyak</i>	4	81

Article title	Journal number	Page
Determination of the varied constructive parameters for balancing units of portal cranes <i>V. V. Suglov, S. V. Raksha, K. V. Tkachuk</i>	4	89
Structural analysis and rational design of mechanisms of cross-roll tube straightening machines <i>S. S. Zdanevich, R. P. Pogrebnyak, S. V. Zdanevich</i>	5	65
Methods of presetting boundary conditions and geometry of the screw-propeller in the flow vision <i>O. N. Kornelyuk</i>	5	74
Modeling the manifestations of the human factor of the maritime crew <i>P. S. Nosov, I. V. Palamarchuk, M. S. Safonov, V. I. Novikov</i>	5	82
Industrial Transport		
Heuristic method of ships selection for the coordinated work of water transport <i>O. V. Shcherbina, A. G. Shibaev</i>	1	112
Rolling Stock and Train Traction		
Mathematical model of unsteady heat transfer of passenger car with heating system <i>E. V. Biloshytskyi</i>	1	121
Theoretical and experimental research of strength properties of spine beam of freight cars <i>L. O. Neduzha, A. O. Shvets</i>	1	131
Structural-functional description of the hatch cover construction <i>O. V. Fomin, M. I. Gorbunov, N. S. Kocheshkova, V. V. Kovalenko</i>	2	133
Complex calculation of hatch cover of gondola car from polytypic materials with intermediate s-shape strapping <i>M. I. Horbunov, O. V. Fomin, A. O. Lovska, V. V. Kovalenko</i>	3	138
Investigation of premature destruction causes of locomotive 2TE116 crankshaft <i>V. L. Horobets, V. V. Kovalenko</i>	4	101
Efficiency of modernization of wheel-motor blocks using anti-friction traction motor support bearings <i>M. I. Kapitsa, O. M. Hnennyi, D. V. Bobyr</i>	4	111
Sensitivity of stresses to the forces acting on the cast parts of freight-car bogie <i>O. G. Reidemeister, O. A. Shykunov</i>	4	125
Theoretical studies on the process of change of the technical condition of freight cars in operation <i>V. Y. Shaposhnyk</i>	4	134
Stability of motion of railway vehicles described with Lagrange equations of the first kind <i>A. G. Reidemeister, S. I. Levytska</i>	5	93
Research of locomotive mechanics behavior <i>V. A. Tamarinova, Y. Kalivoda, L. O. Neduzha</i>	5	104
Influence of the longitudinal and transverse displacement of the cargo gravity center in gondola cars on their dynamic indicators <i>A. O. Shvets</i>	5	115
Formalization of rolling stock distribution processes by using dynamic mode <i>D. V. Lomoto, D. V. Arsenenko, N. A. Nosko, O. V. Kovalova</i>	6	143
Theoretic-practical basis of leveling of deformed carrier constructions by thermal influence <i>O. V. Fomin, O. A. Logvinenko, O. V. Burlutsky, A. M. Fomina</i>	6	155
Human factor influence on performing technical maintenance and repair of freight cars <i>V. Y. Shaposhnyk</i>	6	165
Transport Construction		
Rational altitude structure for placing the wind equipment in the conditions of Ukraine <i>R. A. Savchenko, D. O. Bannikov, I. I. Kyrpa</i>	2	147

Article title	Journal number	Page
Properties of modified concrete for special purpose structures <i>D. V. Rudenko</i>	5	129
Events		
Engineer of the third millennium <i>A. V. Bezrukov</i>	3	149

ЗМІСТ

С. В. МЯМЛІН КОЛОНКА РЕДАКТОРА	7
--	---

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

М. І. КАЗАКЕВИЧ СПОГАДИ ПРО НАУКОВУ ШКОЛУ АКАДЕМІКА В. А. ЛАЗАРЯНА	8
---	---

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

В. І. БОБРОВСЬКИЙ, Р. Г. КОРОБІЙОВА, В. О. БАЛАНОВ ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ЗАЛІЗНИЦІ	16
--	----

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

М. М. БІЛЯЄВ, О. В. БЕРЛОВ, І. В. КАЛАШНІКОВ, В. А. КОЗАЧІНА АНТИТЕРОРИСТИЧНИЙ ІНЖИНІРИНГ ПРИ МОЖЛИВОМУ ТЕРАКТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ХІМІЧНОГО АГЕНТА НА ВУЛИЦІ	28
--	----

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

О. А. ХОДОСКІНА, В. Д. АНАСОВИЧ ОПТИМІЗАЦІЯ ПОСТАЧАЛЬНО-ЗБУТОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРИНЦИПІВ	37
--	----

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Б. Є. БОДНАР, О. Б. ОЧКАСОВ, Т. С. ГРИШЕЧКІНА, Є. Б. БОДНАР ВИБІР СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗАЛЕЖНИХ ВІДМОВ	47
---	----

Г. І. НЕСТЕРЕНКО, П. В. БЕХ, М. І. МУЗИКІН, С. І. АВРАМЕНКО УДОСКОНАЛЕННЯ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО РЕГУЛЮВАННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВВЕДЕННЯ ОПЕРАТИВНИХ ЗОН	59
--	----

Б. О. ЦЕЙКО ОЦІНКА ЯКОСТІ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОЕФІЦІЄНТА ВІДХИЛЕННЯ ЧАСУ ПРИБУТТЯ ПОЇЗДА	71
--	----

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

М. Г. ПРИТУЛА, О. А. ПАСЕЧНИК РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГООПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РУХУ ПОЇЗДІВ	82
--	----

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Л. П. ТЕЛІПКО, Л. М. МАМАЄВ, С. В. РАКША УРАХУВАННЯ НЕОДНОРІДНОСТІ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЙОГО НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ	101
--	-----

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

І. В. МАРКОВА ВПЛИВ ПОЛІМЕРНОЇ ОСНОВИ НА ВЛАСТИВОСТІ ГУМОВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТИВ	118
--	-----

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

В. М. ПАХОМОВА, І. Д. ЦИКАЛО ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ В КОМП'ЮТЕРНІЙ МЕРЕЖІ ЗАСОБАМИ БАГАТОШАРОВОЇ НЕЙРОННОЇ МОДЕЛІ	126
---	-----

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Д. В. ЛОМОТЬКО, Д. В. АРСЕНЕНКО, Н. А. НОСКО, О. В. КОВАЛЬОВА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОДІЛУ РУХОМОГО СКЛАДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ	143
--	-----

О. В. ФОМІН, О. А. ЛОГВІНЕНКО, О. В. БУРЛУЦЬКИЙ, А. М. ФОМІНА ТЕОРЕТИЧНО-ПРАКТИЧНИЙ БАЗИС ПРАВКИ ДЕФОРМОВАНИХ ВАГОНОКОНСТРУКЦІЙ ТЕРМІЧНИМ ВПЛИВОМ	155
---	-----

В. Ю. ШАПОШНИК ВПЛИВ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА НА ВИКОНАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ	165
--	-----

ТЕМАТИЧНИЙ ПОКАЖЧИК ЖУРНАЛУ «НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ. ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ» ЗА 2018 РІК	176
--	-----

СОДЕРЖАНИЕ

С. В. МЯМЛИН КОЛОНКА РЕДАКТОРА	7
--	---

НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА

М. И. КАЗАКЕВИЧ ВОСПОМИНАНИЯ О НАУЧНОЙ ШКОЛЕ АКАДЕМИКА В. А. ЛАЗАРЯНА	8
--	---

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

В. И. БОБРОВСКИЙ, Р. Г. КОРОБЬЕВА, В. О. БАЛАНОВ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ	16
---	----

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. В. БЕРЛОВ, И. В. КАЛАШНИКОВ, В. А. КОЗАЧИНА АНТИТЕРРОРИСТИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ТЕРАКТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО АГЕНТА НА УЛИЦЕ	28
--	----

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

О. А. ХОДОСКИНА, В. Д. АНАСОВИЧ ОПТИМИЗАЦИЯ СНАБЖЕНЧЕСКО-СБЫТОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ	37
---	----

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

Б. Е. БОДНАРЬ, А. Б. ОЧКАСОВ, Т. С. ГРИШЕЧКИНА, Е. Б. БОДНАРЬ ВЫБОР СИСТЕМЫ СОДЕРЖАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ	47
--	----

Г. И. НЕСТЕРЕНКО, П. В. БЕХ, М. И. МУЗЫКИН, С. И. АВРАМЕНКО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИСПЕТЧЕРСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ С ПОМОЩЬЮ ВВЕДЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ЗОН	59
---	----

Б. А. ЦЕЙКО ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ДОСТАВКИ ГРУЗОВ С ПОМОЩЬЮ КОЭФФИЦИЕНТА ОТКЛОНЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ ПОЕЗДА	71
---	----

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ

М. Г. ПРИТУЛА, А. А. ПАСЕЧНИК РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГООПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ	82
---	----

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ

Л. П. ТЕЛИПКО, Л. М. МАМАЕВ, С. В. РАКША УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	101
---	-----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

И. В. МАРКОВА ВЛИЯНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЫ НА СВОЙСТВА РЕЗИНОВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ	118
---	-----

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТА И ЭКОНОМИКИ

В. Н. ПАХОМОВА, И. Д. ЦЫКАЛО ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА В КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ СРЕДСТВАМИ МНОГОСЛОЙНОЙ НЕЙРОННОЙ МОДЕЛИ	126
---	-----

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

Д. В. ЛОМОТЬКО, Д. В. АРСЕНЕНКО, Н. А. НОСКО, О. В. КОВАЛЕВА ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ	143
---	-----

А. В. ФОМИН, А. А. ЛОГВИНЕНКО, А. В. БУРЛУЦКИЙ, А. Н. ФОМИНА ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧЕСКИЙ БАЗИС ПРАВКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ВАГОНОКОНСТРУКЦИЙ ТЕРМИЧЕСКИМ ВЛИЯНИЕМ	155
---	-----

В. Ю. ШАПОШНИК ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА ВЫПОЛНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ	165
---	-----

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЖУРНАЛА «НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ. ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ» ЗА 2018 ГОД	181
---	-----

CONTENTS

S. V. MYAMLIN EDITORIAL COLUMN	7
--	---

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

M. I. KAZAKEVICH MEMORIES OF SCIENTIFIC SCHOOL OF ACADEMICIAN V. A. LAZARYAN	8
---	---

TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

V. I. BOBROVSKIY, R. G. KOROBKOVA, V. O. BALANOV SIMULATION MODEL FOR EVALUATING THE CARRYING CAPACITY OF RAILWAYS	16
---	----

TRANSPORT ECOLOGY

M. M. BILIAIEV, O. V. BERLOV, I. V. KALASHNIKOV, V. A. KOZACHYNA ANTI-TERROR ENGINEERING IN THE CASE OF POSSIBLE TERRORIST ATTACKS WITH CHEMICAL AGENTS	28
---	----

ECONOMICS AND MANAGEMENT

O. A. HODOSKINA, V. D. ANASOVICH OPTIMIZATION OF SUPPLY AND SALES ACTIVITIES OF THE ENTERPRISE THROUGH THE APPLICATION OF LOGISTIC PRINCIPLES	37
---	----

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

B. E. BODNAR, O. B. OCHKASOV, E. B. BODNAR, T. S. HRYSHCHENKO CHOOSING THE SYSTEM OF LOCOMOTIVE MAINTENANCE IN VIEW OF THE EFFECT OF DEPENDENT FAILURES	47
---	----

H. I. NESTERENKO, P. V. BECH, M. I. MUZYKIN, S. I. AVRAMENKO IMPROVEMENT OF SUPERVISORY CONTROL OF TRAIN MOVEMENT BY MEANS OF INTRODUCTION OF OPERATIONAL ZONES	59
---	----

B. A. TSEYKO EVALUATING THE QUALITY OF CARGO DELIVERY USING THE COEFFICIENT OF DEVIATION IN THE ARRIVAL TIME OF TRAINS	71
--	----

ELECTRIC TRANSPORT

M. G. PRYTULA, O. A. PASECHNYK DEVELOPMENT OF THE ALGORITHMS FORMATION OF ENERGY- OPTIMIZED TRAINS TRAFFIC MODES	82
--	----

RAILWAY TRACK

L. P. TELIPKO, L. M. MAMAEV, S. V. RAKSHA THE SUBGRADE HETEROGENEITY CONSIDERATION OF A RAILWAY TRACK WHEN DETERMINING ITS STRESS-STRAIN STATE	101
--	-----

MATERIAL SCIENCE

I. V. MARKOVA INFLUENCE OF THE POLYMERIC BASIS ON THE PROPERTIES OF RUBBER-FIBER COMPOSITES	118
--	-----

TRANSPORT AND ECONOMIC TASKS MODELING

V. N. PAKHOMOVA, I. D. TSYKALO OPTIMAL ROUTE DEFINITION IN THE NETWORK BASED ON THE MULTILAYER NEURAL MODEL	126
--	-----

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

D. V. LOMOTKO, D. V. ARSENIENKO, N. A. NOSKO, O. V. KOVALOVA FORMALIZATION OF ROLLING STOCK DISTRIBUTION PROCESSES BY USING DYNAMIC MODEL	143
--	-----

O. V. FOMIN, O. A. LOGVINENKO, O. V. BURLUTSKY, A. M. FOMINA THEORETIC-PRACTICAL BASIS OF LEVELING OF DEFORMED CARRIER CONSTRUCTIONS BY THERMAL INFLUENCE	155
---	-----

V. Y. SHAPOSHNYK HUMAN FACTOR INFLUENCE ON PERFORMING TECHNICAL MAINTENANCE AND REPAIR OF FREIGHT CARS	165
--	-----

SUBJECT INDEX TO THE JOURNAL «SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS» FOR 2018	186
---	-----

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 A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються 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, присланих списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

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/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№6 (78) 2018

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 22,79. Тираж 100 пр. Зам. №02/06

**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

Свідцтво 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**

№ 6 (78) 2018

(на українском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Поминова

Компьютерная верстка – О. В. Поминова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 22,79. Тираж 100 экз. Зак. №02/06

**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. Днипро, пр. Д. Яворницкого, 60

Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 6 (78) 2018

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 22,79. Circulation 100. Order no. 02/06

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

