

656.2  
H34



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



# НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

3(45)

.. 2013 ..

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

**3 (45) 2013**

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

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

Дніпропетровськ

2013

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

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

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

*ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):*

Аксьонов І. М., Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакуленко І. О., Верхоглядова Н. І., Власова Т. І., Габринєць В. О., Гаврилюк В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобець В. Л., Дорогань Т. Є., Доценко О. М., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Каламбет С. В., Капица М. І., Ковтун В. В., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Купцова Т. А., Курган М. Б., Муха А. М., Мухіна Н. А., Настечик М. П., Нетеса М. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Покотілов А. А., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Рибкін В. В., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

*ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:*

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Науково-технічний центр залізничного транспорту, Республіка Польща); Васяк І. (Інститут електроенергетики, Республіка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Академія наук, Чеська Республіка); Зіммер К. (Електротехнічний інститут, Республіка Польща); Казакевич М. І. (Федеративна Республіка Німеччина); Лінгайтис В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Лінгайтис Л. П. (Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва); Манашкін Л. А. (Технологічний університет Нью-Джерсі, США); Микульські Є. (Сілезький технологічний університет, Республіка Польща); Сладковські А. (Сілезький технологічний університет, Республіка Польща); Стележецькі Р. (Гданський морський університет, Республіка Польща); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Республіка Польща).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р. Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України постановами президії ВАК України № 1-05/6 від 16.12.2009 р. (технічні науки) та № 1-05/2 від 10.03.2010 р. (економічні науки). Журнал зареєстровано в міжнародному каталозі періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, науково-метричних системах Google Scholar, Polish Scientific Bibliography. Друкується за рішенням вченої ради університету від 01.07.2013 р., протокол № 11

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

Адреса засновника та редакції вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпропетровськ, Україна, 49010 тел.: (056) 371-51-05, e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

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

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

## **НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ**

**ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

## **(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА)**

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

**Научный журнал**

**3 (45) 2013**

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

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

Днепропетровск

2013

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

*ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО  
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА*

Пшинько А. Н., доктор технических наук

*ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА*

Мямлин С. В., доктор технических наук

*ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА*

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

*ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ*

Колесникова Т. А., кандидат наук  
по социальным коммуникациям

*ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):*

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

*ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:*

Анисимов П. С. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Бялонь А. (Научно-технический центр железнодорожного транспорта, Республика Польша); Васяк И. (Институт электроэнергетики, Республика Польша); Гусев Б. В. (Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация); Долежел И. (Академия наук, Чешская Республика); Зиммер К. (Электротехнический институт, Республика Польша); Казакевич М. И. (Федеративная Республика Германия); Лингайтис В. Л. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Лингайтис Л. П. (Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, Литва); Манашкин Л. А. (Технологический университет Нью-Джерси, США); Микульски Е. (Силезский технологический университет, Республика Польша); Сладковски А. (Силезский технологический университет, Республика Польша); Стележецки Р. (Гданьский морской университет, Республика Польша); Худзикевиц А. (Варшавский политехнический университет, Республика Польша);

Журнал  
зарегистрирован Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.  
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.  
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины постановлениями президиума ВАК Украины № 1-05/6 от 16.12.2009 г. (технические науки) и № 1-05/2 от 10.03.2010 г. (экономические науки).  
Журнал зарегистрирован в международном каталоге периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, научно-метрических системах Google Scholar, Polish Scientific Bibliography  
Печатается по решению ученого совета университета от 01.07.2013 г., протокол № 11

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

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

Издание публикуется с 1936 г.:

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

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

## NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU

VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU  
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU

## (SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

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

Scientific journal

**3 (45) 2013**

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

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

Dnipropetrovsk

2013

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

Chairman of the Editorial Board of the University  
 Editor-in-Chief  
 Deputy Chief Editor  
 Executive Secretary

Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences  
 Myamlin S. V., Doctor of Technical Sciences  
 Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences  
 Kolesnikova T. O., PhD of Social Communications

*EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):*

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

*FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:*

Anisimov P. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Byalon A. (Science and Technology Center of Railway Transport, Republic of Poland); Chudzikiewicz A. (Transport Warsaw University of Technology, Republic of Poland); Doležel I. (Academy of Sciences, Czech Republic); Gusev B. (Moscow State University of Railway Engineering, Russian Federation); Kazakevich M. (Federal Republic of Germany); Lingaitis L. P. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Lingaitis V. L. (Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania); Manashkin L. (New Jersey Institute of Technology, USA); Mikulski J. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Sladkowski A. (Silesian University of Technology, Republic of Poland); Strzelecki R. (Gdynia Maritime University, Republic of Poland); Wasiak I. (Institute of Electrical Power Engineering, Republic of Poland); Zimmer K. (Electrotechnical Institute, Republic of Poland)

Journal was registered by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine.  
 Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012  
 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Resolution of Presidium of HAC (Higher Attestation Commission) of Ukraine no. 1-05/6 from 16.12.2009 (technical sciences) and no. 1-05/2 from 10.03.2010 (economic sciences).  
 Journal is registered in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, research and metric systems Google Scholar, Polish Scientific Bibliography.  
 Published according to the Academic Council decision of the University from 01.07.2013, Protocol no. 11

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

Address of Founder Str. Lazaryana, 2, room 267, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 371-51-05  
 e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: <http://stp.diit.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

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

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

УДК 656.2.078-044.357

Е. Н. ШИРОКОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Економіка залізничного транспорту», Українська державна академія залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. + 38 (057) 730 19 72, ел. пошта 9298384@mail.ru

### НИВЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ИЗМЕНЕНИЯМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ РЕФОРМ

**Цель.** Наблюдающиеся тенденции развития национальной экономики требуют от стратегической железнодорожной отрасли стабильного проведения намеченных реформ в сфере производственно-хозяйственной деятельности. При этом актуален вопрос нивелирования сопротивлений инновационным изменениям. В связи с этим, целью статьи является изучение проблематики проявления сопротивлений реализуемым изменениям, а также поиск решений по их устранению. **Методика.** Методика статьи основывается на использовании последовательного методического приема. **Результаты.** Статья содержит авторскую точку зрения по поводу необходимости учета такого явления, как сопротивление переменам при проведении реструктуризации и дальнейшего реформирования. Подчеркнута необходимость тщательного планирования внедрения изменений и текущего выявления препятствий, которые неизбежно возникают в силу разнообразных причин. **Научная новизна.** В статье выявлены причины возникновения сопротивлений изменениям с разных позиций, выполнена их классификация, а также предложены некоторые рекомендации по нивелированию проявления сопротивлений изменениям. **Практическая значимость.** Рационально примененные мероприятия по нивелированию сопротивлений внедряемым изменениям позволят не только обеспечить качественную и быструю реализацию программы реформ, но и осуществить ее с наименьшими временными и финансовыми потерями, что является важным фактором повышения конкурентоспособности железных дорог в условиях нестабильности экономического развития.

**Ключевые слова:** реформирование; реструктуризация; сопротивления изменениям; конкурентоспособность; нивелирование

#### Введение

В современных условиях функционирования мировой экономической системы и национального хозяйства отдельных стран, когда велико воздействие как внешних факторов, так и внутренних, актуализируются вопросы непрерывного внедрения и реализации необходимых изменений в целях повышения конкурентоспособности и формирования устойчивости предприятий и организаций.

Принимая во внимание стратегическое значение железнодорожного транспорта для ста-

бильного развития потенциальных возможностей экономики Украины и реализацию намеченной программы по адаптации деятельности железных дорог к современным условиям товарооборота и предоставления услуг по средствам изменения формы хозяйствования, целесообразным является учет всех следствий принимаемых решений и реализуемых мероприятий.

Если внедряемые мероприятия имеют кардинальный характер, то очевидна высокая вероятность возникновения сопротивлений инновационным изменениям, которые стратегически способны обеспечить успех перехода предприятия от одного уровня развития к другому. В

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

данном случае сопротивления изменениям можно считать разные по форме и характеру препятствия (затягивание, искажение) со стороны затронутых или заинтересованных лиц.

В ходе реструктуризации железнодорожного транспорта также велика вероятность возникновения сопротивлений внедряемым изменениям, поскольку реструктуризация обычно характеризуется принципиальными изменениями, которые выражаются в оптимизации структуры и системы управления, производственной деятельности, внедрении инноваций и привлечении инвестиций. Очевидно, что при этом возникают факторы, которые могут замедлять введение реструктуризационных изменений, делают их малоэффективными.

Таким примером могут служить сопротивления при попытке реализации Концепции и Программы реструктуризации на железнодорожном транспорте Украины 1998 г. [7] и Концепции государственной программы реформирования железнодорожного транспорта Украины 2006 г. [6], предполагающие ряд кардинальных изменений как в организационной структуре железнодорожного транспорта и его системе управления, так и в его производственной сфере, и которые своевременно так и не были реализованы. И чтобы предотвратить такие прецеденты в будущем, особенно при реализации реформ 2010-19 гг. [3], необходимо взвешенно подойти к актуальной проблеме нивелирования сопротивлений внедряемым изменениям.

В исследования данного направления существенный вклад внесли такие иностранные ученые: И. Ансофф, Д. Коннер, Д. Коттер, М. Кет де Ври и др.

И. Ансофф рассматривал сопротивления инновациям как неотъемлемый атрибут системы стратегического управления. Его авторству принадлежит выделение основных видов сопротивлений (поведенческое, организационное) [1]. Д. Коннер представлял сопротивления в виде препятствий скрытым последствиям от внедряемых изменений [12]. Причинами сопротивлений он называл стремление к сохранению достигнутого («зоны комфорта»), а не достижению нового [14]. М. Кет де Ври аналогично утверждал, что сопротивления – это проявление страхов [13].

Выполненные ими исследования являются базовыми при рассмотрении вопросов, связанных с уменьшением степени сопротивлений

изменениям, однако необходима их адаптация к современным условиям хозяйствования, особенностям производственных систем и т.д.

### Цель

На основании установления степени изученности рассматриваемого направления исследований в контексте данной статьи весьма важным и своевременным является применение и расширение имеющихся научных знаний для использования в ходе преобразований на железнодорожном транспорте Украины.

Главная цель данной статьи – поиск решения вопросов, связанных с проявлением сопротивлений реализуемым изменениям на предприятиях железнодорожного транспорта в ходе его реструктуризации и изменения форм хозяйствования.

### Методика

Для реализации поставленной цели статьи использован последовательный методический прием, в соответствии с которым материал излагается в логической последовательности на базе информации, полученной из литературы, и собственных знаний и умозаключений автора.

### Результаты

В ходе исследований были выявлены основные причины, препятствующие внедрению кардинальных изменений на железнодорожном транспорте, которые можно разделить на два направления: сопротивления со стороны служащих и сопротивления со стороны работников.

Так, причинами сопротивлений со стороны служащих железных дорог является возможность изменения их профессионального статуса за счет приведения имеющегося кадрового потенциала в соответствие с реальными потребностями и перевода на менее престижные должности, как следствие – необходимость изменения привычной тактики в поведении, изменение степени ответственности, вероятность снижения заработной платы и т.д.

Причинами сопротивлений со стороны работников железнодорожного транспорта (работников эксплуатационной деятельности) можно считать сложившийся менталитет работников относительно обладания ими узкоспециализированными профессиями, боязнь

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

потерять заработную плату, которая по уровню выше средней, и социальный пакет и т.д.

Эти причины можно сгруппировать в следующие блоки:

- экономические – потенциальная боязнь остаться без работы, быть не востребованным на рынке труда, следствием чего является угроза потери заработной платы, страх потери льгот, высокие затраты времени и средств на внедрение изменений;

- организационные – нежелание изменений сложившейся системы производственных и личных отношений, выполнения иного рода работ и страх перед увеличением норм выработки;

- личностные – негативное восприятие инновационных мероприятий, боязнь изменения престижности труда, страх потери личностного влияния и власти.

При этом причинами возникновения сопротивления изменениям на предприятиях железнодорожного транспорта в целом могут стать:

- затруднения, связанные с быстрой и достоверной информационной обеспеченностью при реализации нововведений и как следствие переоценка или недооценка возможностей и реальной ситуации;

- внутренний партикуляризм, как источник конфликтов между отдельными управленческими уровнями или группами работников;

- недоработанный механизм внедрения каких-либо преобразований, являющийся источником провала инновационных мероприятий;

- отсутствие команды идеологически настроенных инициаторов-реформаторов как движущей силы при реализации реструктуризационных изменений.

Кроме выявленных причин, целесообразно разграничить формы сопротивления (открытая и скрытая), а также степень их проявления (устойчивые и гибкие (податливые) сопротивления).

Открытая форма сопротивления проявляется в виде проведения акций протеста, отказа от внедрения новых мероприятий, переобучения или дополнительного обучения и т.д.

Скрытая форма сопротивления проявляется в затягивании принятия и реализации новых мероприятий, стремлении получить какие-либо дополнительные выгоды, намеренном искажении входящей и исходящей информации.

Устойчивая степень проявления наблюдает-

ся тогда, когда участники процесса преобразований принципиально не склонны к компромиссному поиску решений, а гибкая степень проявления сопротивления предполагает возможность восприятия изменений в целях достижения альтернативных результатов и выгод.

Таким образом, выполненное структурирование причин и форм проявлений сопротивления к изменениям, актуализирует необходимость разработки комплекса мероприятий по выявлению и преодолению возникающих сопротивлений к реализации внедряемых мероприятий.

Для выявления сопротивления среди сотрудников целесообразно проводить анализ восприятия ими изменений и устанавливать причины возможного сопротивления.

Для преодоления сопротивления необходимо тщательно планировать проведение изменений, а именно определять:

- цель проводимых изменений, соответствующую стратегии развития предприятия;

- пути проводимых изменений с разбиением их на этапы и мотивационные мероприятия;

- результаты, которые должны быть достигнуты.

В программу изменений, а также их проведение рационально включить дополнительно разработанный комплекс мер по преодолению сопротивления, которые могут возникать и которые (в лучшем случае) могут затянуть сроки проведения изменений, а не исказить или исключить их.

Недостатком проведения современного этапа реформ на железнодорожном транспорте как раз и является отсутствие данного элемента управленческой деятельности, что может привести к снижению эффективности принимаемых решений. В отношении данного толкования И. Ансофф считал, что «в ходе стратегических изменений сопротивление будет расти всякий раз, когда заранее не созданы условия для их осуществления, т.е. когда процесс изменений будет опережать подготовленность к ним кадров управляющих. Если и после внедрения новой стратегии и ее превращения в операционные планы существует остаточное несоответствие между кадрами руководителей и управленческим потенциалом, сопротивление будет снижать эффективность новой стратегии» [1].

В частности, для преодоления сопротивления следует расширить спектр направлений обучения персонала в целях формирования осознанности в необходимости изменений.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Вовлеченность максимального числа сотрудников в процесс проведения изменений также будет способствовать преодолению сопротивлений, поскольку это обеспечивает причастность каждого сотрудника к оптимизации работы предприятия, повышает его сознательность, активизирует чувство надобности и ценности, т.е. обеспечивает самореализацию. При этом важной является поддержка уязвимых сотрудников в их адаптации к новым условиям.

Традиционно начало преобразований вызывает негативные ожидания со стороны сотрудников предприятия или организации, поэтому использование жестких методов управления приводит к более агрессивному и устойчивому противодействию, т.е. возникновению сопротивления.

В связи с этим при проведении изменений необходимо использовать пошаговый характер преобразований с постепенной адаптацией нововведений для комфортного их восприятия сотрудниками.

С учетом вышеизложенного можно выделить условия успешного внедрения преобразований:

- стратегическая направленность на преобразование;
- авторитетность инициаторов преобразований;
- широкое привлечение персонала и личная ответственность за реализацию изменений;
- открытое обсуждение проводимых реформ;
- четкое соблюдение новых правил;
- поощрение за результаты проведенных реформ.

### Научная новизна и практическая значимость

Таким образом, в статье выявлены причины возникновения сопротивлений изменениям с разных позиций, выполнена их классификация, а также предложены некоторые рекомендации по нивелированию сопротивлений изменениям.

Практическая значимость заключается в том, что рационально примененные мероприятия по нивелированию сопротивлений внедряемым мероприятиям позволят не только обеспечить качественную и быструю реализацию программы реформ, но и осуществить ее с наименьшими временными и финансовыми потерями, что является важным фактором повышения конкурентоспособности железных дорог в условиях нестабильности экономического развития.

### Выводы

Все изложенные авторские результаты исследований дают основания утверждать, что рационально примененные мероприятия по нивелированию сопротивлений внедряемым мероприятиям позволяют:

- обнаружить и сформулировать имеющиеся проблемы;
- достигнуть компромисса между участниками (инициаторами и исполнителями) изменений;
- обеспечить эффективность реализации внедряемых инновационных мероприятий, особенно в процессе реструктуризации и реформирования.

Затронутая проблематика весьма актуальна и выходит за рамки одной статьи, поэтому перспективой дальнейших исследований является расширение знаний в этой области посредством определения особенностей проявления и методов выявления сопротивлений изменениям, разработки классификационных признаков и методики оценки сопротивлений, с позиции рисков для осуществления изменений и с экономической точки зрения.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ансофф, И. Стратегическое управление / И. Ансофф. – М. : Экономика, 1989. – 431 с.
2. Бараш, Ю. С. Формирование организационной структуры по видам деятельности / Ю. С. Бараш, Л. В. Марценюк // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – Вип. 2 (44). – С. 322–329.
3. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-п>. – Назва з екрану.
4. Дикань, В. Л. Совершенствование организационной структуры железнодорожного комплекса Украины в современных условиях / В. Л. Дикань, Н. И. Данько, М. В. Кондратюк. – Х. : УкрГАЗТ, 2010. – 190 с.
5. Зеликман, В. Д. Методика оценки качественных показателей эффективности деятельности неприбыльных организаций / В. Д. Зеликман, О. Ю. Рубенс // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – Вип. 1 (43). – С. 56–62.
6. Концепція Державної програми реформування залізничного транспорту [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/>

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

- show/651-2006-p. – Назва з екрану.
7. Концепція та програма реструктуризації на залізничному транспорті України : офіційне видання. – Київ : М-во трансп. України, 1998. – 143 с.
  8. Фатхутдинов, Р. А. Управление конкурентоспособностью организации / Р. А. Фатхутдинов. – М. : Эксмо, 2004. – 544 с.
  9. Шинкаренко, В. І. Аналіз сучасного стану інформаційно-аналітичного забезпечення внутрішнього фінансового контролю на залізничному транспорті України / В. І. Шинкаренко, О. Ю. Гресова, Є. Г. Гресова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 316–321.
  10. Широкова, О. М. Вплив роботи залізничного транспорту на стан національної економіки / О. М. Широкова // Вісн. економіки трансп. і пром-сті : зб. наук. практ. статей. – Х. : УкрДАЗТ, 2010. – № 32. – С. 341–344.
  11. Юрченко, Ю. Макроекономічний підхід до діяльності залізничного транспорту / Ю. Юрченко, О. Широкова // Актуальні проблеми економіки. – 2011. – № 10 (124). – С. 135–144.
  12. Daryl, R. Managing At The Speed Of Change / R. Daryl // New York : Villard Books, 1992. – 320 p.
  13. Kets, de Vries. M.F.R. Life and Death in the Executive Fast Lane : Essays on Irrational Organizations and their Leaders / Kets de Vries. – San Francisco : Jossey-Bass, 1995. – 252 p.
  14. Kotter, J. Force For Change: How Leadership Differs from Management / J. Kotter. – USA : Free Press, 1990. – 192 p.

О. М. ШИРОКОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Економіка залізничного транспорту», Українська державна академія залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. + 38 (057) 730 19 72, ел. пошта 9298384@mail.ru

## НІВЕЛЮВАННЯ ОПОРІВ ЗМІНАМ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ПРОВЕДЕННЯ РЕФОРМ

**Мета.** Тенденції розвитку національної економіки, які спостерігаються сьогодні, вимагають від стратегічної залізничної галузі стабільного проведення намічених реформ у сфері виробничо-господарської діяльності. Актуальним при цьому є питання нівелювання опорів інноваційним змінам. У зв'язку з цим, метою статті є вивчення проблематики прояву опорів реалізованим змінам, а також пошук рішень з даної проблеми. **Методика.** Методика статті ґрунтується на використанні послідовного методичного прийому. **Результати.** Стаття містить авторську точку зору з приводу необхідності врахування такого явища, як опір змінам при проведенні реструктуризації й подальшого реформування. У статті підкреслена необхідність ретельного планування проведення змін і поточного виявлення перешкод, які неминуче виникають. **Наукова новизна.** У статті виявлені причини виникнення опорів змінам із різних позицій, виконана їх класифікація, а також запропоновані деякі рекомендації з нівелювання опорів змінам. **Практична значимість.** Заходи, які будуть впроваджені, дозволять не тільки забезпечити якісну й швидку реалізацію програми реформ, але й здійснити її з найменшими часовими та фінансовими втратами, що є важливим чинником підвищення конкурентоспроможності залізниць в умовах нестабільності економічного розвитку.

*Ключові слова:* реформування; реструктуризація; опір змінам; конкурентоспроможність; нівелювання

E. N. SHYROKOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Economics of Railway Transport», Ukrainian State Academy of Railway Transport, Feyerbakh Sq. 7, 61050, Kharkiv, Ukraine, tel. + 38 (057) 730 19 72, e-mail 9298384@mail.ru

## RESISTANCE LEVELING TO CHANGES ON RAILWAY ENTERPRISES UNDER IMPLEMENTATION OF REFORMS

**Purpose.** The observed tendencies in the development of the national economy require stable implementation of planned reforms in the sphere of industrial and economic activities of the railway transport in the strategic railway branch. At the same time the issue of resistance elimination to changes that innovative solutions may cause is topical. To study the subject matter of resistance manifestation to implementable changes and search for solutions on the problem in question as well. **Methodology.** Methodology in an article is based on the use of consistent methodo-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

logical technique. **Findings.** It contains the author's point of view on necessity of taking changes resistance into account during restructuring and further reformation. Emphasized is the need for careful planning of changes and current detection of obstacles that inevitably, for a variety of reasons, arise. **Originality.** The causes of resistance to changes from different points of view were identified in this paper. Their classification was made and some advice for manifestation leveling of resistance to changes was offered. **Practical value.** The rational application of measures for resistance leveling to the introduced measures will provide not only high-quality and fast implementation of the reform program, but also its implementation with minimum time and finance losses. That is an important factor in competitiveness increase of railways under unstable economic development.

*Keywords:* reformation; restructuring; resistance to changes; competitiveness; leveling

## REFERENCES

1. Ansoff I. *Strategicheskoye upravleniye* [The strategic management]. Moscow, Ekonomika Publ., 1989. 431 p.
2. Barash Yu.S., Martsenyuk L.V. Formirovaniye organizatsionnoy struktury po vidam deyatel'nosti [Forming the organizational structure for activities]. *Nauka ta progress transportu – Science and Transport Progress*, 2013, issue 2 (44), pp. 322-329.
3. Derzhavna tsilova prohrama reformuvannya zaliznychnoho transportu na 2010-19 rr. (State program of reforming the railway transport for 2010-19). Available at: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-p>. (Accessed 6 June 2013).
4. Dykan V.L., Danko M.I., Kondratyuk M.V. Udoskonalennia orhanizatsiinoi struktury zaliznychnoho kompleksu Ukrainy v suchasnykh umovakh [Improving the organizational structure of the Ukraine railroad complex in modern conditions]. Kharkiv, UkrDAZT Publ., 2010. 190 p.
5. Zelikman V.D., Rubens O.Yu. Metodika otsenki kachestvennykh pokazateley effektivnosti deyatel'nosti nepriblynykh organizatsiy [The method of quality indicators evaluation for nonprofit organizations activities]. *Nauka ta progress transportu – Science and Transport Progress*, 2013, issue 1 (43), pp. 56-62.
6. Kontseptsii Derzhavnoi prohramy reformuvannya zaliznychnoho transportu (Concept and program of restructuring at the railway transport of Ukraine). Available at: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/651-2006-p>. (Accessed 6 June 2013).
7. Kontseptsii ta Prohrama restrukturyzatsii na zaliznychnomu transporti Ukrainy [Conception and restructuring program of railway transport of Ukraine]. Kiev, Ministerstvo transportu Ukrainy Publ., 1998. 143 p.
8. Fatkhutdinov R.A. Upravleniye konkurentosposobnostyu organizatsii [Management of competitiveness of the organization]. Moscow, Eksmo Publ., 2004. 544 p.
9. Shinkarenko V.I., Hresova O.Yu., Hresova Ye.G. Analiz suchasnoho stanu informatsiino-analitychnoho zabezpechennia vnutrishnoho finansovoho kontroliu na zaliznychnomu transporti Ukrainy [Analysis of the current state of information and analytical support for internal financial control of the railways Ukraine]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 316-321.
10. Shyroкова O.M. Vplyv roboty zaliznychnoho transportu na stan natsionalnoi ekonomiky [Effect of Railway transport operation on national economy state]. *Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti* [Bulletin of Transport Economics and Industry]. 2010, issue 32, pp. 341-344.
11. Yurchenko Yu., Shyroкова O. Makroekonomichnyi pidkhid do diialnosti zaliznychnoho transportu [Macroeconomic approach to activities of railway transport]. *Aktualni problemy ekonomiky – Actual Problems of Economics*, 2011, issue 10 (124), pp.135-144.
12. Daryl R. Managing At the Speed of Change. New York, Villard Books Publ., 1992. 320 p.
13. Kets de Vries, M.F.R. Life and Death in the Executive Fast Lane: Essays on Irrational Organizations and their Leaders. San Francisco, Jossey-Bass Publ., 1995. 252 p.
14. Kotter John. Force for Change: How Leadership Differs from Management. USA, Free Press Publ., 1990. 192 p.

*Статья рекомендована к публикации д.э.н., проф. В. Л. Диканем (Украина); д.э.н., проф. Ю. С. Барашем (Украина)*

Поступила в редколлегию 22.04.2013

Принята к печати 20.06.2013

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.424.3-047.38

Б. Є. БОДНАР<sup>1</sup>, О. Б. ОЧКАСОВ<sup>1\*</sup>, Д. В. ЧЕРНЯЄВ<sup>1</sup>, Я. І. ШЕВЧЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>\*Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. + 38 (067) 745 20 71, +38 (056) 373 15 34,  
ел. пошта oalexander@mail.ru

### ДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА НЕРІВНОМІРНІСТЮ ОБЕРТАННЯ ЯКОРЯ

**Мета.** Запропонувати комплексний діагностичний параметр (або систему параметрів), який би дозволяв визначати несправності тягового електродвигуна як електромагнітного, так і механічного характеру. **Методика.** Останні роки в світовій практиці найбільш швидко розвиваються технології переходу на обслуговування і ремонт обладнання відповідно до його фактичного технічного стану. Основу таких технологій складає контроль обладнання і прогнозування його технічного стану з використанням методів неруйнівного контролю та безрозбірного діагностування. В умовах експлуатації необхідний рівень надійності електричних машин, у тому числі й тягових електродвигунів (ТЕД) підтримувати дуже складно. Аналізуючи несправності рухомого складу, що виникають у процесі експлуатації, можна переконатися, що ТЕД є найменш надійними вузлами. У роботі запропоновано діагностування ТЕД за нерівномірністю обертання якоря. Розроблено пристрій для вимірювання нерівномірності обертання якоря. **Результати.** Проведено експериментальне дослідження з метою визначення нерівномірності обертання вала якоря та зв'язку нерівномірності обертання якоря з пошкодженнями вузлів ТЕД. Отримані експериментальні залежності форми сигналу нерівномірності обертання якоря для двигунів з різним технічним станом. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано метод діагностування тягових електродвигунів за нерівномірністю обертання вала якоря. Запропонований метод після подальшого удосконалення може бути використаний при проведенні стендових випробувань двигунів при їх роботі без навантаження, а також для оцінки якості проведеного ремонту. **Практична значимість.** Пристрій для виявлення дефектів вузлів тягового електродвигуна як електромагнітного, так і механічного характеру без розбирання двигуна, може використовуватись при проведенні контролю складання двигуна після ремонту та при випробуваннях ТЕД без навантаження.

**Ключові слова:** тяговий електродвигун; способи діагностування тягових електродвигунів; нерівномірність частоти обертання якоря

#### Вступ

Тягові електродвигуни (ТЕД) належать до найбільш навантаженого устаткування локомотивів з погляду комплексного впливу на них теплових, електричних, механічних і кліматичних факторів. Тому, незважаючи на постійне проведення заходів конструктивно-технологічного характеру під час виготовлення й ремонту

локомотивів, рівень пошкоджуваності ТЕД в експлуатації хоча й знижується, але залишається досить високим [1, 2].

Останнім часом в світовій практиці найбільш швидко розвиваються технології переходу на обслуговування і ремонт обладнання відповідно до його фактичного технічного стану. Основу таких технологій складає контроль обладнання і прогнозування його технічного ста-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ну з використанням методів неруйнівного контролю та безрозбірного діагностування. Головним напрямком безрозбірного діагностування силового обладнання є функціональне діагностування в номінальних режимах роботи. Міжнародними стандартами ISO за напрямком «Моніторинг стану і діагностування машин» функціональне діагностування працюючого обладнання рекомендується виконувати за робочими та непрямими параметрами, а саме: вібрації, температурі, струму електродвигуна, аналізу складу змазки [4]. В локомотивному господарстві Укрзалізниці останнім часом в процесі ремонту електричних машин активно впроваджуються засоби діагностування. Завдання засобів діагностування – виявляти дефекти на ранній стадії розвитку, спостерігати та прогнозувати розвиток дефектів, планувати обсяги ремонту та міжремонтні інтервали. А якщо ставиться завдання переходу на обслуговування та ремонт тягових двигунів за фактичним станом, то завдання діагностування стає ще більш складним – необхідно виявляти всі дефекти на ранній стадії розвитку.

Внаслідок зношення локомотивного парку локомотивні депо експлуатують тягові електродвигуни, що вичерпали свій ресурс та пройшли декілька капітальних ремонтів.

В умовах експлуатації необхідний рівень надійності електричних машин, у тому числі й ТЕД підтримувати дуже складно. Аналізуючи несправності рухомого складу, що виникають у процесі експлуатації, можна переконатися, що ТЕД є найменш надійними вузлами, тому на ремонтних заводах і в депо проводиться їх демонтаж і розбирання для визначення ступеня зношування й виконання ремонтно-відновлюваних робіт, а також для виявлення причин несправностей. У результаті ремонтно-відновлюваних робіт електричних машин у деяких випадках відбувається зниження їх надійності. Результатом цього є припинення руху на перегоні, порушення безпеки руху, підвищення кількості непланових ремонтів і відповідно економічних витрат. Внаслідок цього існує проблема забезпечення ефективності ремонтно-відновлюваних робіт, заключним етапом яких, як правило, є випробування й діагностування. При цьому необхідні засоби діагностування не завжди використовуються через складність їх

застосування або їх відсутність, хоча однією з важливих умов діагностування технічних об'єктів є повнота інформації стосовно їх технічного стану.

За даними досліджень пошкодження ТЕД в експлуатації складають близько 20 % внаслідок псування і 30 % з причини заходу на позаплановий ремонт за відповідними видами відмов устаткування електровозів. Усунення відмов, а також планові регламентні ремонтно-відновлювані роботи й поточне обслуговування щітково-колекторного вузла, ізоляційних конструкцій і підшипникових вузлів складають основну частку витрат з утримання тягових двигунів в експлуатації. Основними причинами відмов ТЕД є:

- пробій ізоляції й міжвиткові замикання обмотки якоря – 16...25 %;
- пробій ізоляції й міжвиткові замикання головних і додаткових полюсів і компенсаційної обмотки – 12...16 %;
- порушення комутації (коловий вогонь) – 8...16 %;
- пошкодження якірних підшипників – 14...16 %;
- порушення розпаювання з'єднань обмотки якоря в петушках колектора – 5...6 %.

Дослідження [6, 7] проведені для двигунів змінного струму дозволили отримати наступні статистичні дані:

- пошкодження елементів статора – 38 %;
- пошкодження елементів ротора – 10 %;
- пошкодження елементів підшипників – 40 %;
- інші пошкодження – 12 %.

На основі вище викладеного можемо зробити висновок про актуальність удосконалення методів та засобів діагностування електричних машин, зокрема ТЕД локомотивів.

Питанню діагностування несправності та випробування електричних машин присвячена значна кількість публікацій та наукових робіт як вітчизняних, так і закордонних фахівців. В цілому можуть бути виділені декілька напрямків розвитку засобів діагностування електричних машин. В роботах [8 – 10] розглянуті проблеми експлуатаційної діагностики тягових електродвигунів та методи прогнозування стану ізоляції електричних машин.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

У роботах [5, 11] розглянуті питання, пов'язані із забезпеченням надійної роботи колекторно-щіткового апарату та нерівномірності розподілення електромагнітної енергії в об'ємі ТЕД.

В останній час активно впроваджується методологія діагностування на початковій стадії розвитку дефектів, роторних вузлів, у тому числі і підшипників. Використання вібраційного діагностування досить повно розглянуто в роботах фахівців Асоціації ВАСТ [4].

Методики діагностування електричних машин на основі аналізу спектра споживаного струму наведена в [6, 7, 13–16]. Методика заснована на тому, що будь-які збурення в роботі електричної або механічної частини електродвигуна і пов'язаного з ним механізму призводять до зміни магнітного потоку в зазорі електричної машини і, як наслідок, до модуляції споживаного електродвигуном струму.

Окрім розглянутих, використовуються методи діагностування електричних машин за тепловим (інфрачервоним) випромінюванням, діагностування за сигналами акустичної емісії та діагностування вузлів тертя за аналізом мастила.

### Мета

Проведений аналіз показав наявність великої кількості різноманітних методів діагностування електричних машин. Більшість з розглянутих методів можуть бути використані для проведення приймально-здавальних випробувань і контролю якості виконаного ремонту. Але більшість методів дозволяють визначити несправність або електричного, або механічного характеру. В той самий час існує значна частина несправностей, що викликана порушеннями комутації, неточністю встановлення нейтралі та іншими причинами як електромагнітного, так і механічного характеру. Тобто необхідно визначити комплексний діагностичний параметр (або систему параметрів), який би дозволяв визначати та розділяти несправності як електромагнітного, так і механічного характеру.

### Методика

Для виявлення дефектів як електромагнітного, так і механічного характеру можуть застосовуватись діагностичні комплекси для віброа-

кустичного діагностування, а також багатоканальні вимірювальні комплекси з метою одночасного вимірювання струму та вібро-акустичного діагностування.

Серед діагностичних параметрів електричних машин виділяють температуру, вібрацію та опір ізоляції складових частин електричної машини. Для діагностування дефектів механічної та електромеханічної природи в якості діагностичної ознаки використовується вібрація.

Причинами виникнення вібрації є сили механічного, електромагнітного та аеродинамічного походження. Основною причиною підвищеної вібрації електричних машин є дисбаланс. Його наявність призводить до прискореного зносу підшипників, вала якоря та інших складових механізму, підвищеному рівню шуму, зменшенню ККД і т.д. Ліквідація дисбалансу є досить складним завданням, що вимагає кваліфікованого персоналу і складної вимірювальної техніки.

Для того, щоб підвищити загальну якість стендових випробувань електричних машин, необхідно впроваджувати новітні методи та технології діагностування, удосконалити засоби вимірювання. Одним з таких удосконалень може бути впровадження засобів для визначення нерівномірності обертання вала якоря, оскільки саме це є першочерговим фактором, який викликає вібрацію тягового електродвигуна. Впровадження засобів вимірювання нерівномірності обертання якоря тягового електродвигуна дозволить більш точно визначати якість ремонту механічної та електромеханічної частини тягових двигунів.

У той же час технічні засоби для діагностування за нерівномірністю обертання вала двигуна значно дешевші, а при застосуванні сучасних вимірювальних систем дозволяють отримати достатню кількість діагностичної інформації. Крім того, при діагностуванні за нерівномірністю частоти обертання на електродвигуні встановлюється лише один датчик, в той час як при діагностуванні віброакустичними методами необхідне встановлення великої кількості (до декількох десятків) датчиків, що підвищує трудомісткість процесу і зменшує надійність діагностичного комплексу.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

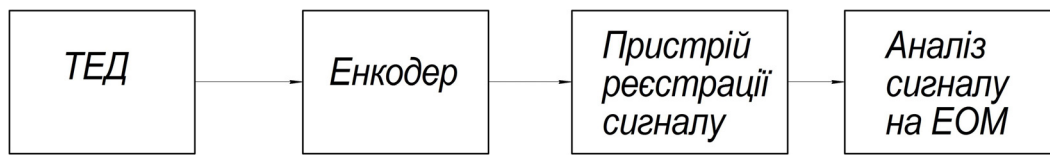


Рис. 1. Структурна схема пристрою для вимірювання нерівномірності обертання вала якоря тягового електродвигуна

Структурна схема пристрою для вимірювання нерівномірності обертання вала якоря тягового електродвигуна наведена на рисунку 1.

Для діагностування за нерівномірністю частоти обертання пропонується застосовувати високоточний інкрементальний оптичний датчик кутового переміщення (енкодер). Інкрементальні енкодери призначені для визначення кута повороту об'єктів, що обертаються. При зміні кутового положення вала щодо його початкового положення, інкрементальні енкодери формують вихідний сигнал, що є послідовністю імпульсів прямокутної форми. За цими імпульсами приймаючий пристрій визначає поточний кут повороту вала шляхом підрахунку кількості імпульсів за допомогою лічильника.

Датчик встановлюється на технологічну кришку підшипникового щита зі сторони колектора. За допомогою перехідника вал енкодера жорстко з'єднується з валом якоря. Кількість імпульсів (роздільна здатність) під час вимірювань складає 625 імпульсів на один повний оберт вала.

Шляхом обробки сигналу від інкрементального датчика можна отримати інформацію про поточне значення кута повороту валу щодо опорної індексної відмітки (методом послідовних додавань), а також про його кутову швидкість.

Діагностування за нерівномірністю обертання якоря проводиться під час роботи електродвигуна на холостому ході. Така система діагностування доступна і не потребує значних капіталовкладень на її впровадження.

Нерівномірність частоти обертання тягового електродвигуна може бути викликана різними типами несправностей, але їх можна розподілити на дві групи: несправності механічного характеру (підшипників, колекторно-щіткового апарата та ін.) і несправності електричного характеру (замикання в обмотках якоря і полюсів, порушення комутації та ін.).

Нерівномірності механічного характеру виникають через постійну циклічну зміну опору обертанню якоря, викликану зміною сили тертя в підшипниках або між щітками та колектором.

Нерівномірності електромагнітного характеру можуть бути викликані пульсаціями магнітного потоку, нерівномірністю повітряного зазору між полюсами і якорем, міжвитковими замиканнями обмотки якоря та деякими іншими менш розповсюдженими причинами.

Деякі дефекти (наприклад, несправності щітково-колекторного апарата) одночасно спричиняють нерівномірності як електричного, так і механічного характеру. Так, виступаючі колекторні пластини або міканіт спричиняють появу пульсацій напруги між щітками і струму якоря при проходженні кожного щіткотримача, що призводить до нерівномірності обертання вала двигуна. При цьому значення сили тертя між щітками і колектором постійно змінюється і, відповідно, змінюється опір обертанню якоря, що посилює нерівномірність його обертання.

Несправності механічного характеру виявляють як під час сталої роботи двигуна під напругою, так і при відсутності напруги на затискачах (в режимі вибігу). Несправності ж електричного характеру проявляються лише під час роботи двигуна під напругою. Таким чином діагностування механічного характеру доцільно проводити в режимі вибігу, а для діагностування електричної частини двигуна можна керуватись результатом віднімання сигналу нерівномірності обертання якоря при протіканні струму по обмотках і обертання якоря двигуна в режимі вибігу.

## Результати

Для підтвердження можливості використання запропонованого способу діагностування тягових двигунів проведені експериментальні дослідження з метою визначення нерівномірності

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

обертання вала якоря та зв'язку нерівномірності обертання якоря з пошкодженнями вузлів ТЕД. Експериментальні дослідження проведені на ТЕД типу ТЕ-006 в умовах локомотивного депо. Для випробувань відібрано чотири ТЕД, причому один з ТЕД після проведення ремонту в обсязі ПР-3, а інші двигуни до проведення ремонту.

Експериментальні дослідження проводились в наступних режимах:

- режим розгону – частота обертання вала якоря від 0 до 700 обертів за хвилину;
- режим холостого ходу – частота обертання вала якоря приблизно 700 обертів за хвилину;
- режим вибігу – зменшення частоти обертання до 0 обертів за хвилину.

Результати експериментальних досліджень зображено на рис. 2–4.

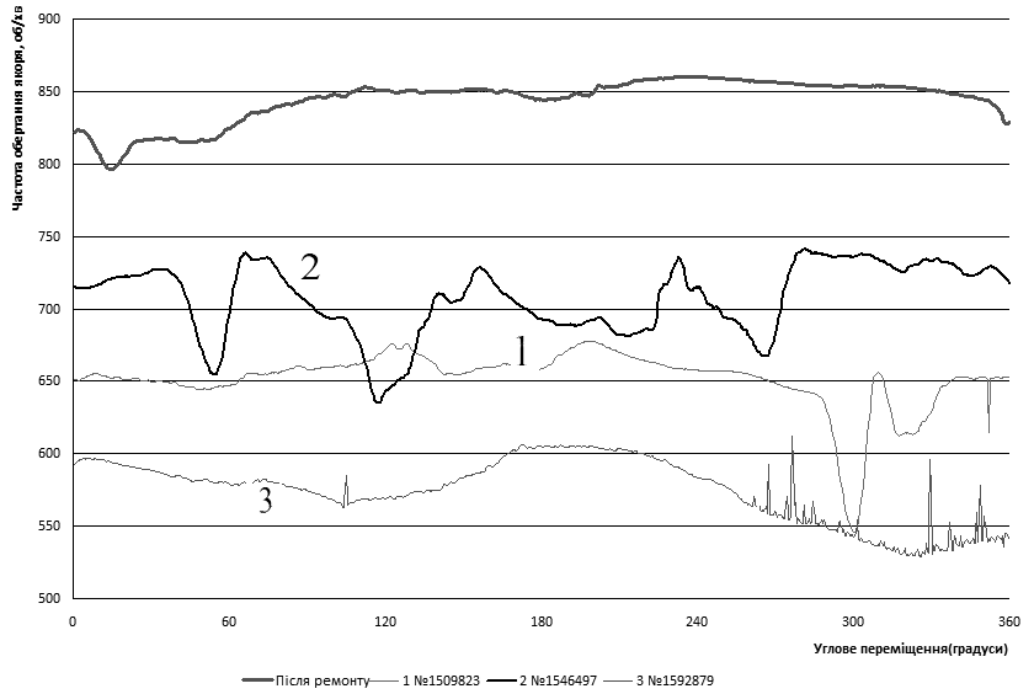


Рис. 2. Графік коливання частоти обертання вала якоря в режимі холостого ходу

В результаті експериментальних досліджень виявлено зв'язок нерівномірності обертання вала якоря ТЕД з пошкодженнями вузлів ТЕД. Після проведення вимірювання нерівномірності обертання ТЕД розбирались з метою визначення дефектів.

При розбиранні двигунів були виявлені наступні дефекти і несправності: ослаблення в посадці і, як наслідок, розшатування на валу передньої нажимної шайби, мікротріщини в зварному з'єднанні передньої нажимної шайби з валом якоря (двигун № 3), корозія поверхні тіл кочення якірних роликів підшипників, перевищення допустимого радіального зазору якірних роликів підшипників (двигун № 2), зниження опору ізоляції обмотки якоря.

### Наукова новизна та практична значимість

Вперше запропоновано метод діагностування тягових електродвигунів за нерівномірністю обертання вала якоря. В результаті проведених експериментальних досліджень підтверджено можливість використання сигналу нерівномірності обертання вала якоря із пошкодженнями вузлів тягового двигуна. Практична цінність впровадження полягає в розробці пристрою для виявлення дефектів вузлів тягового електродвигуна як електромагнітного, так і механічного характеру без розбирання двигуна. Пристрій може використовуватись при проведенні контролю складання двигуна після ремонту та під час випробувань ТЕД без навантаження.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

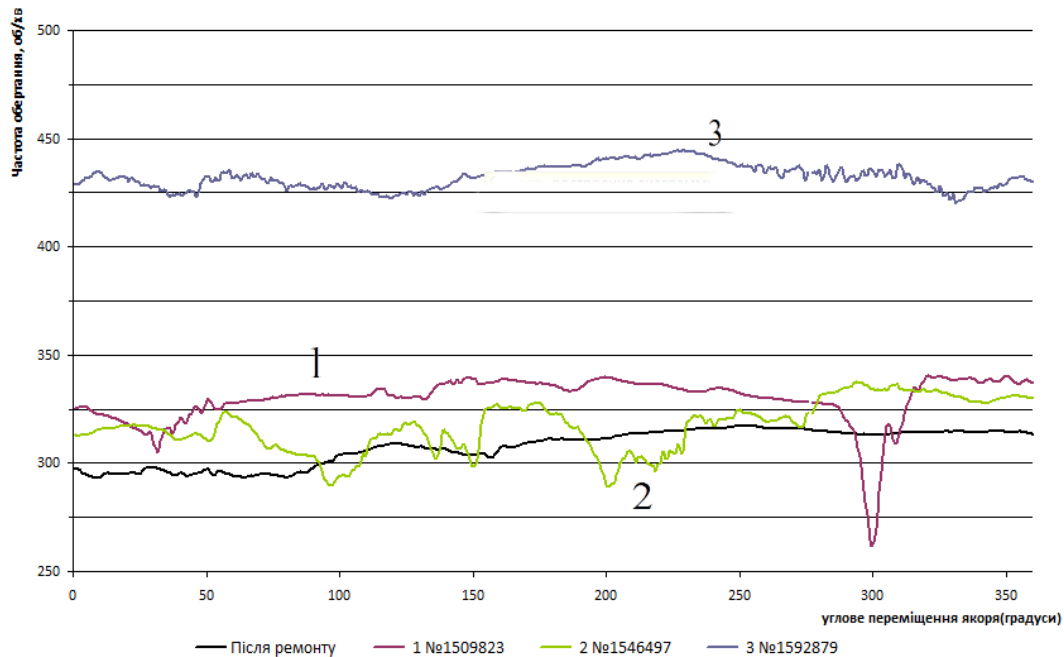


Рис. 3. Графік коливання частоти обертання вала якоря в режимі пуску

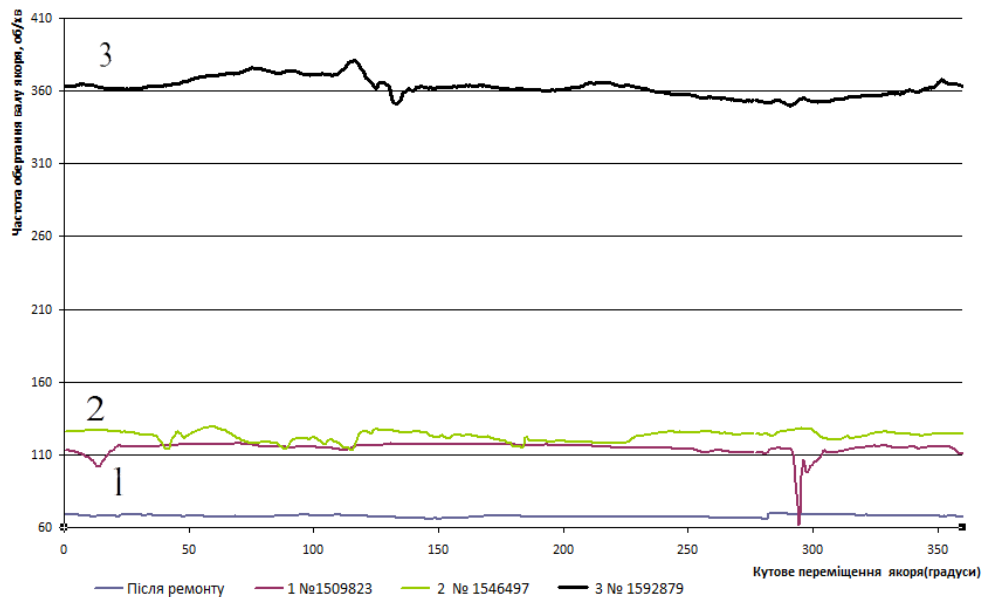


Рис. 4. Графік коливання частоти обертання вала якоря в режимі вибігу

**Висновки**

Найбільший вплив на нерівномірність мають несправності механічного характеру. Для більш точного діагностування пошкоджень

ТЕД необхідно проводити додаткові дослідження. Запропонований метод може бути використаний під час проведення стендових випробувань двигунів при їх роботі без навантаження, а також для оцінки якості проведеного ремонту.

© Б. С. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв, Я. І. Шевченко, 2013

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасов, А. М. Энергетические показатели механического способа компенсации электрических потерь в тяговых двигателях при их взаимной нагрузке / А. М. Афанасов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вып. 35. – С. 69–74.
2. Барков, А. В. Современные возможности вибродиагностики машин и оборудования. [Электронный ресурс] / А. В. Барков, В. С. Никитин – Режим доступа: <http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book21>. – Загл. с экрана.
3. Боднар, Б. Є. Визначення методу фільтрації сигналу нерівномірності частоти обертання колінчастого вала дизеля / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 1 (43). – С. 113–118.
4. Боднар, Б. Є. Діагностування тягових електродвигунів за нерівномірністю обертання якоря / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв, С. М. Чернишов // Проблемы и перспективы развития ж.-д. трансп. : тез. 72 Международ. науч.-практической конф. – Д. : Дніпропетр. нац. ун-т. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2012. – С. 16–17.
5. Зеленченко, А. П. Устройства диагностики тяговых двигателей электрического подвижного состава : учебное пособие / А. П. Зеленченко. – М. : РГОТУПС, 2002. – 39 с.
6. Капіца, М. І. Розвиток наукових основ удосконалення систем утримання тягового рухомого складу : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.22.07 / Капіца Михайло Іванович. – Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – 359 с.
7. Ларченко, А. В. Методы идентификации дефектов щеточно-коллекторного узла и магнитной системы электрических машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Ларченко Алексей Владимирович ; Московский гос. ун-т путей сообщ. – М., 2011. – 25 с.
8. Петухов, В. С. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. С. Петухов, В. А. Соколов // Новости Электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 50–52.
9. Петухов, В. С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов парка тока и напряжения / В. С. Петухов // Новости Электротехники. – 2008. – № 1 (49) – С. 45–49.
10. Правила ремонта электрических машин электроподвижного состава / Под ред. Е. М. Зубковича. – М. : Транспорт, 1992. – 295 с.
11. Серебряков, А. С. Оценка состояния корпусной изоляции тяговых двигателей / А. С. Серебряков // Локомотив. – 1999. – № 12. – С. 25–27.
12. Тычков, А. С. Диагностирование тяговых электродвигателей грузовых электровазов по параметрам магнитного поля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Тычков Александр Сергеевич ; Самарский гос. ун-т путей сообщ. – Самара, 2009. – 20 с.
13. Щербатов, В. В. Моделирование теплового состояния тягового электродвигателя для прогнозирования ресурса [Электронный ресурс] / В. В. Щербатов, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин // Известия ТПУ. – 2005. – № 7. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-teplovogo-sostoyaniya-tyagovogo-elektrodvigatelya-dlya-prognozirovaniya-resursa>. – Загл. с экрана.
14. Szymański, Z. Diagnostic model of the wheel vehicle drive system based on FEM, BEM, and random system / Z. Szymański // Proceedings of ISEF'09 (10 September – 12 September 2009). – Arras, 2009. – P. 183–193.
15. Szymański, Z. Application of the magnetic field distribution in diagnostic method of the special construction wheel traction motors / Z. Szymański // Proceedings of ISEF'07 (13 September – 15 September, 2007). – Prague : Institute of Electrical Engineering and Automation, 2007. – P. 449–456.
16. Szymanski, Z. Modern Predictive Diagnostic Method of Induction Traction Motor Based on FEM, BEM / Z. Szymanski // Computer Technology and Application. – 2012. – № 3. – P. 678–684.

Б. Е. БОДНАРЬ<sup>1</sup>, А. Б. ОЧКАСОВ<sup>1\*</sup>, Д. В. ЧЕРНЯЕВ<sup>1</sup>, Я. И. ШЕВЧЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (067) 745 20 71, +38 (056) 373 15 34, эл. почта oalexander@mail.ru

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЯКОРЯ

© Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняєв, Я. І. Шевченко, 2013

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Цель.** Предложить комплексный диагностический параметр (или систему параметров), позволяющих определять неисправности тягового электродвигателя как электромагнитного, так и механического характера. **Методика.** Последние годы в мировой практике наиболее быстро развиваются технологии перехода на обслуживание и ремонт оборудования в соответствии с его фактическим техническим состоянием. Основу таких технологий составляет контроль оборудования и прогнозирования его технического состояния с использованием методов неразрушающего контроля и безразборного диагностирования. В условиях эксплуатации необходимый уровень надежности электрических машин, в том числе и тяговых электродвигателей (ТЭД) поддерживать очень сложно. Анализируя неисправности подвижного состава, возникающие в процессе эксплуатации, можно убедиться, что ТЭД являются наименее надежными узлами. В работе предложено диагностирование ТЭД по неравномерности вращения якоря. Разработано устройство для измерения неравномерности вращения якоря. **Результаты.** Проведено экспериментальное исследование с целью определения неравномерности вращения вала якоря и связи неравномерности вращения якоря с повреждениями узлов ТЭД. Получены экспериментальные зависимости формы сигнала неравномерности вращения якоря для двигателей с различным техническим состоянием. **Научная новизна.** Впервые предложен метод диагностирования тяговых электродвигателей по неравномерности вращения вала якоря. Предложенный метод после дальнейшего усовершенствования может быть использован при проведении стендовых испытаний двигателей при их работе без нагрузки, а также для оценки качества проведенного ремонта. **Практическая значимость.** Устройство для обнаружения дефектов узлов тягового электродвигателя как электромагнитного, так и механического характера без разборки двигателя, может использоваться при проведении контроля сборки двигателя после ремонта, и при испытаниях ТЭД без нагрузки.

**Ключевые слова:** тяговый электродвигатель; способы диагностирования тяговых электродвигателей; неравномерность частоты вращения якоря

B. Ye. BODNAR<sup>1</sup>, A. B. OCHKASOV<sup>1\*</sup>, D. V. CHERNYAYEV<sup>1</sup>, Ya. I. SHEVCHENKO<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (067) 745 20 71, +38 (056) 373 15 34, e-mail oalexander@mail.ru

## DIAGNOSIS OF TRACTION ELECTRIC MOTOR AT IRREGULARITY IN SPEED OF ANCHOR ROTATION

**Purpose.** To offer a complex diagnostic parameter (or system of parameters) that would allow determining the fault of electric traction motor as well as electromagnetic and mechanical nature. **Methodology.** Technology transition to maintenance and repair of equipment in accordance with its actual condition are developed rapidly in the world practice in recent years. Control of equipment and forecasting of its technical condition with the use of non-destructive testing and diagnosis in-place methods is the basis of such technologies. In operation the reliability level of electrical machines including traction electric motor is very difficult to maintain. Analyzing failures of rolling stock, which arise from the operation, we can see that traction electric motors are the least reliable nodes. Diagnostics of traction electric motor at irregularity in speed of anchor rotation is proposed. A measurement device for irregularity in speed of anchor rotation was developed. **Findings.** An experimental research in order to determine the irregularity in speed of anchor armature shaft rotation and coupling of irregularity in speed of anchor rotation with traction electric motors nodes failures was executed. The experimental dependence of the waveform uneven rotation anchor for engines with different technical conditions. **Originality.** A method for diagnosis of traction electric motors at irregularity in speed of anchor armature shaft rotation was first proposed. This method after further improvement can be used at bench test of engines in their work without load and for the quality of the repair. **Practical value.** The device for detecting defects of the traction electric motor nodes as well as electromagnetic and mechanical nature without engine disassembly may be used for control of engine assembly after repair, and at testing of traction electric motor without load.

**Keywords:** traction motor; techniques of traction motors diagnosing; irregularity in rotation frequency of anchor

## REFERENCES

1. Afanasov A.M. Energeticheskiye pokazateli mekhanicheskogo sposoba kompensatsii elektricheskikh poter v

© Б. С. Боднар, О. Б. Очкасов, Д. В. Черняев, Я. И. Шевченко, 2013

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- tyagovykh dvigatelyakh pri ikh vzaimnoy nagruzke [Energy indicators of mechanical method of electric loss compensation in traction motors at their mutual load]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 35, pp. 69-74.
2. Barkov A.V., Nikitin V.S. *Sovremennyye vozmozhnosti vibrodiagnostiki mashin i oborudovaniya* (Modern possibilities of vibration monitoring of the cars and equipment). Available at: <http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book21> (Accessed 27 November 2012).
  3. Bodnar B.Ye., Ochkasov O.B., Cherniaiev D.V. Vyznachennia metodu filtratsii syhnalu nerivnomirnosti chastoty obertannia kolinchastoho vala dyzelia [Determination of the filtration method of the irregularity signal of the diesel crankshaft rotation]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, no. 1 (43), pp. 113–118.
  4. Bodnar B.Ye., Ochkasov O.B., Cherniaiev D.V., Chernyshov S. M Diahnostuvannia tiahovykh elektrodvyhunykh za nerivnomirnistiu obertannia yakoria [Diagnosing of the traction motors for uneven rotation of anchor]. *Tezisy 72 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya zheleznodorozhnogo transporta»* [Theses of International Scientific and Practical Conference «Problems and prospects of railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2012, pp. 16-17.
  5. Zelenchenko A.P. *Ustroystva diagnostiki tyagovykh dvigateley elektricheskogo podvizhnogo sostava* [Diagnostics devices of traction engines of electric rolling stock]. Moscow, RGOTUPS Publ., 2002. 39 p.
  6. Kapitsa M.I. *Rozvytok naukovykh osnov udoskonalennia system utrymuvannia tiahovoho rukhomoho skladu*. Dokt. Diss. [Development of scientific foundations of the improvement of traction rolling stock system maintenance. Doct. Diss.]. Dnipropetrovsk, 2010. 359 p.
  7. Larchenko A.V. *Metody identifikatsii defektov shchetочно-kollektornogo uzla i magnitnoy sistemy elektricheskikh mashin*. Avtoreferat Diss. [Methods of identification of defects of brush-collector unit and the magnetic system of electric cars. Author's abstract]. Moscow, 2011. 25 p.
  8. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigateley. Metod spektralnogo analiza potreblayemogo toka [Diagnosis of electric engines condition. Spectral analysis method of draw current]. *Novosti Elektrotekhniki – News of Electric Engineering*, 2005, no. 1 (31), pp. 50-52.
  9. Petukhov V.S. Diagnostika elektrodvigateley. Spektralnyy analiz moduley vektorov parka toka i napryazheniya [Diagnosis of electric engines. Spectral analysis of modules of current and voltage park vectors]. *Novosti Elektrotekhniki – News of Electric Engineering*, 2008, no.1 (49), pp. 45-49.
  10. Zubkovich Ye.M. *Pravila remonta elektricheskikh mashin elektropodvizhnogo sostava* [Rules of repair of electric cars of electric rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1992. 295 p.
  11. Serebryakov A.S. Otsenka sostoyaniya korpusnoy izolyatsii tyagovykh dvigateley [Assessment of the main insulation of traction motors]. *Lokomotiv – Locomotive*, 1999, no. 12, pp. 25-27.
  12. Tychkov A.S. *Diagnostirovaniye tyagovykh elektrodvigateley gruzovykh elektrovozov po parametram magnitnogo polya*. Kand. Diss. [Diagnosis of freight electric traction motors on the parameters of the magnetic field. Cand. Diss.]. Samara, 2009. 20 p.
  13. Shcherbatov V.V., Rapoport O. L., Tsukublin A. B. *Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya tyagovogo elektrodvigatelya dlya prognozirovaniya resursa* (Modeling of the thermal state of the drive motor to predict resource). *Izvestiya TPU – Proceedings of the TPU*, 2005, no. 7. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-teplovogo-sostoyaniya-tyagovogo-elektrodvigatelya-dlya-prognozirovaniya-resursa> (Accessed 27 November 2012).
  14. Szymański Z. Diagnostic model of the wheel vehicle drive system based on FEM, BEM, and random system. *Proc. of ISEF'09. Arras*, 2009. pp. 183-193.
  15. Szymański Z. Application of the magnetic field distribution in diagnostic method of the special construction wheel traction motors. *Proc. of ISEF'07. Prague*, 2007, pp. 449-456.
  16. Szymanski Z. Modern Predictive Diagnostic Method of Induction Traction Motor Based on FEM, BEM. *Computer Technology and Application*, 2012, no. 3. pp. 678–684.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. М. Мухомою (Україна); д.т.н., проф. О. Б. Бабанінім (Україна)

Поступила в редколлегию 28.03.2013

Принята к печати 04.06.2013

УДК 656.212:519.87

Д. Н. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта kozachenko@upr.diit.edu.ua

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

**Цель.** Статья направлена на создание математической модели функционирования железнодорожной станции для решения задач разработки станционной технологии на основании плана-графика. **Методика.** В качестве методов исследования использовались методы теории графов и объектно-ориентированного анализа. Модель плана-графика работы станции включает в себя: модель технического оснащения станции (сетка плана-графика) и модель процесса функционирования станции, которые формализованы на основании параметрических графов. **Результаты.** Представленная модель реализована в виде приложения к графическому пакету AutoCAD. Программное обеспечение разработано на языках Visual LISP и Visual Basic. Учитывая, что построение плана-графика представляет преимущественно традиционный процесс добавления, удаления и модификации значков, то разработанный интерфейс является интуитивно понятным технологу и практически не требует дополнительного обучения. **Научная новизна.** На основании методов теории графов и объектно-ориентированного анализа создана математическая модель для оценки технико-технологических показателей работы железнодорожных станций, ориентированная на решение задач разработки технологии их работы. **Практическая значимость.** Предложенная математическая модель реализована в виде приложения к графическому пакету AutoCAD. Наличие математической модели позволяет выполнять автоматический анализ плана-графика и, за счет этого, сократить продолжительность его создания более чем в два раза.

**Ключевые слова:** железнодорожная станция; технологический процесс; план-график работы; математическая модель

### Введение

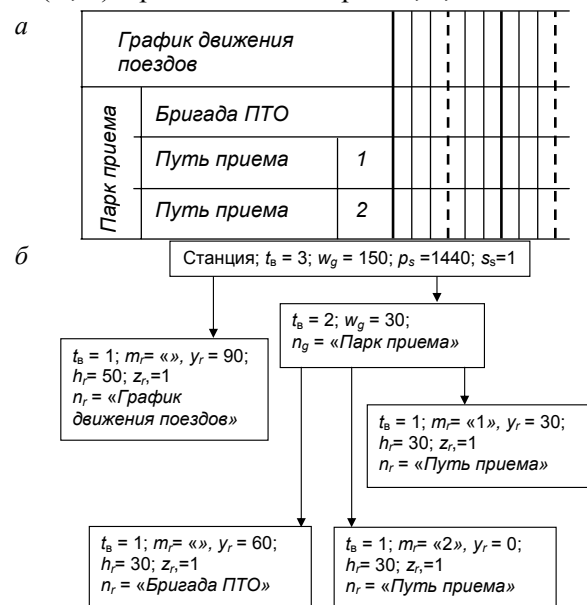
Железнодорожные станции представляют собой многофазные многоканальные системы массового обслуживания. Оценка их технико-технологических показателей представляет достаточно сложную задачу и обычно осуществляется с помощью аналитических, графических и имитационных моделей. Аналитические модели позволяют использовать прямые методы оптимизации, однако отличаются низкой точностью, математический аппарат теории массового обслуживания не может адекватно описать реальные транспортные потоки и структуру обслуживающих устройств. Различные имитационные модели, в которых технологический процесс формализован в виде сетей Петри [10–13], сетевых графиков [1], конечных автоматов [2–4, 6, 7] и др. позволяют детально исследовать влияние различных факторов на условия работы станций. В то же время слож-

ность формализации и необходимость больших затрат времени на описание технологии работы реальных станций существенно ограничивает возможность использования таких моделей на этапе разработки технологических процессов станций. В этих условиях основным методом оценки технико-технологических показателей функционирования железнодорожных станций является графическая модель в виде плана-графика. План-график имеет ряд существенных преимуществ, таких как: относительная простота построения, изменения и анализа. Поэтому разнообразные графики широко используются в железнодорожной практике с момента зарождения железнодорожного транспорта и по настоящее время. Вместе с этим графическое моделирование имеет и существенный недостаток – низкую скорость построения. С появлением персональных ЭВМ для построения планов-графиков работы станций начали широко использоваться универсальные графические редакторы, такие как: AutoCAD, CorelDraw и

Целью данной работы является создание математической модели функционирования железнодорожной станции для решения задач разработки станционной технологии на основании плана-графика.

В качестве методов исследования использовались методы теории графов и объектно-ориентированного анализа. Модель плана-графика работы станции включает в себя: модель технического оснащения станции (сетка плана-графика) и модель процесса функционирования станции. Модель реализована как приложение к графическому редактору AutoCAD.

вершине в соответствие проставлен список параметров. Тип вершины (строка, группа строк, станция) определяет параметр  $t_b$ . Для определения структуры дерева каждой вершине  $v$  в соответствие поставлена вершина  $u_b$ , так, что  $u_b \rightarrow v$ . Остальные параметры зависят от типа вершины. В частности, вершинам  $v_r \in V_r$  в соответствие поставлены ордината  $y_r$ , высота  $h_r$ , видимость  $z_r$ , название  $n_r$  и номер  $m_r$  исполнителя; вершинам  $v_g \in V_g$  в соответствие поставлены ширина  $w_g$  и название  $n_r$ ; вершине  $v_s$  в соответствие поставлена ширина столбца названий строк  $w_s$ , период моделирования  $p_s$  и горизонтальный масштаб  $s_s$ . Фрагмент сетки плана-графика и соответствующее ей дерево  $D(V, E)$  представлены на рис. 1, а, б.



При реализации в среде AutoCAD сетка плана-графика расположена на защищенных слоях и редактируется с помощью специально разработанных команд. По сравнению с обычным графическим изображением сетки наличие математической модели позволяет существенно ускорить операции ее модификации (добавление и удаление строк, изменение порядка строк, объединение в группы и их разъединение), изменение высоты строк, горизонтальное

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

изменение масштаба сетки и скрытие отдельных строк.

Функционирование станции представляется как процесс обслуживания объектов отдельными исполнителями. В качестве объектов могут рассматриваться вагоны, составы, локомотивы и др. Моделью обслуживания объекта является ориентированный граф  $G(O, L)$ . Вершинам графа соответствуют отдельные операции занятия исполнителей объектами во время обслуживания, а дугам – причинно-следственные связи между операциями. Каждой операции в соответствие поставлены идентификатор  $d_0$ , тип  $t_0$ , момент начала выполнения  $x_0$  и продолжительность  $w_0$ , резервные значения начала выполнения  $x_{0r}$  и продолжительности  $w_{0r}$ , ордината  $h_0$ , а также дополнительные параметры, соответствующие типу операции  $t_0$ . Структура графа  $G$  в памяти ЭВМ представляется списками инцидентности. При этом каждой вершине  $0$  в соответствие ставятся списки предшествующих  $p_0$  и последующих  $n_0$  вершин. Графическим отображением отдельной операции являются значки, которые реализованы в виде параметрических блоков AutoCAD [9]. Пример параметрического блока, отображающего значок прибытия поезда, представлен на рис. 2.

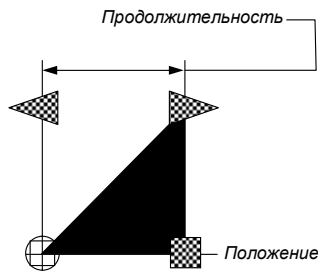


Рис. 2. Параметрический блок значка прибытия поезда

Добавление значка на план-график осуществляется в результате выбора манипулятором «мышь» его типа на панели инструментов и последующего указания точки вставки. При добавлении значка осуществляется поиск такой строки, для которой  $y_r \leq y_0$  и  $y_0 - y_r \rightarrow \min$ . В последствии осуществляется модификация параметра  $y_0$  так, что  $y_0 = y_r$ , обеспечивая тем

самым автоматическое позиционирование значка на строке.

Изменение положения и ширины значков может осуществляться с помощью «мыши» и соответствующих «ручек», которые появляются при выделении блока (см. рис. 2). Детальная настройка параметров значка осуществляется с помощью диалогового окна «Свойства», появляющегося при двойном щелчке «мышью» на соответствующем блоке (рис. 3).

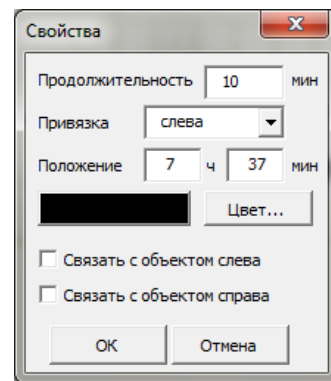


Рис. 3. Диалоговое окно редактирования свойств значка прибытия поезда

Создание последовательностей значков обеспечивается с помощью списков  $p_0$  и  $n_0$ . Заполнение списков  $p_0$  и  $n_0$  для выделенной группы объектов осуществляется автоматически. В процессе создания плана-графика выполняется контроль равенства параметров  $x_0$  и  $x_{0r}$ , а также  $w_0$  и  $w_{0r}$ . При обнаружении значка  $j$ , для которого данные условия нарушены, производится автоматическая модификация связанных с ним значков. При этом для всех значков, имеющих тот же идентификатор, что и значок  $j$ , значения параметров  $x_0$  и  $x_{0r}$  устанавливаются равными  $x_{0j}$ , а для параметров  $w_0$  и  $w_{0r}$  – равными  $w_{0j}$ . Далее рекуррентно производится модификация связанных значков. Модификация последующего значка осуществляется в том случае, когда  $x_{0j} + w_{0j} \neq x_0$ , а предшествующего – если  $x_0 + w_0 \neq x_{0j}$ . При этом, если значок обозначает простой или накопление, то выполняется изменение его продолжительности  $w_0$ , а модификация связанных значков производится только в том случае если

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$w_0 = 0$ . Для значков всех остальных типов модификация производится путем изменения параметра  $x_0$ .

### Результаты

В процессе исследований представленная модель была реализована в виде специализированного графического редактора на языке C++ [5] и в виде приложения к графическому пакету AutoCAD на языках Visual LISP и Visual Basic. Опыт эксплуатации программных комплексов показал, что более предпочтительным является вариант с адаптацией универсального графического пакета AutoCAD для решения задач разработки станционной технологии. Учитывая, что разработка плана-графика представляет преимущественно традиционный процесс добавления, удаления и модификации значков, то разработанный интерфейс является интуитивно понятным технологу и практически не требует дополнительного обучения. В то же время формальное представление процесса функционирования железнодорожной станции позволяет автоматически определять загрузку технических средств и исполнителей, а также в автоматизированном режиме формировать описание технологии в виде конечных автоматов [6].

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы состоит в создании математической модели для оценки технико-технологических показателей функционирования железнодорожных станций, ориентированной на решение задач разработки технологии их работы. Предложенная модель практически реализована в виде приложения к графическому пакету AutoCAD. Полученный специализированный графический редактор позволяет автоматизировать часть рутинных операций, связанных с модифицированием графика и оценкой его показателей, снизить нагрузку на технологов при выполнении графических работ и высвободить их время для решения задач совершенствования станционной технологии.

### Выводы

1. Использование методов теории графов и методов объектно-ориентированного анализа позволяет реализовать математическую модель функционирования железнодорожной станции в виде плана-графика, ориентированного на решение задач разработки технологических процессов.

2. Реализация математической модели в графической среде AutoCAD позволяет создать специализированный графический редактор, ориентированный на задачи разработки станционной технологии. Использование универсального редактора обеспечивает получение интуитивно понятного интерфейса, не требующего от технологов существенных трудозатрат на обучение. В то же время за счет автоматизации задач модификации плана-графика и оценки его показателей на основании формализованных процедур с математической моделью достигается сокращение времени разработки технологии работы станции более чем в два раза.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бобровский, В. И. Функциональное моделирование железнодорожных станций в тренажерах оперативно – диспетчерского персонала / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора // Математичне моделювання. – 2000. – № 2 (5). – С. 68–71.
2. Бобровский, В. И. Эргатические модели железнодорожных станций / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Зб. наук. праць КУЕТТ : Сер. «Транспортні системи і технології». – К., 2004. – Вып. 5. – С. 80–86.
3. Бобровский, В. И. Техничко-економічне управління залізничними станціями на основі ергатических моделей / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 6. – С. 17–21.
4. Вернигора, Р. В. Моделирование работы систем станционной автоматики в эргатических имитационных моделях железнодорожных станций / Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин // Зб. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи та технології перевезень». – Д., 2011. – Вип. 2. – С. 31–37.
5. Козаченко, Д. Н. Комплексный анализ железнодорожной инфраструктуры металлургического

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- комбината на основе графоаналитического моделирования / Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, Н. И. Березовый // 36. наук. пр. ДНУЗТ «Транспортні системи та технології перевезень». – Д., 2011. – Вип. 4. – С. 55–60.
6. Козаченко, Д. М. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану - графіку / Д. М. Козаченко, Р. В. Вернигора, Р. Г. Коробйова // Заліз. трансп. України. – 2008. – № 4 (70). – С. 18–20.
  7. Коробйова, Р. Г. Адекватність математичних моделей для визначення техніко-експлуатаційних показників роботи станцій / Р. Г. Коробйова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 28. – С. 29–33.
  8. Коробьева, Р. Г. Информационная модель для анализа станционных процессов на ЭВМ / Р. Г. Коробьева // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 31. – С. 50–54.
  9. Орлов, А. AutoCAD 2013 (+CD) / А. Орлов – СПб. : Питер, 2013. – 384 с.
  10. Сукач, Е. И. Стенд имитационного моделирования сортировочной станции железнодорожной сети / Е. И. Сукач // Проблеми програмування. – 2009. – № 3. – С. 81–89.
  11. Giua, A. Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets / A. Giua, C. Seatzu // IEEE Trans. on Automation Science and Engineering. – 2008. – Vol. 5, № 3. – P. 431–445.
  12. Milinkovic, S. A fuzzy Petri net model to estimate train delays / S. Milinkovic, M. Markovic, S. Veskovic, M. Ivic, N. Pavlovic // Simulation Modeling Practice and Theory. – 2013. – № 33. – P. 144–157.
  13. Szűcs, G. Railway Simulation with the CASSANDRA Simulation System / G. Szucs // Journal of Computing and Information Technology – CIT. – 2001. – Vol. 9, № 2. – P.133–142.

Д. М. КОЗАЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта kozachenko@upr.dit.edu.ua

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

**Мета.** Стаття спрямована на створення математичної моделі функціонування залізничної станції для вирішення задач розробки станційної технології на підставі плану-графіка. **Методика.** В якості методів дослідження використовувалися методи теорії графів і об'єктно-орієнтованого аналізу. Модель плану-графіка роботи станції включає в себе модель технічного оснащення станції (сітка плану-графіка) і модель процесу функціонування станції, які формалізовані на підставі параметричних графів. **Результати.** Представлена модель реалізована у вигляді додатку до графічного пакету AutoCAD. Програмне забезпечення розроблене на мовах Visual LISP і Visual Basic. Враховуючи, що побудова плану-графіка являє переважно традиційний процес додавання, видалення та модифікації значків, то розроблений інтерфейс є інтуїтивно зрозумілим технологу і практично не вимагає додаткового навчання. **Наукова новизна.** На підставі методів теорії графів і об'єктно-орієнтованого аналізу створена математична модель для оцінки техніко-технологічних показників роботи залізничних станцій, яка орієнтована на вирішення завдань розробки технології їх роботи. **Практична значимість.** Наведена математична модель реалізована у вигляді додатку до графічного пакету AutoCAD. Наявність математичної моделі дозволяє виконувати автоматичний аналіз плану-графіка і, за рахунок цього, забезпечує скорочення тривалості його створення більше ніж у два рази.

**Ключові слова:** залізнична станція; технологічний процес; план-графік роботи; математична модель

D. M. KOZACHENKO<sup>1\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Management of Operational Work», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str. 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail kozachenko@uppp.diit.edu.ua

## MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL INDICATORS OF RAILWAY STATIONS OPERATION

**Purpose.** The article aims to create a mathematical model of the railway station functioning for the solving of problems of station technology development on the plan-schedule basis. **Methodology.** The methods of graph theory and object-oriented analysis are used as research methods. The model of the station activity plan-schedule includes a model of technical equipment of the station (plan-schedule net) and a model of the station functioning, which are formalized on the basis of parametric graphs. **Findings.** The presented model is implemented as an application to the graphics package AutoCAD. The software is developed in Visual LISP and Visual Basic. Taking into account that the construction of the plan-schedule is mostly a traditional process of adding, deleting, and modifying of icons, the developed interface is intuitively understandable for a technologist and practically does not require additional training. **Originality.** A mathematical model was created on the basis of the theory of graphs and object-oriented analysis in order to evaluate the technical and process of railway stations indicators; it is focused on solving problems of technology development of their work. **Practical value.** The proposed mathematical model is implemented as an application to the graphics package of AutoCAD. The presence of a mathematical model allows carrying out an automatic analysis of the plan-schedule and, thereby, reducing the period of its creation more than twice.

**Keywords:** railway station; the manufacturing process; plan-schedule of work; mathematical model

### REFERENCES

1. Bobrovskiy V.I., Vernigora R.V. Funktsionalnoye modelirovaniye zheleznodorozhnykh stantsiy v trenazherakh operativno - dispetcherskogo personala [Functional modeling of railway stations in simulators of operational - dispatching personnel]. *Matematychnye modeliuвання – Mathematical modeling*, 2000, no. 2 (5), pp. 68-71.
2. Bobrovskiy V.I., Kozachenko D.N., Vernigora R.V. Ergaticheskiye modeli zheleznodorozhnykh stantsiy [Ergatic models of railway stations]. *Zbirnyk naukovykh prats Kyivskoho universytetu ekonomiky i tekhnolohii transportu: Seriya "Transportni systemy i tekhnolohii"* [Proc. of State Economy and Technology University of Transport: Series "Transportation Systems and Technology"], 2004, issue 5, pp. 80-86.
3. Bobrovskiy V.I., Kozachenko D.N., Vernigora R.V. Tekhniko-ekonomicheskoye upravleniye zheleznodorozhnymi stantsiyami na osnove ergaticheskikh modeley [Technical and economic management of railway stations on the basis of ergatic models]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti – Information management systems for railways transport*, 2004, no. 6, pp. 17-21.
4. Vernigora R.V., Malashkin V.V. Modelirovaniye raboty sistem stantsionnoy avtomatiki v ergaticheskikh imitatsionnykh modelyakh zheleznodorozhnykh stantsiy [Modelling of the station automation systems operation in ergatic simulations of railway stations]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezhen* [Transport systems and technologies of transportation], 2011, issue 2, pp. 31-37.
5. Kozachenko D.N., Vernigora R.V., Berezovyy N.I. Kompleksnyy analiz zheleznodorozhnoy infrastruktury metallurgicheskogo kombinata na osnove grafoanaliticheskogo modelirovaniya [Comprehensive analysis of railway infrastructure in iron and steel mill on the graphic-analytical modelling base]. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezhen* [Transport systems and technologies of transportation], 2011, issue 4, pp. 55-60.
6. Kozachenko D.N., Vernigora R.V., Korobiova R.H. Proqramnyi kompleks dlia imitatsiinoho modeliuвання roboty zaliznychnykh stantsii na osnovi dobovoho planu – hrafiku [Software system for simulation of railway stations operation based on a daily plan - schedule]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2008, no. 4 (70), pp. 18-20.
7. Korobiova R.H. Adekvatnist matematychnykh modelei dlia vyznachennia tekhniko-ekspluatatsiynykh pokaznykiv roboty stantsii [Adequacy of mathematical models for determining the technical and process indicators of station activity]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 28, pp. 29-33.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. Korobeva R.G. Informatsionnaya model dlya analiza stantsionnykh protsessov na EVM [The information model for the analysis of station processes on a computer]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 31, pp. 50-54.
9. Orlov A. AutoCAD 2013 (+CD). Saint Petersburg, Piter Publ., 2013, 384 p.
10. Sukach Ye.I. Stend imitatsionnogo modelirovaniya sortirovochnoy stantsii zheleznodorozhnoy seti [The stand of freight yard simulation model in rail network]. *Problemy prohranuvannia – Problems in programming*, 2009, no. 3, pp. 81-89.
11. Giua A., Seatzu C. Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets. *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 431-445.
12. Milinkovic S., Markovic M., Veskovic S., Ivic M., Pavlovic N. A fuzzy Petri net model to estimate train delays. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2013, no. 33, pp. 144-157.
13. Szücs G. Railway Simulation with the CASSANDRA Simulation System. *Journal of Computing and Information Technology, CIT*, 2001, vol. 9, no. 2, pp.133-142.

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

Поступила в редколлегию 21.11.2012

Принята к печати 03.06.2013

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.314.222.6:629.423

Д. А. ЗАБАРИЛО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел.+38 (063) 446 77 38, эл. почта lazbl@yandex.ru

### ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

**Цель.** Обмотки мощных трансформаторов имеют малое значение активного сопротивления и значительную индуктивность, что приводит к снижению скорости нарастания тока в обмотках. Поэтому, задавая расчетной величиной тока, необходимо убедиться в возможности ее достижения. Так как индуктивность характеризуется напряжением короткого замыкания, то необходимо разработать методику для определения максимальной величины тока в обмотках трансформатора в зависимости от величины напряжения короткого замыкания и рабочей частоты. **Методика.** Для достижения поставленной цели в работе использован классический метод расчета переходных процессов для определения значения переходного тока в обмотках трансформатора. **Результаты.** Исследован и проанализирован характер переходного тока в обмотках высокочастотного трансформатора, который питается от инвертора напряжения. **Научная новизна.** Предложен метод для определения максимальной величины тока в зависимости от величины напряжения короткого замыкания и частоты приложенного напряжения при прочих заданных параметрах. **Практическая значимость.** Предложенная методика позволит определить максимальное значение тока в обмотках высокочастотного трансформатора с учетом его RL-параметров. Это позволит сравнить величину заданного тока с возможным в зависимости от напряжения короткого замыкания и частоты приложенного напряжения. Материал исследований возможно применять при проектировании силовых трансформаторов.

**Ключевые слова:** однофазный мостовой инвертор напряжения; высоковольтный трансформатор; напряжение короткого замыкания; переходной процесс; постоянная времени

#### Введение

Трансформатор является наиболее громоздким элементом в преобразовательных цепях источников питания. К тому же рост цен на цветные металлы делает трансформатор одним из наиболее дорогостоящих элементов в преобразовательной технике. При этом быстрыми темпами идет усовершенствование элементов силовой электроники, что позволяет снизить их стоимость и достичь высокой степени интеграции, т. е. уменьшить габариты. Поэтому для повышения компактности и снижения стоимости преобразователя в целом проводятся иссле-

дования, направленные на снижение массогабаритных показателей трансформатора.

Существует три основных способа повышения компактности трансформатора:

- 1) применение сверхпроводящих обмоток;
- 2) применение для магнитопровода новых материалов с большей индукцией насыщения;
- 3) повышение рабочей частоты напряжения.

На практике наибольшее применение получил последний способ. Он предполагает использование безтрансформаторного входа со стороны источника переменного напряжения. Вместо трансформатора на входе преобразователя используется выпрямитель. Далее вы-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

прямленное напряжение сглаживается и инвертируется в переменное напряжение, которое питает обмотки трансформатора. При этом частота переменного напряжения превышает промышленную частоту (т. е. частоту напряжения

на входе выпрямителя). Такой способ нашел широкое применение в импульсных источниках питания [5, 10, 13]. В упрощенном виде схема с промежуточным трансформатором приведена на рис. 1.

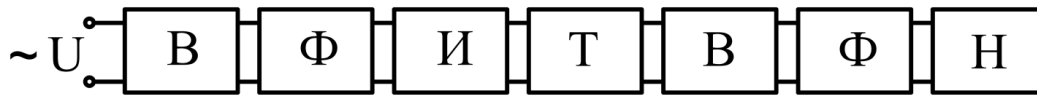


Рис. 1 Функциональная схема источника питания с использованием трансформатора повышенной частоты: В – выпрямитель; Ф – фильтр; И – инвертор; Т – трансформатор; Н – нагрузка

Большинство сердечников трансформаторов выполняются из электротехнической стали или ферритов. Маломощные трансформаторы, магнитопровод которых выполнен из электротехнической стали, могут работать на частотах до десятков кГц. Мощные (силовые, тяговые) трансформаторы излучают сильные магнитные поля, а сердечники их работают почти с максимальной индукцией насыщения (1,7...1,9 Тл) электротехнической стали. Поэтому диапазон рабочих частот мощных трансформаторов значительно меньше, чем у маломощных, что обусловлено значительным ростом потерь в стали с повышением частоты при постоянном значении индукции:

$$p_{\text{ст}} \sim f^{\beta} \beta^2, \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент, зависящий от материала,  $\beta = 1, 2, \dots, 6$ .

В последнее время для изготовления магнитопроводов трансформаторов применяются аморфные сплавы, которые позволяют снизить потери холостого хода и повысить рабочую частоту [1, 7, 12].

### Цель

Обмотки мощного трансформатора обладают значительной индуктивностью и малым активным сопротивлением, что приводит к задержке нарастания тока в обмотках, и выражается постоянной времени. Поэтому на высоких частотах при больших значениях  $\tau_n$  ток может возрасти лишь до определенного значения. А это значит, что реальный ток может не достичь заданного тока. Поэтому необходимо разработать методику для определения максимальной

величины тока в обмотках трансформатора в зависимости от величины напряжения короткого замыкания и рабочей частоты.

### Методика

Для достижения поставленной цели необходимо проанализировать принцип повышения частоты напряжения на обмотках трансформатора автономным инвертором. После чего необходимо найти начальные условия для составления выражения, с помощью которого можно определить максимальный ток нагрузки в обмотках трансформатора в переходной период.

### Принцип повышения частоты напряжения трансформатора

Принцип работы звена высокой частоты поясняет схема, приведенная на рис. 2. Это схема однофазного полностью управляемого автономного инвертора напряжения на транзисторах IGBT [6, 9]. Нагрузкой инвертора является первичная обмотка высокочастотного трансформатора. Вторичная обмотка его связана и выпрямителем, который подключен к фильтру (см. рис. 1). Подобная схема нашла применение в разработках силовой схеме тягового преобразователя электроподвижного состава [2, 3, 13, 15].

Формирование переменного напряжения на первичной обмотке трансформатора происходит следующим образом (см. рис. 2). Предположим, что в момент времени  $t = t_0$  открыты транзисторы  $VT_1, VT_4$  (рис. 3) и напряжение источника питания  $U_{\text{вх}}$  скачком поступает на первичную обмотку  $W_1$  трансформатора  $TV_1$ . (Параметры первичной обмотки включают в себя активное сопротивление  $R_1$ , индуктив-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ность  $L_1$  первичной обмотки (рис. 4) и  $R_2', L_2'$  вторичной обмотки  $W_2$ , приведенные к первичной). В цепи первичной обмотки трансформатора  $TV_1$  нарастает ток нагрузки  $i_n$ . Скорость нарастания его определяется постоянной времени

$$\tau_n = \frac{L_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}}, \text{ с} \quad (2)$$

где  $L_{\text{общ}} = L_1 + L_2'$  – общая индуктивность обмоток трансформатора, Гн;

$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2'$  – общее активное сопротивление обмоток, Ом.

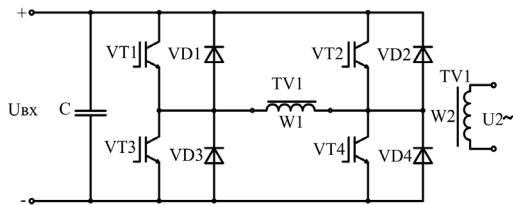


Рис. 2. Схема однофазного мостового инвертора напряжения

За время полупериода  $\frac{T}{2}$  ток нагрузки возрастает от значения  $-I_{n(\text{max})}$  до  $+I_{n(\text{max})}$  (см. рис. 3).

При этом в первичной обмотке трансформатора происходит накопление электромагнитной энергии  $W = \frac{i_n^2 \cdot L_{\text{общ}}}{2}$ .

В момент времени  $t = t_2$  происходит запитание транзисторов  $VT_1, VT_4$  и подача управляющих импульсов на затворы транзисторов  $VT_2, VT_3$ . Но они не могут включиться, так как ток в индуктивности не может мгновенно изменить направление. Поэтому после выключения  $VT_1, VT_4$  ток проходит по цепи:  $TV_1 - VD_2 - C - VD_3$ . Транзисторы  $VT_2, VT_3$ , зашунтированные диодами  $VD_2, VD_3$ , закрыты, несмотря на подачу на их затворы отпирающих импульсов. В момент времени  $t = t_3$ , ток нагрузки  $i_n(t_3) = 0$ , а при  $t > t_3$  начнет протекать в противоположном направлении. В момент вре-

мени  $t = t_4$  закроются транзисторы  $VT_2, VT_3$  и получат отпирающие импульсы транзисторы  $VT_1, VT_4$ , однако ток пойдет по цепи  $TV_1 - VD_1 - C - VD_4$ . Далее процессы будут повторяться аналогично.

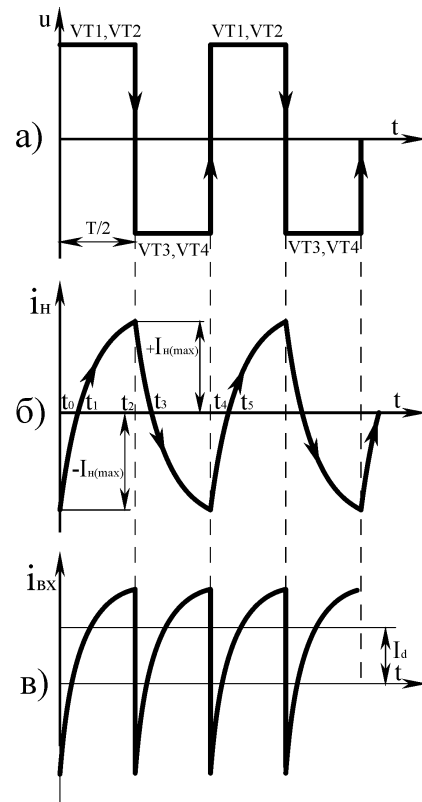


Рис. 3. График процессов в однофазном мостовом инверторе: а) напряжение на выходе инвертора; б) ток нагрузки; в) ток на входе инвертора

### Расчет тока нагрузки в переходной период

Для составления уравнений электромагнитного состояния трансформатора необходимо привести его схему замещения (рис. 4) [4,8].

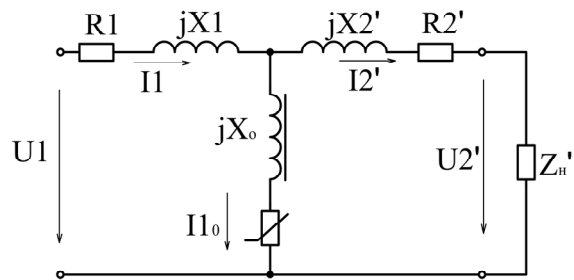


Рис. 4. Схема замещения трансформатора

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Выполнив приведение сопротивления вторичной обмотки к первичной, получим:

$$z_{\text{общ}} = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2') = R_{\text{общ}} + jX_{\text{общ}} \quad (3)$$

Пренебрегая током  $I_0$ , получим схему замещения, изображенную на рис. 5.

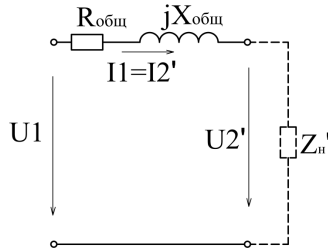


Рис. 5. Упрощенная схема замещения трансформатора

Составим баланс напряжений по полученной схеме (см. рис. 5):

$$U = R_{\text{общ}} \cdot i_n - e_p = L_{\text{общ}} \frac{di}{dt} = U_1 - U_2. \quad (4)$$

Ток нагрузки состоит из свободной и принужденной составляющей [11]:

$$i_n = i_{n(\text{пр})} + i_{n(\text{св})} = I_0 + A \cdot e^{\frac{-t}{\tau_n}}, \quad (5)$$

где  $I_0$  – установившаяся составляющая тока переходного процесса, А:

$$I_0 = \frac{U_1 - U_2'}{R_{\text{общ}}}. \quad (6)$$

Так как напряжение на первичной обмотке трансформатора повторяется периодически, то постоянная  $A$  определяется из следующего соотношения:

$$-i_n(0) = i_n\left(\frac{T}{2}\right), \quad (7)$$

$$i_n(0) = -(I_0 + A \cdot e^0) = -(I_0 + A), \quad (8)$$

$$i_n\left(\frac{T}{2}\right) = \left(I_0 + A \cdot e^{\frac{-T}{2\tau_n}}\right). \quad (9)$$

Подставляя (8) и (9) в уравнение (7), получим:

$$-(I_0 + A) = \left(I_0 + A \cdot e^{\frac{-T}{2\tau_n}}\right). \quad (10)$$

Откуда находим постоянную  $A$ :

$$A = -\frac{2I_0}{\left(1 + e^{\frac{-T}{2\tau_n}}\right)} \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в (5), получим зависимость  $i_n(t)$  в переходной период:

$$i_n(t) = I_0 + \left(-\frac{2I_0}{1 + e^{\frac{-T}{2\tau_n}}}\right) e^{\frac{-t}{\tau_n}} \quad (12)$$

или

$$i_n(t) = I_0 \left(1 - \frac{2e^{\frac{-t}{\tau_n}}}{1 + e^{\frac{-T}{2\tau_n}}}\right). \quad (13)$$

Максимальное значение тока в цепи первичной обмотки трансформатора находим при  $t = \frac{T}{2}$ :

$$i_{n(\text{max})}(t) = I_0 \frac{1 - e^{\frac{-T}{2\tau_n}}}{1 + e^{\frac{-T}{2\tau_n}}}. \quad (14)$$

Для регулирования выходного напряжения инвертора изменяют либо напряжение питающего источника  $U_{\text{вх}}(t)$ , либо посредством сдвига управляющих импульсов, подаваемых на транзисторы  $VT_1, VT_4$  относительно управляющих импульсов  $VT_2, VT_3$  на угол управления  $\beta$ .

Для примера, на рис. 6 приведена зависимость максимальной величины переходного тока  $i_{n(\text{max})}$  от напряжения короткого замыкания  $u_{\text{кз}}$  при заданном значении напряжения  $U_1 = 3\,250$  В и частоте  $f = 1000$  Гц.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

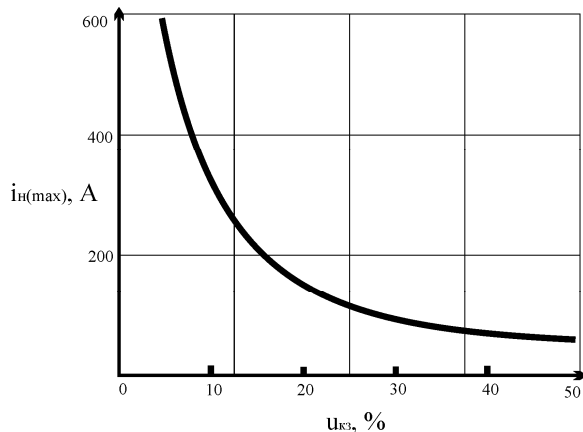


Рис. 6. Графік залежності максимальної величини переходного тока от напруги короткого замыкания

### Результаты

Получено выражение, которое позволяет определить максимальное значение тока в обмотках трансформатора в зависимости от частоты и напруги короткого замыкания при прочих заданных условиях.

### Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложена методика, позволяющая учитывать влияние величины активно-индуктивных параметров и частоты питающего напряжения на значение максимального тока нагрузки в обмотках трансформатора.

Полученные результаты работы можно использовать при проектировании силовых трансформаторов повышенной частоты.

### Выводы

При проектировании силовых высокочастотных трансформаторов в расчетах номинального тока необходимо учитывать RL-параметры обмотки, которые в основном определяются напряжением короткого замыкания. Поэтому, задаваясь частотой приложенного напряжения и напряжением короткого замыкания, необходимо убедиться, что заданное значение тока при прочих параметрах будет достигнуто. Такую проверку позволит выполнить приведенная методика.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аморфные сплавы и экономия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-i-ekonomiya.html>. – Загл. с экрана.
2. Вісін, М. Г. Шестивісний магістральний вантажний електровоз подвійного живлення із застосуванням проміжного трансформатора з високочастотною розв'язкою і з асинхронними тяговими двигунами / М. Г. Вісін, Д. О. Забаріло // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 36. – С. 132–136.
3. Вісін, М. Г. Підвищення електромагнітної су-місності рейкових кіл з електрорухомим складом подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами та тяговою мережею / М. Г. Вісін, Д. О. Забаріло // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 75–82.
4. Вольдек, А. И. Электрические машины : учеб. для студ. высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
5. Готтлиб, И. М. Источники питания. Инверторы, конвертеры, линейные и импульсные стабилизаторы / И. М. Готтлиб. – М. : Постмаркет, 2002. – 544 с.
6. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – М. : Высш. шк., 1982. – 496 с.
7. Золотухин, И. В. Физические свойства аморфных металлических сплавов / И. В. Золотухин. – М. : Металлургия, 1986. – 175 с.
8. Копылов, И. П. Электрические машины : учебник для вузов / И. П. Копылов. – М. : Энергоатомиздат, 1986 – 256 с.
9. Кулик, В. Д. Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи : учебное пособие / В. Д. Кулик. – СПб. : ГОУВПО СПбГТУРП, 2010. – 90 с.
10. Мэк, Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / Р. Мэк. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 272 с.
11. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
12. Стародубцев, Ю. Н. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов / Ю. Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2002. – 186 с.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

13. Kunz, M. Th. Entwicklung einer massemarmen Energieversorgung für elektrische Triebfahrzeuge / M. Kunz, F. Hörll, Th. Klockw // ZEV, DET Glassers Annalen, Die Eisenbahntechnik. – 1999. – Vol. 123, № 11, 12. – P. 423–426.
14. Liu, Y., Developments in Switching Mode Supply Technologies / Y. Liu, W. Eberle // IEEE Canadian Review. Switching Mode Power Supplies. – 2009. – № 61. – P. 9–14.
15. Victor, M. Energieumwandlung aut AC-Triebfahrzeugen mit Mittle frequen ztransformator / M. Victor // EB: Elektrische Bahnen. – 2005. – Vol., 103, № 11. – P. 505–510.

Д. О. ЗАБАРИЛО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел.+38 (063) 446 77 38, ел. пошта lazbl@yandex.ru

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ

**Мета.** Обмотки потужних трансформаторів мають мале значення активного опору та значну індуктивність, що призводить до зниження швидкості наростання струму в обмотках. Тому, задаючись розрахунковим струмом, необхідно переконатися в можливості його досягнення. Оскільки індуктивність характеризується напругою короткого замикання, то необхідно розробити методику для визначення максимальної величини струму в обмотках трансформатора в залежності від напруги короткого замикання та робочої частоти. **Методика.** Для досягнення поставленої мети в роботі використано класичний метод розрахунку перехідних процесів для визначення величини перехідного струму в обмотках трансформатора. **Результати.** Досліджено та проаналізовано характер перехідного струму в обмотках високочастотного трансформатора, який живиться від інвертора напруги. **Наукова новизна.** Запропоновано метод для визначення максимальної величини струму в залежності від величини напруги короткого замикання та частоти прикладеної напруги при інших заданих параметрах. **Практична значимість.** Запропонована методика дозволить визначити максимальне значення струму в обмотках високочастотного трансформатора з урахуванням його RL-параметрів. Це дозволить порівняти величину заданого струму з можливим в залежності від напруги короткого замикання та частоти прикладеної напруги. Матеріал досліджень можливо застосовувати при проектуванні силових трансформаторів.

**Ключові слова:** однофазний мостовий інвертор напруги; високовольний трансформатор; напруга короткого замикання; перехідний процес; постійна часу

D. A. ZABARILO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric rolling stock of railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str. 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel.+38 (056) 373 15 04, e-mail lazbl@yandex.ru

## FEATURES OF THE HIGH FREQUENCY POWER TRANSFORMER CALCULATION

**Purpose.** The windings of power transformers have low resistance value and a most inductance, which reduces the rate of rise of current in the windings. Therefore, when the estimated amount of current is set one should make sure of the possibility of achieving it. As inductance is characterized by a short-circuit voltage, it is necessary to develop a technique for determining the maximum magnitude of the current in the windings of the transformer according to the short-circuit voltage and operating frequency. **Methodology.** The classical method of calculation of transient processes to determine the value of the transient current of the transformer windings to achieve purpose is used. **Findings.** The nature of the transient current in the windings of high-frequency transformer, which is powered by a voltage inverter is investigated and analyzed. **Originality.** The method for determining the maximum amount of current depending on the short-circuit voltage and frequency of the applied voltage with other set-up parameters was proposed. **Practical value.** The proposed method allows determining the maximum value of the current in the

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

windings of the high-frequency transformer including its RL-parameters. This will let compare the value of a given current with possible depending on short-circuit voltage and frequency of the applied voltage. Research material may be applied for power transformers design.

**Keywords:** single-phase bridge voltage inverter; high voltage transformer; short-circuit voltage; transient process; time constant

## REFERENCES

1. *Amorfnyye splavy i ekonomiya* (Amorphous alloys and economy). Available at: <http://forca.ru/stati/podstancii/amorfnye-splavy-i-ekonomiya.html> (Accessed 03 June 2013).
2. Visin M.H., Zabarylo D.O. Shestyvisnyi mahistralnyi vantazhnyi elektrovoz podviinoho zhyvlennia iz zastosuvanniam promizhnoho transformatora z vysokochastotnoiu rozviazkoiu i z asynkhronnymy tiahovymy dvynunamy [Six axel mainline freight double feed electric locomotive using the transformer with high-frequency junction and asynchronous tractive motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 132-136.
3. Visin M.H., Zabarylo D.O. Pidvyshchennia elektromahnitnoi sumisnosti reikovykh kil z elektrorukhomym skladom podviinoho zhyvlennia z asynkhronnymy tiahovymy dvynunamy ta tiahovoiou merezheiu [Improving of electromagnetic compatibility of rail circuits with double feed electric rolling stock with asynchronous tractive motors and with power supply system]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 75-82.
4. Voldek A.I. *Elektricheskiye mashyny* [Electrical machines]. Lvov, Energyia Publ., 1978. 832 p.
5. Gottlib I.M. *Istochniki pitaniya. Invertory, konvertory, lineynyye i impulsnyye stabilizatory* [Sources of supply. Inverters, converters, linear and switching regulators]. Moscow, Postmarket Publ., 2002. 544 p.
6. Zabrodin Yu.S. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial electronics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 496 p.
7. Zolotukhin I.V. *Fizicheskiye svoystva amorfnykh metallicheskiykh splavov* [The physical properties of amorphous metallic alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 175 p.
8. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashyny* [Electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 256 p.
9. Kulik V.D. *Silovaya elektronika. Avtonomnyye invertory, aktivnyye preobrazovateli* [Power electronics. Autonomous inverters, active transducers]. Saint Petersburg, GOUVPO SPbGTURP Publ., 2010. 90 p.
10. Mek R. *Impulsnyye istochniki pitaniya. Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu* [Switching power supplies. Design Theory and guidance on the practical application]. Moscow, Izdatelskiy dom «Dodeka-KhKhI» Publ., 2008. 272 p.
11. Starodubtsev Yu.N., Belozarov V.Ya. *Magnitnyye svoystva amorfnykh i nanokristallicheskiykh splavov* [Magnetic properties of amorphous and nanocrystalline alloys]. Yekaterinburg, Uralskiy Universitet Publ., 2002. 186 p.
12. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. *Osnovy teorii tsepey* [Basics of circuit theory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 528 p.
13. Kunz M., Hörl F., Klockw Th. Entwicklung einer massemarmen Energieversorgung für elektrische Triebfahrzeuge. *ZEV, DET Glassers Annalen, Die Eisenbahntechnik*, 1999, vol. 123, no. 11,12. p. 423-426.
14. Liu Y., Eberle W. Developments in Switching Mode Supply Technologies. *IEEE Canadian Review. Switching Mode Power Supplies*, 2009. no. 61, pp. 9-14.
15. Victor M. Energieumwandlung aut AC-Triebfahrzeugen mit Mittle frequen ztransformator. *EB: Elekrtsche Bahnen*, 2005, vol. 103, no. 11, pp. 505-510.

Статья рекомендована к публикации к.т.н., проф. М. Г. Висиным (Украина); инженером-технологом I кат. ПКПП МДС, к.т.н. Д. В. Гусевым (Украина)

Поступила в редколлегию 18.04.2013.

Принята к печати 04.06.2013

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.14.018.294:629.4.027.4

І. О. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. ПРОЙДАК<sup>1</sup>, М. М. ГРИЩЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnyzt\_textmat@ukr.net

### ПЕРСПЕКТИВА ВИКОРИСТАННЯ АТЕРМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОМ'ЯКШЕННЯ МЕТАЛУ ЕЛЕМЕНТІВ РУХОМОГО СКЛАДУ

**Мета.** Метою роботи є оцінка можливості використання атермічних технологій пом'якшення металу елементів кузова і колеса залізничного вагону. **Методика.** Матеріалом для дослідження були вуглецеві сталі фрагмента ободу залізничного колеса з 0,55 % С, 0,74 % Мп, 0,33 % Si і сталь 20. Сталь залізничного колеса досліджували в стані після термічного зміцнення і холодного наклепу після експлуатації. Сталь 20 досліджували після холодної пластичної деформації прокаткою. Електричну імпульсну обробку (ЕО) здійснювали на спеціальному устаткуванні. В якості характеристики міцності металу використовували твердість за Віккерсом. Дослідження мікроструктури здійснювали з використанням світлового та електронного мікроскопів. **Результати.** При експлуатації елементів рухомого складу різного рівня міцності виникнення ушкоджень на металевих поверхнях обумовлене одночасною дією достатньо складних навантажень. Враховуючи, що формування осередків руйнування в значній мірі визначається станом об'ємів металу поблизу з місцями максимальних діючих напружень, розробка технологій зниження темпу накопичення дефектів або рівня діючих напружень дозволить подовжити термін роботи елементів рухомого складу. Після ЕО фрагменту ободу колеса змінам твердості відповідали закономірні зміни внутрішньої будови металу. Пропорційно зростанню ступеню холодної деформації прокаткою міцність низьковуглецевої сталі зростає. Знакозмінне вигинання холоднодеформованого листового прокату супроводжується зниженням міцності, яке обумовлене змінами субструктури металу. **Наукова новизна.** Процес пом'якшення наклепаної сталі супроводжується субструктурними змінами, які більшою мірою притаманні зміцненню від холодної пластичної деформації: диспергування дислокаційної чарункової структури, формування нових та переміщення сформованих субмеж. **Практична значимість.** Впровадження в умовах ремонтної бази залізничних депо технології електричної імпульсної обробки дозволить без застосування нагріву металу досягти необхідного рівня пом'якшення наклепаної по поверхні кочення сталі залізничного колеса. Наведена обробка дозволить знизити твердість і подовжити термін використання різців при відновленні профілю катання залізничного колеса.

**Ключові слова:** вуглецева сталь; залізничне колесо; твердість; субструктура; електрична імпульсна обробка; знакозмінний вигин

#### Вступ

В процесі експлуатації елементи рухомого складу піддаються достатньо складним навантажанням, які у більшості випадків можуть мати непередбачувані наслідки. Так, прошарки металу залізничного колеса поблизу з поверхнею кочення достатньо інтенсивно насичують-

ся дефектами кристалічної будови [6, 3]. Якщо нуль-мірні дефекти (вакансії, дислоковані атоми) обумовлюють швидкість розвитку процесів дифузійного масопереносу, то одномірні дислокації визначають особливості формування внутрішніх напружень, розвитку процесів деформаційного зміцнення та ін. Процеси зародження дислокацій, темп їх приросту та розта-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

шування в металі визначають умови формування зародків ушкоджень після вичерпання ресурсу їх накопичення [6, 4]. На підставі цього використання технологій, що забезпечують зниження рівня накопичених дефектів кристалічної будови в металі, можуть розглядатися як засоби підвищення ресурсу та безпеки експлуатації рухомого складу або окремих його елементів. В порівнянні з термічними технологіями пом'якшення холоднодеформованого металу [1], достатньо відомі атермічні обробки, які дозволяють знизити рівень характеристик міцності без застосування нагріву. Так ефект пом'якшення, що заснований на використанні механічних впливів, може бути досягнутим при застосуванні мікропластичних деформацій, які за напрямком своєї дії не співпадають з попередньо сформованим деформованим станом [2, 3]. Аналогічний за своїм характером вплив на розвиток процесів пом'якшення можна спостерігати при деформації сталей зі структурами, що сформовані за зсувним механізмом [10], при використанні дії імпульсів електричного струму [5, 7].

### Мета

Метою роботи є оцінка можливості використання атермічних технологій пом'якшення металу елементів кузова і колеса залізничного вагону.

### Методика

Матеріалом для дослідження були вуглецеві сталі фрагменту ободу залізничного колеса, з вмістом С – 0,55 %, Mn – 0,74 %, Si – 0,33 % та сталь 20 (0,18 % С), яка подібна металу кузовних елементів вагону. Сталь залізничного колеса досліджували в стані після термічного зміцнення при виготовленні і холодного наклепу після експлуатації. Сталь 20 досліджували після холодної пластичної деформації прокаткою на 20 %.

Дослідження мікроструктури здійснювали з використанням світлового та електронного мікроскопів. Аналіз структурних складових проводили з використанням методик кількісної металографії. Параметри тонкої кристалічної будови металу досліджували з використанням методу рентгенівського структурного аналізу. При цьому густину дислокацій визначали по кристаліграфічній площині (211). В якості ха-

рактеристики міцності металу використовували твердість за Віккерсом.

Електричну імпульсну обробку здійснювали на спеціальному устаткуванні.

### Результати

За рахунок підвищеної початкової концентрації дефектів кристалічної будови елементи рухомого складу зі сталей у високоміцному стані в процесі експлуатації достатньо швидко досягають максимальної межі за кількістю дефектів, перебільшення якої призводить до формування ушкоджень металу. Застосування технологій пом'якшення металу дозволить подовжити безаварійну роботу рухомого складу.

Дійсно, як показано в [4], момент формування неоднорідностей в дислокаційному розподілі в значній мірі залежить від розміру зерна фериту і товщини феритного проміжку перлітної колонії. За умови односпрямованого деформування зростання розміру зерна фериту супроводжується зрушенням моменту розпаду рівномірного розподілу дислокацій на періодичні структури [11] у бік менших деформацій [2]. При зміні напрямку деформації відбувається розвиток процесів анігіляції дефектів кристалічної будови і, як наслідок цього, досягається ефект пом'якшення металу. Аналіз дислокаційної чарункової структури ілюструє не тільки зниження накопиченої кількості дефектів кристалічної будови холоднодеформованого металу, але і розвиток змін, подібний процесам її вдосконалення. Так, після холодної пластичної деформації прокаткою на 20 % в сталі з 0,18 % С вже сформована недосконала дислокаційна чарункова структура фериту (рис. 1). Про це свідчать достатньо широкі субграниці, в яких спостерігається відносно низька густина дислокацій. Одночасно в тілі самих чарунок присутня певна кількість незв'язаних дислокацій (див. рис. 1).

Після чотирьох циклів знакозмінного вигину в чарунковій структурі холоднокатаної сталі можна спостерігати появу перших ознак розвитку процесів вдосконалення. Підтверджується наведене положення зниженням накопиченої загальної кількості дислокацій з одночасним зменшенням ширини субмеж і початком очищення тіла чарунок від незв'язаних дислокацій (рис. 2).

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

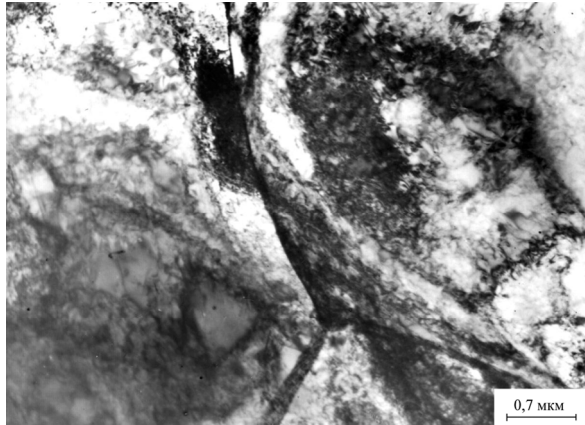


Рис. 1. Дислокаційна чарункова в структурно вільному фериті в сталі з 0,18 % С після холодної пластичної деформації прокаткою на 20 %

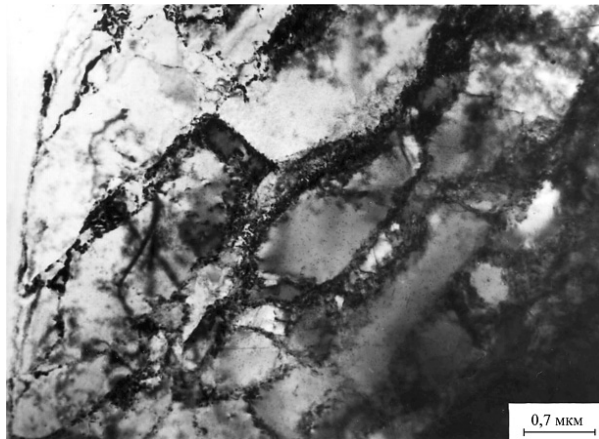


Рис. 2. Дислокаційна чарункова структура в структурно-вільному фериті в сталі з 0,18 % С після холодної прокатки на 20 % і 4 циклів знакозмінного згину

Для перлітних колоній вуглецевої сталі (0,18 % С) формування дислокаційної чарункової структури неминуче буде залежати від темпу приросту густини дислокацій у феритному проміжку і її подальшому розподілі (рис. 3). Як показано в працях [6, 2], підвищення дисперсності перлиту супроводжується зниженням темпу накопичення дислокацій при деформації і зсувом початку формування немоного розподілу дислокацій у бік більших сумарних деформацій. Підтверджується це пропорційним приростом максимально можливої деформації при волочінні сталі зі збільшенням дисперсності перлиту.

Враховуючи, що при експлуатації рухомого складу практично всі елементи піддаються чи-

сельним циклічним навантаженням, розвиток процесів втоми буде, в першу чергу, визначати умови формування осередків їх руйнування. На підставі цього дисперсність структурних складових повинна у першу чергу визначати опір металу зародженню ушкоджень. Наведене положення однозначно підтверджується існуванням залежності характеристик міцності від розміру структурного параметра металу або сплаву. Так, незалежно від схеми навантаження (односпрямоване або реверсивне), під час розвитку процесів втоми міцність сталі від розміру структурного елемента підпорядковується відомої залежності [12, 13]:

$$\sigma_{-1} = \sigma'_i + k'_y \cdot \lambda^{-0.5},$$

де  $\sigma_{-1}, \sigma'_i, k'_y$  – відповідно межа втоми і параметри рівняння Холла–Петча;  $\lambda$  – товщина феритного прошарку перлітної колонії.

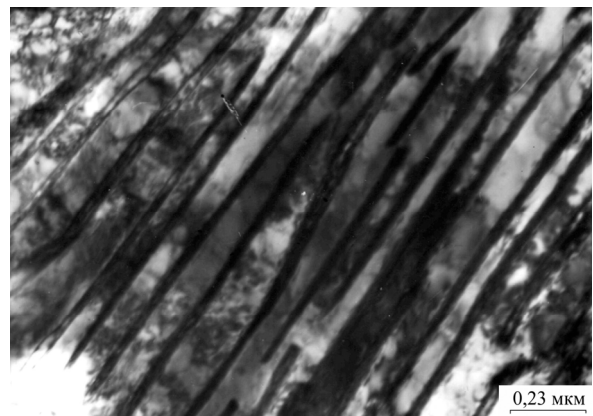


Рис. 3. Дислокаційна чарункова структура перлітної колонії сталі після холодної пластичної деформації прокаткою на 20 %

Таким чином, для низько вуглецевої сталі зниження межі міцності при втомі зі зростанням розміру зерна фериту пов'язане з прискоренням процесу розпаду однорідного розподілу дислокацій на періодичні структури і з подальшим їх вдосконаленням [12]. Для середньо- та високо вуглецевих сталей з перлітною структурою диспергування колоній супроводжується одночасним зменшенням як товщини цементних пластин, так і феритного проміжку між ними. Зменшення товщини феритного прошарку призводить до зменшення довжини вільного пробігу дислокацій в фериті перлиту і, як наслідок цього, до зниження вірогідності блокування їх руху, аж до моменту виходу на міжфаз-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ну поверхню розподілу [13]. При цьому, чим більш тонкі пластини цементиту, тим вищий ступінь пластичної деформації вони можуть витримати без руйнування [1, 2]. Аналогічний вплив диспергування структурних складових можна спостерігати для структур, що сформовані за зсувним або проміжним механізмами [9].

Після чотирьох циклів знакозмінного вигину в чарунковій структурі холоднокатаної сталі можна спостерігати появу ознак розвитку процесів вдосконалення. Підтверджується наведене положення, аналогічно як і для зерен структурно вільного фериту (рис. 1, 2), зниженням накопиченої загальної кількості дислокацій, з одночасним зменшенням ширини субмеж і початком очищення тіла чарунок від незв'язаних дислокацій (рис. 4).

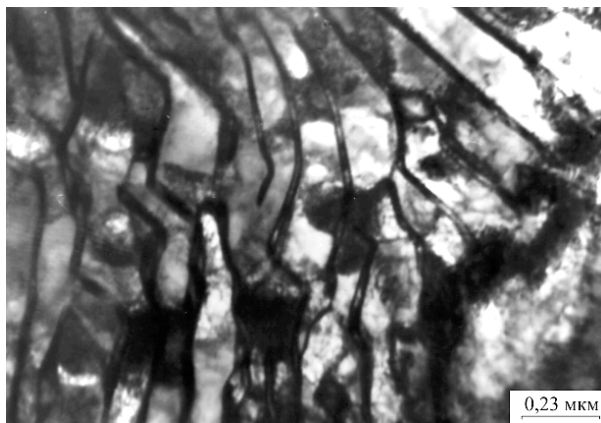


Рис. 4. Дислокаційна чарункова структура перлітної колонії сталі з 0,18 % С після холодної прокатки на 20 % і 4 циклів знакозмінного згину

Таким чином, можна з визначеною впевненістю вважати, що використання знакозмінного деформування, коли ступінь деформації за цикл приблизно дорівнює значенню появи перших ознак не оберненого руху дислокацій, дозволяє знижувати накопичену концентрацію дефектів кристалічної будови. За зовнішніми ознаками впливу на властивості міцності холоднодеформованої вуглецевої сталі представлена обробка (знакозмінне деформування) може вважатися подібною термічним технологіям пом'якшення (нагрів до визначених температур і витримка з подальшим повільним охолодженням). Однак, аналіз структурних змін вказує на існування якісних розбіжностей в порівнянні з термічними технологіями пом'якшення. Дійсно, як свідчать відомі експериментальні дослідження

[1, 4], після нагріву до температур, що обумовлюють аналогічний рівень пом'якшення (як після знакозмінного деформування), спостерігається не тільки зниження накопиченої кількості дефектів кристалічної будови, а і початок розвитку процесів, що призводять до появи зміни морфологічних ознак структурних складових. В першу чергу це стосується цементних пластин перлітної колонії. При нагріванні до температур, приблизно 500 °С, можна знайти підтвердження про початок розвитку процесів сфероїдизації цементних пластин перліту: виникнення локальних звужень, округлення пластин поблизу з границями структурно-вільного фериту та ін. [1]. Таким чином, процес пом'якшення при реверсивному деформуванні якісно відрізняється від термічних технологій і обумовлений взаємодією між дефектами кристалічної будови, що були введені в метал при первинному і наступному навантаженнях.

Другий різновид атермічного пом'якшення холоднодеформованого металу можна спостерігати в результаті дії імпульсів електричного струму з визначеними характеристиками. Піддаючи метал фрагменту ободу залізничного колеса в стані після наклепу по поверхні кочення (рис. 5), електроімпульсній обробці (ЕО), як і в роботі [5, 7], спостерігали зміну геометричних розмірів зразку, в залежності від числа циклів і потужності електричного струму. На підставі цього можна з визначеною впевненістю вважати, що сам процес пом'якшення повинен бути пов'язаний з впливом малих пластичних деформацій на розподіл дислокацій, що сформований попереднім деформуванням (наклепом металу по поверхні кочення). Незбіжність за напрямком дії головних напружень (під час наклепу металу і під дією імпульсів електричного струму) обов'язково повинна привести до зниження накопиченої густини дислокацій. Більше цього, розвиток процесу пом'якшення за рахунок ЕО, якщо порівнювати його з термічними технологіями, має свої відмінності. Дійсно, під час нагрівання і певної витримки, в холоднодеформованому металі відбуваються структурні зміни у визначеній послідовності. Швидкість структурних змін пропорційна температурі нагріву і обумовлена прискоренням процесів дифузійного масопереносу. У більшості випадків процеси пом'якшення зв'язані з формуванням

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

додаткових границь розподілу, зменшенням частки границь з малими кутами разорієнтації, зростанням або зменшенням загальної довжини границь з великими кутами разорієнтації [2].

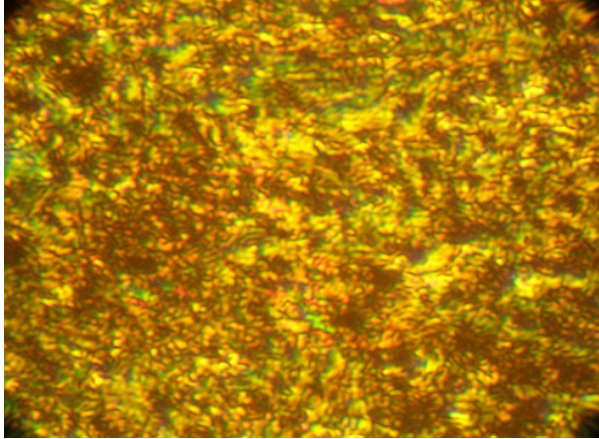


Рис. 5. Структура вуглецевої сталі залізничного колеса в наклепаному стані по поверхні кочення. Збільшення 250

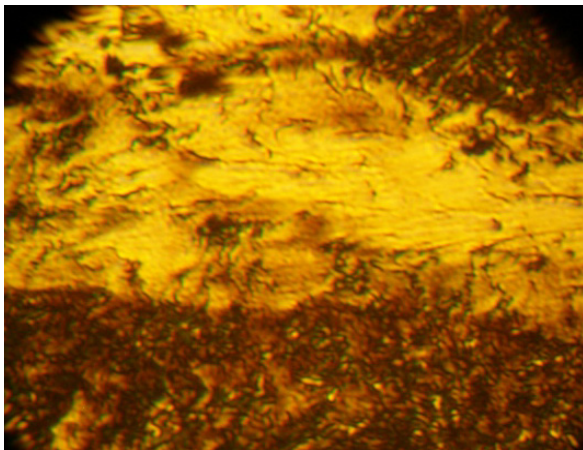


Рис. 6. Структура вуглецевої сталі залізничного колеса в наклепаному стані по поверхні кочення після ЕО. Збільшення 250

Дія імпульсів електричного струму, в залежності від попереднього ступеня деформації металу, призвела до різного рівня зниження твердості. Максимальне пом'якшення (за оцінками твердості) складало приблизно 17 %. За своїм характером указана дія ЕО адекватна ступеню пом'якшення холоднодеформованого металу після нагріву до температур порядку 550...600 °С [1]. Однак, формування достатньо великих ділянок структурно вільного фериту (рис. 6), які практично відсутні в структурі сталі після наклепу (рис. 5), може розглядатися як

свого роду підвищення структурної неоднорідності вуглецевої сталі. Внаслідок таких структурних змін повинне відбуватися зниження пластичних властивостей сталі, особливо чутливими повинні бути характеристики, що визначають опір металу руйнуванню за динамічних умов випробувань: ударна в'язкість при понижених і низьких температурах [1, 8].

Ступінь пом'якшення холоднодеформованого металу підтверджується і змінами параметрів тонко-кристалічної будови. Так, за оцінкою дифракційної лінії (211) під час рентгенівських структурних досліджень густина дислокацій, що накопичена в результаті холодного наклепу металу колеса по поверхні кочення, в результаті ЕО знизилася приблизно на 22...40 %.

Порівняльний аналіз з відомими експериментальними даними [1, 2] показує достатньо добрий збіг ступеню пом'якшення з величиною пластичної деформації і температурою нагріву. У вказаних роботах показано залежність ступеня пом'якшення металу при нагріві у широкому інтервалі змін щодо вмісту вуглецю і величини попередньої пластичної деформації сталі. Для сталі залізничного колеса, з приблизно адекватним ступенем наклепу від холодної деформації, зниженню концентрації накопичених дефектів до рівня 30...40 % відповідає нагрів і витримка терміном 1 год. при температурах 500...550 °С [1].

### Наукова новизна та практична значимість

В роботі представлено узагальнені результати, що стосуються розвитку процесів пом'якшення в холоднодеформованій вуглецевій сталі під час подальшого її знакозмінного навантаження.

Процес пом'якшення наклепаної сталі супроводжується субструктурними змінами, які більшою мірою притаманні зміцненню від холодної пластичної деформації: диспергування дислокаційної чарункової структури, формування нових та переміщення сформованих субмеж.

Впровадження в умовах ремонтної бази залізничних депо технології електричної імпульсної обробки дозволить без застосування нагріву металу досягти необхідного рівня пом'якшення сталі, наклепаної по поверхні кочення

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

залізничного колеса. Наведена обробка дозволить знизити твердість і подовжити термін використання різців при відновленні профілю катання залізничного колеса.

## Висновки

1. Зростання границі міцності при втомі вуглецевої сталі, при подрібненні зерна фериту і диспергуванні перлітної колонії, обумовлене уповільненням процесу формування дислокаційних чарункових структур, зростанням пластичних властивостей цементиту і ускладненням умов досягнення максимально можливої концентрації дефектів кристалічної будови в мікрооб'ємах металу.

2. Електрична імпульсна обробка, холоднодеформованого металу залізничного колеса за характером своєї дії в значному ступені подібна нагріву до визначених температур.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабич, В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
2. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д. : Маковецкий, 2008. – 196 с.
3. Вакуленко, І. О. Зміна твердості металу по верхній кочення залізничних коліс після формування повзуна / І. О. Вакуленко, В. Г. Анофрієв, Ю. Л. Надеждін // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 31. – С. 256–258.
4. Вакуленко, І. О. Про взаємозв'язок структурних перетворень при втомі вуглецевої сталі з особливостями будови поверхонь руйнування / І. О. Вакуленко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 32. – С. 242–245.
5. Вакуленко, І. О. Структурні перетворення в металі залізничного колеса після дії імпульсів електричного струму / І. О. Вакуленко, В. А. Сокірко, О. С. Баскевич // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 160–163.
6. Дефекти залізничних коліс / І. О. Вакуленко, В. Г. Анофрієв, М. А. Грищенко, О. М. Перков. – Д. : Маковецкий, 2009. – 112 с.
7. Изменение механических свойств сварных соединений углеродистых и низколегированных сталей под влиянием электромагнитных воздействий / А. К. Царюк, В. Ю. Скульский, С. И. Моравский, В. А. Сокирко // Автоматическая сварка. – 2008. – № 9. – С. 28–32.
8. Нотт, Дж. Основы механики разрушения // Дж. Нотт. – М. : Металлургия, 1978. – 256 с.
9. Bhadeshia, H. K. D. Bainite in Steels / H. K. D. Bhadeshia. – Cambridge : The University Press, 2001. – 454 p.
10. Breyer, N. N. The yield – point phenomenon in strain – aged martensite / N. N. Breyer // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. – 1966. – Vol. 236, № 8. – P. 1198–1202.
11. Holt, D. L. Dislocation cell formation in metals / D. L. Holt // Journal of Applied Physics. – 1970. – Vol. 41. – P. 3197–3202.
12. Vakulenko, I. A. Mechanism of the effect of the ferrite grain size on the fatigue strength of a low-carbon steel / I. A. Vakulenko, O. N. Perkov, V. G. Razdobreev // Russian Metallurgy (Metally). – 2008. – № 3. – P. 229–231.
13. Vakulenko, I. A. Effect of the morphology and size of iron carbide on the fatigue strength of carbon steels / I. A. Vakulenko, O. N. Perkov // Russian Metallurgy (Metally). – 2008. – № 3. – P. 225–228.

И. А. ВАКУЛЕНКО<sup>1\*</sup>, С. В. ПРОЙДАК<sup>1</sup>, Н. Н. ГРИЩЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. почта dnyzt\_textmat@ukr.net

## ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТЕРМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗУПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Цель.** Целью работы является оценка возможности использования атермических технологий разупрочнения холоднодеформированного металла элементов кузова и колеса железнодорожного вагона. **Методика.** Материалом для исследования были углеродистые стали фрагмента обода железнодорожного колеса,

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

с 0,55 % C, 0,74 % Mn, 0,33 % Si и сталь 20. Сталь железнодорожного колеса исследовали в состоянии после термического упрочнения и холодной деформации после эксплуатации. Сталь 20 исследовали после холодной пластической деформации прокаткой. Электрическую импульсную обработку (ЭО) осуществляли на специальном оборудовании. В качестве характеристики прочности металла использовали твердость по Виккерсу. Исследования микроструктуры осуществляли с использованием светового и электронного микроскопов. **Результаты.** При эксплуатации элементов подвижного состава разного уровня прочности возникли повреждения на металлических поверхностях, обусловленные одновременным действием достаточно сложных нагрузок. Учитывая, что формирование очагов разрушения в значительной степени определяется состоянием объемов металла поблизости от мест максимальных действующих напряжений, разработка технологий снижения темпа накопления дефектов или уровня действующих напряжений, позволит продлить срок работы элементов подвижного состава. После электрической импульсной обработки (ЭО) фрагмента обода колеса изменениям твердости отвечали закономерные изменения внутреннего строения металла. Пропорционально росту степени холодной деформации прокаткой прочность низкоуглеродистой стали растет. Знакопеременный изгиб холоднодеформированного листового проката сопровождается снижением прочности, которое обусловлено изменениями субструктуры металла. **Научная новизна.** Процесс разупрочнения наклепанной стали сопровождается субструктурными изменениями, какие в большей степени соответствуют развитию упрочнения от холодной пластической деформации: диспергирование дислокационной ячеистой структуры, формирование новых и перемещение сформированных субграниц. **Практическая значимость.** Внедрение в условиях ремонтной базы железнодорожных депо технологии электрической импульсной обработки позволит без применения нагрева металла достичь требуемого уровня разупрочнения наклепанной по поверхности катания стали железнодорожного колеса. Приведенная обработка позволит снизить твердость металла и продлить срок использования резцов при восстановлении профиля катания железнодорожного колеса.

*Ключевые слова:* углеродистая сталь; железнодорожное колесо; твердость; субструктура; электрическая импульсная обработка; знакопеременный изгиб

I. A. VAKULENKO<sup>1\*</sup>, S. V. PROYDAK<sup>1</sup>, N. N. GRISCHENKO<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Materials Technology», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail dnyzt\_textmat@ukr.net

## USE PROSPECT OF THE OF ATHERMIC TECHNOLOGIES OF METAL SOFTENING FOR ROLLING STOCK ELEMENTS

**Purpose.** The purpose of work is the possibility estimation of athermic technologies use of cold-deformed metal softening for elements of railway car body and wheel. **Methodology.** The material for research is the carbon steel of the wheel rim fragment containing 0,55 % C, 0,74 % Mn, 0,33 % Si, and the steel 20. The wheel steel is studied after heat strengthening and cold work after operation. Steel 20 is studied after plastic cold work by rolling. Electric pulse treatment (ET) is carried out on the special equipment. As the property of metal strength the Vickers hardness number is used. The microstructure research is carried out using the light and electronic microscope. **Findings.** During operation of the rolling stock elements with different strength level origin of damages on metallic surfaces is caused by a simultaneous load action. Taking into account that forming of breakdown sites is largely determined by the state of metal volumes nearby the places of maximal active voltages, the technology development of defect accumulation slowdown or the level of active voltages development allow one to prolong the operating term of rolling stock elements. After electric pulse treatment of the wheel rim fragment the regular changes of metal internal structure corresponded to the hardness changes. The hardness of low carbon steel increases proportional to the increase of the level of cold work by rolling. Alternating bending of the cold-deformed flat is accompanied by strength decrease, which is caused by the metal substructure changes. **Originality.** The softening process of the cold-worked steel is accompanied by substructure changes, which to a greater extent correspond to the hardening development from the plastic cold-work: dispersion of the dislocation cellular structure, formation of the new sub boundaries and displacement of the formed sub boundaries. **Practical value.** Introduction of electric pulse treatment in the conditions of railway depots repair base allow one to attain the required level of softening of the cold-worked steel on the wheel thread of railway wheel without heating of metal. The given treatment reduces the metal hardness and prolongs the term of incisors use during the renovation of the rolling profile of the railway wheel

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

*Keywords:* carbon steel; railway wheel; hardness; substructure; electric pulse treatment; alternating bending

## REFERENCES

1. Babich V.K., Gul Yu.P., Dolzhenkov I.Ye. *Deformatsionnoye starenie stali* [Strain aging of the steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 320 p.
2. Vakulenko I.A., Bolshakov V.I. *Morfologiya struktury i deformatsionnoye uprochneniye stali* [Morphology of structure and cold hardening of the steel]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2008. 196 p.
3. Vakulenko I.O., Anofriiev V.H., Nadezhdin Yu.L. Zmina tverdosti metalu po poverkhni kochennia zaliznychnykh kolis pislia formuvannia povzuna [Change of metal hardness on the wheel thread after flat spot forming]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2010, issue 31, pp. 256-258.
4. Vakulenko I.O. Pro vzaiemozviazok strukturnykh peretvoren pry vtomi vuhletsevoi stali z osoblyvostiamy budovy poverkhon ruinuвання [On interrelation of structural transformations during the carbon steel fatigue with peculiarities of the break surface]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2010, issue 32, pp. 242-245.
5. Vakulenko I.O., Sokirko V.A., Baskevych O.S. Strukturni peretvorennia v metali zaliznychnoho koleasa pislia dii impulsiv elektrychnoho strumu [Structural transformations in railway wheel metal after electric current impulse]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2012, issue 42, pp. 160-163.
6. Vakulenko I.O., Anofriiev V.H., Hryshchenko M.A., Perkov O.M. *Defekty zaliznychnykh kolis* [Railway wheels defects]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2009. 112 p.
7. Tsaryuk A.K., Skulskiy V.Yu., Moravskiy S.I., Sokirko V.A. Izmeneniye mekhanicheskikh svoystv svarynykh soyedineniy uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley pod vliyaniyem elektromagnitnykh vozdeystviy [Mechanical properties change of welded connections of carbon and low-alloyed steels under the influence of electromagnetic effect]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic welding*, 2008, no. 9, pp. 28-32.
8. Nott Dzh. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Foundations of the fracture mechanics]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 256 p.
9. Bhadeshia H.K.D. Bainite in Steels. Cambridge, The University Press Publ., 2001. 454 p.
10. Breyer N.N. The yield – point phenomenon in strain – aged martensite. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 1966, vol. 236, no. 8 pp.1198-1202.
11. Holt D.L. Dislocation cell formation in metals. *Journal of Applied Physics*, 1970, vol. 41, pp. 3197-3202.
12. Vakulenko I.A., Perkov O.N., Razdobreyev V.G. Mechanism of the effect of the ferrite grain size on the fatigue strength of a low-carbon steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2008, no. 3, pp. 229-231.
13. Vakulenko I.A., Perkov O.N. Effect of the morphology and size of iron carbide on the fatigue strength of carbon steels. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2008, no. 3, pp. 225-228.

Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. Л. І. Котовою (Україна); к.т.н., доц. О. О. Чайковським (Україна)

Поступила у редколегію 03.04.2013

Прийнята до друку 04.06.2013

## УДК 625.1.032:539.3

А. Я. КУЛІЧЕНКО<sup>1</sup>, М. О. КУЗІН<sup>1\*</sup>, І. О. ВАКУЛЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевича 12 а, 79052, Львів, Україна, тел. +38 (093) 741 51 27, ел. пошта kulan47@mail.ru

<sup>1\*</sup>Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевича 12 а, 79052, Львів, Україна, тел. +38 (050) 170 28 18, ел. пошта n\_kuzin@mail.ru

<sup>2</sup>Каф. «Технологія матеріалів», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (095) 79 58 124, ел. пошта dnuzt\_texmat@ukr.net

## ОЦІНКА ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ КОНТАКТУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТРИБОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ «КОЛЕСО–РЕЙКА»

**Мета.** Сучасні уявлення про контактну взаємодію тіл в умовах тертя ґрунтуються на моделях, які враховують геометричні параметри приповерхневих шарів складових трибо-систем. Дані моделі дозволяють із високим рівнем адекватності описувати особливості рельєфу поверхонь деталей та їх вплив на експлуатаційні характеристики вузлів тертя в умовах пружних навантажень. Разом із тим можливість появи пластичних деформацій, особливо перед початком експлуатації фрикційних систем, дані моделі не враховують. Метою даної роботи є розробка нових математичних підходів опису попередньо прикладених деформацій та їх вплив на експлуатаційні характеристики трибо-систем. **Методика.** Із використанням підходів контактної механіки проведено аналіз впливу попереднього навантаження на контактування плоских шорстких поверхонь із використанням моделі, яка ґрунтується на припущеннях про нормальний розподіл висот мікронерівностей і пластичного деформування при першому навантаженні. **Результати.** Аналітично встановлено, що при помірному зниженні тиску порівняно із початковим фактична площа контакту є пропорційною тиску у відношенні 2/3. **Наукова новизна.** Встановлено, що розмір плями контакту є пропорційним тиску першого навантаження. **Практична значимість.** Показано, що при тисках, менших ніж початково прикладені до контактуючих поверхонь, характерними є більші значення фактичної поверхні контакту, число плям фактичного контакту, ніж для тих же тисків при першому навантаженні.

*Ключові слова:* мікроступ; шорсткість; контакт; деформація; навантаження

### Вступ

**Постановка задачі у загальному вигляді.** Технічний стан елементів верхньої і нижньої будови залізничної колії повинен відповідати вимогам нормативних документів, які діють на залізничному транспорті України, постійно гарантуючи надійність та безпеку перевезень пасажирів і вантажу.

Контроль технічного стану колії проводиться шляхом систематичного огляду і вимірювань засобами спеціальної апаратури. Для виявлення дефектів у рейках колії використовуються дефектоскопні візки і вагони, обладнані електромагнітними та ультразвуковими дефектоскопами. Дефекти рейок, що виникають внаслідок розвитку процесів стомленості під впливом багаторазових навантажень, які передаються на рейки від надресорної будови вагонів і локомотивів, поділяються на дев'ять груп, детально наведених у спеціальних таблицях [10]. Одним

із видів дефектів рейок є якісні показники їх поверхні, що безпосередньо контактують із колесами засобів рухомого складу залізниці [2].

Характеристики якісних показників поверхневого шару поділяються на геометричні та фізико-механічні. Під геометричними параметрами поверхні слід розуміти параметри шорсткості, хвилястості та макровідхилення на контактуючих поверхнях, які в комплексі приводять до дискретності їх контакту і диференціації площин контакту на фактичну  $A_f$ , контурну  $A_c$  та номінальну  $A_d$ . Максимально можлива площа контакту без врахування шорсткості, хвилястості та макровідхилення вважається геометричною площиною контакту  $A$ . Контактуювання поверхонь колеса із рейкою відбувається по фактичній площині контакту  $A_f$ , обумовлених присутністю на поверхнях шорсткості,

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

параметри якої нормалізовані згідно ГОСТ 2789-83.

**Мета****Аналіз останніх досліджень і публікацій.  
Постановка проблеми.**

Останнім часом проведено ряд досліджень в області опису мікрогеометрії поверхонь та їх поведінки при контакті, де наведено, що мікрогеометрія поверхонь може бути описана за допомогою розподілу Гауса [6, 7]. У даних працях показано, що параметри шорсткості поверхні можуть визначатися двома параметрами: середньоквадратичним відхиленням ординати профілю  $\sigma$  та інтервалом кореляції  $\beta^*$ . Останній параметр представляється ще й як середній тангенс кута нахилу одиначної мікронерівності  $\operatorname{tg} \theta$ , пов'язаний із  $\sigma$  та  $\beta^*$  залежністю  $\operatorname{tg} \theta \approx (\sigma / \beta^*)$ .

Фактична площа контакту поверхонь колеса і рейки становить малу частину номінальної поверхні (від 5 до 12%). Суттєвий вплив на формування розмірів фактичної площі вносить пластичне деформування її мікровиступів, що підпорядковується залежності:

$$\frac{A_r}{A_a} = \frac{p}{H}, \quad (1)$$

де  $p$  та  $H$  – тиск на поверхню та, відповідно, твердість її матеріалу.

Хоча для окремого мікровиступу в межах пружних деформацій площа поверхні контакту прямо пропорційно залежить від навантаження, під час застосування ряду спрощених моделей виступів можна вважати, що залежність сумарної фактичної поверхні контакту від навантаження наближається до лінійної.

**Методика****Викладення основного матеріалу.**

У поданій роботі розглядається вплив попередньо прикладеного навантаження на параметри контактування поверхні при нормальному розподілі висот мікронерівностей та пластичному деформуванні мікровиступів при першому навантаженні, оскільки вважається, що при такому навантаженні деформації мікровиступів є повністю пластичними. При зменшенні тиску або при його повторному підвищенні деформа-

ції мікровиступів будуть пружними (а, відповідно, зворотніми), що обумовлює явище зростання площі фактичного контакту. Взагалі, результати досліджень впливу попереднього навантаження розглядались як ефект гістерезису.

Згідно представленої моделі контактування у даній публікації зроблена спроба отримання розрахункових залежностей для площі фактичного контакту, кількості одиничних плям контакту окремих мікронерівностей та їх розподілу за розмірами.

Для першого навантаження, коли під впливом певного навантаження дві шорсткі поверхні контактують і притискуються одна до одної (в даному випадку це поверхні ободу колеса і рейки), зусилля навантаження розподіляється на доволі обмежену кількість плям фактичного контакту. Приймаючи деформації мікровиступів пластичними, можна вважати справедливим для поверхні фактичного контакту вираз (1). При нормальному законі розподілу висот мікронерівностей зв'язок фактичної площі контакту із параметрами мікрогеометрії контактуючих поверхонь описується рівнянням

$$\frac{A_r}{A_a} = 0,5 \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{\eta}{\sqrt{2}} \right); \quad \eta \equiv \frac{Y}{\sigma}, \quad (2)$$

де  $Y$  – відстань між середніми площинами зон шорсткості контактуючих поверхонь;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення ординат ( $y_1 + y_2$ ) спільного поля мікронерівностей двох поверхонь.

Аналіз результатів роботи [6] приводить до висновку, що кількість плям контакту і сума всіх радіусів плям контакту (які апроксимуються колами) можуть виражатись параметрами мікрогеометрії наступним чином:

$$\bar{n} = n \frac{\sigma^2}{\operatorname{tg}^2 \theta} = \frac{1}{16} \frac{\exp(-\eta^2)}{\operatorname{erfc} \left( \frac{\eta}{\sqrt{2}} \right)}; \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{\operatorname{tg} \theta} \sum \frac{a_i}{A_a} = \frac{1}{4} \frac{\exp \left( \frac{\eta^2}{2} \right)}{\sqrt{2\pi}}, \quad (4)$$

де  $\alpha$  – радіус одиначної плями фактичного контакту.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Величина  $\operatorname{tg} \theta$  характеризує середнє значення нахилу мікронерівності спільного профілю, утвореного двома контактуючими поверхнями.

## Результати

Розглядаємо початковий контакт – дотикання двох контактуючих поверхонь під час набіганні колеса на рейку (рис. 1).

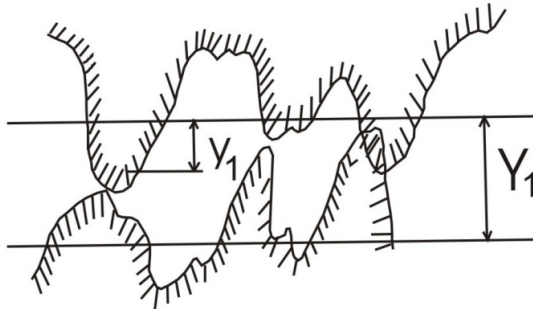


Рис. 1. Мікропрофіль контактуючих поверхонь

Нехай відстань між середніми площинами зон шорсткості рівна  $Y_1$ . Тоді при  $y_1 + y_2 > Y_1$  поверхні перебувають у стані контакту. Еквівалентом слід вважати контактування двох поверхонь: абсолютно згладженої і шорсткої, причому ордината профілю шорсткої поверхні характеризується значеннями  $(y_1 + y_2)$  з відповідним розподіленням.

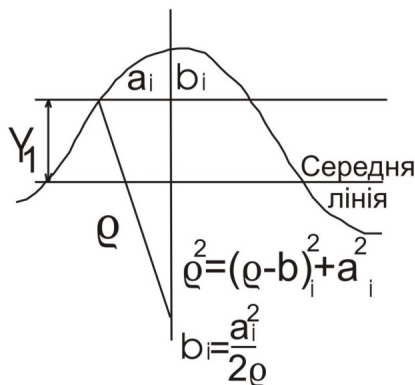


Рис. 2. Одиначний мікроступ

Мікроступи, які при  $Y_1$  перебувають у контакті, утворюючи площинку плями дотику радіусом  $a_i$ , вступають у контакт до того, як до поверхні було прикладене будь-яке навантаження, коли відстань між середніми площина-

ми становить  $(Y_1 + a_i^2)/\rho$  (рис. 2), де  $\rho$  – радіус кривизни при вершині мікроступу.

Приймаємо умову, що значення  $\rho$  є однако-вим для всіх одиничних контактів, що виникали при накочуванні колеса і розташовані на однакових відстанях. Таким чином,  $\rho$  є функцією від  $Y$ , де  $\rho(Y)$  є радіусом кривизни мікроступів, які контактують при відстані  $Y$  між поверхнями. Величина  $\rho$  розраховується за формулами, наведеними на рис. 2.

Із рис. 2 видно, що для початкового контакту поверхонь можна записати:

$$(\pi \cdot a_i^2)_I = 2\pi \rho \cdot (b_i)_I. \quad (5)$$

При зближенні поверхонь після цього на додаткову відстань  $\Delta Y$  рівняння (5) набуває вид:

$$(\pi \cdot a_i^2)_{II} - (\pi \cdot a_i^2)_I = 2\pi \rho \cdot [(b_i)_{II} - (b_i)_I] = 2\pi \rho \Delta Y. \quad (6)$$

Інтегруючи дане відношення для всіх плям контакту і поділивши на  $\Delta Y$  за умови, що  $\Delta Y \rightarrow 0$ , отримаємо:

$$\lim_{\Delta Y \rightarrow 0} \frac{A_{rII} - A_{rI}}{\Delta Y} = \frac{d\left(\frac{A_r}{A_a}\right)}{dY} = 2\pi \int_0^\pi \rho dn, \quad (7)$$

де  $n$  – кількість плям фактичного контакту на одиниці номінальної поверхні.

Через безрозмірний параметр зближення  $\eta$  цей вираз можна записати:

$$\frac{d\left(\frac{A_r}{A_a}\right)}{d\eta} = 2\pi \sigma \int_\eta^\infty \rho \frac{dn}{d\eta} d\eta. \quad (8)$$

Продиференціювавши останній вираз по  $\eta$ , отримаємо:

$$\frac{d^2\left(\frac{A_r}{A_a}\right)}{d\eta^2} = -2\pi \sigma \rho \frac{dn}{d\eta}, \quad (9)$$

або разом із виразами (2) і (3)

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$$\bar{\rho} \equiv \frac{\rho}{\sigma} \operatorname{tg}^2 \theta = \frac{\eta}{(2\pi)^{3/2}} \frac{\exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right)}{\bar{n}'}, \quad (10)$$

де

$$\bar{n}' \equiv \frac{\sigma^2}{\operatorname{tg}^2 \theta} \frac{dn}{d\eta} = \frac{1}{8} \frac{\exp(-\eta^2)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{\sqrt{2}}\right)} \cdot \left[ \eta - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{\sqrt{2}}\right)} \right] \quad (11)$$

Зміни параметрів  $\bar{\rho}$  та  $\bar{n}'$  графічно відображені на рис. 3.

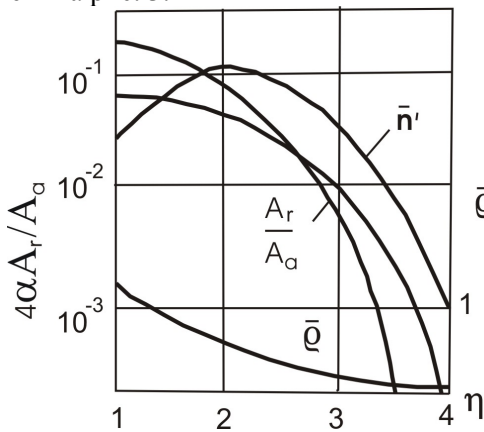


Рис. 3. Залежність параметрів поверхні контакту від  $\eta$

При заданій відстані  $\eta_1$  між середніми площинами контактуючих поверхонь на одиниці номінальної поверхні кількість плям контакту, радіус яких знаходиться в інтервалі між  $a_i$  та  $(a_i + da_i)$ , визначається як  $\varphi(a_i)da_i$ , де

$$\varphi(a_i) = - \left\{ \left[ \frac{dn}{d\eta} \right]_{\eta + \frac{a_i^2}{2\rho\sigma}} \right\} \frac{d\left(\frac{a_i^2}{2\rho\sigma}\right)}{da_i}. \quad (12)$$

Величина радіусу кривизни  $\rho$  при вершині мікроступу представлена у період до навантаження, тобто в момент входу даної площини поверхні колеса у контакт із рейкою. Кількість плям контакту, які виникають між  $\eta$  і  $(\eta + d\eta)$ ,

де  $\eta = \eta_1 + \frac{a_i^2}{2\rho\sigma}$ , можна визначити з наступної формули:

$$-\frac{dn}{d\eta} d\eta = -\frac{dn}{d\eta} d\left(\frac{a_i^2}{2\rho\sigma}\right). \quad (13)$$

Відношення  $\left(\frac{dn}{d\eta}\right)$  слід оцінювати при  $\left(\eta_1 + \frac{a_i^2}{2\rho\sigma}\right)$ . Аналогічно кількість плям контакту радіусом від  $a_i$  до  $(a_i + da_i)$  буде рівною  $\varphi(a_i)da_i$ , де

$$\varphi(a_i) = -\frac{dn}{d\eta} \frac{dn}{da_i} = -\frac{dn}{d\eta} \frac{d\left(\frac{a_i^2}{2\rho\sigma}\right)}{da_i}. \quad (14)$$

У відповідності із прийнятою нами моделлю, очікуване значення  $\rho$  для кожної одиничної плями на контакті визначається відстанню між середніми площинами поверхонь у положенні, коли контакт лише починає формуватися. Внаслідок цього всі контакти, утворені на даному рівні між двома середніми площинами, будуть мати однакові радіуси кривизни (сумісного профілю). Отже,  $\rho$  може бути виражений як функція  $\eta$ , де  $\eta$  характеризує відстань між середніми площинами в момент виникнення контакту.

При заданому максимальному навантаженні на поверхню розподілу  $p_1$  неважко визначити відповідні цьому тиску відносну площу фактичної поверхні контакту  $(A_r/A_a)_1$ .

Кількість плям контакту на одиниці номінальної поверхні контакту  $p_1$  та безрозмірну відстань між середніми площинами контактуючих поверхонь  $\eta_1$ . Якщо тепер зменшити навантаження до якогось значення  $p$ , меншого від  $p_1$ , то відстань між середніми площинами збільшиться на деяку величину  $\xi$  так, що нова відстань між площинами буде характеризуватися безрозмірною величиною  $(\eta_1 + \xi/\sigma)$ . Радіус одиничної плями контакту при вершині мікроступу, рівний  $a_{i1}$ , при  $p = p_1$ , після зняття

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

навантаження, зменшиться і стане рівним  $a_i$ . Нові значення відносної площі контакту  $(A_r/A_a)$  і кількість плям контакту  $n$  на одиницю номінальної поверхні буде менше відповідних значень  $(A_r/A_a)_1$  та  $n_1$  при першому навантаженні.

Процес переходу  $p_1 \rightarrow p$  при  $p < p_1$  у відповідності із прийнятою нами моделлю є зворотним, тобто можна відновити перше положення системи збільшенням навантаження до  $p_1$ . Практичне виконання такого відновлення здійснюється при повному оберті (прокочуванні) колеса, хоча цілісного відновлення процесу не відбудеться, оскільки дана площа контакту на поверхні колеса буде повторно контактувати вже з іншою поверхнею рейки.

Для двох контактуючих мікрорівнів у положенні 1 (що відповідає максимальному навантаженню  $p_1$ ) середній тиск на одиничній площині контакту площею  $(\pi \cdot a_i^2)_1$  рівний  $H$ . Згідно прийнятої моделі зворотного контакту для навантажень, менших від  $p_1$ , визначаємо, як змінюються радіус площини контакту при вершині мікрорівня  $a_i$  та середнє навантаження  $p_i$ , що припадають на одиницю площі поверхні площинки контакту  $(\pi \cdot a_i^2)$ , під час збільшення відстані між середніми площинами на величину  $\xi$ .

Отже, розглядаємо варіант контакту двох мікрорівнів під час їх максимального навантаження. Припускаючи, що під час зниження навантаження (збільшення відстані між поверхнями) відбуваються пружні деформації, і, вважаючи, що форма мікрорівнів є сферичною (поблизу контакту), для визначення залежності різних параметрів контакту від переміщення мікрорівнів по відношенню до положення 1 застосовуємо теорію Герца.

Радіус плями дотику  $a_i$  згідно з теорією Герца [1], пов'язаний з навантаженням  $W_i$  залежністю:

$$a_i^2 = W_i^{3/2} \cdot \frac{1}{2\pi} \frac{R_i^{3/2}}{E}, \quad (15)$$

де  $R_i = \frac{2R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$  та

$$(\pi \cdot \bar{E}) \equiv \frac{4}{3} \frac{E_1 \cdot E_2}{(1 - \nu_1^2) \cdot E_2 + (1 - \nu_2^2) \cdot E_1}, \quad \text{де, в свою}$$

чергу:  $R_1$  та  $R_2$  – радіуси кривизни контактуючих мікрорівнів у ненавантаженому стані;  $E_1$  та  $\nu_1$  – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу колеса;  $E_2$  та  $\nu_2$  – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу рейки.

Переміщення  $\Delta C$ , встановлене відносно положення, яке відповідає нульовому навантаженню, для окремо взятого контакту може виражатися наступною залежністю:

$$\Delta C = \sqrt[3]{W_i^2} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{(\pi \cdot \bar{E})^2}} \cdot \sqrt[3]{\frac{2}{R_i}}. \quad (16)$$

Із залежностей (15) і (16) середній тиск на площині контакту двох мікрорівнів визначається як

$$P_{ci} \equiv \frac{W_i}{\pi \cdot a_i^2} = \bar{E} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta C_i}{R_i}}. \quad (17)$$

Крім того, із наведених виразів (15) та (16) одержуємо:

$$a_i^2 = 0,5 \cdot \Delta C_i \cdot R_i \quad (18)$$

У відповідності із прийнятою умовою (17) одержано можливість встановлення відстані між поверхнями, при якій із зменшенням тиску контакт двох мікрорівнів припиняється:

$$\Delta C_{i1} = \frac{H^2}{E^2} \cdot \frac{R_i}{2}. \quad (19)$$

Переміщення  $\xi$  із положення 1 в напрямку зменшення навантаження пов'язано з переміщенням, яке встановлене по відношенню до нульового навантаження наступним відношенням:

$$\Delta C_i = \Delta C_{i1} - \xi \quad (20)$$

У відповідності із цим та залежностями (18)–(20) після певних математичних перетворень одержуємо:

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$$a_i^2 = a_{i1}^2 \cdot \left(1 - \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H}\right), \text{ при } \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H} \leq 1; \quad (21)$$

$$a_i = 0, \text{ при } \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H} > 1; \quad (22)$$

$$\frac{P_{ci}}{H} = \frac{a_i}{a_{i1}} = \sqrt{1 - \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H}}, \text{ при } \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H} \leq 1, \quad (23)$$

$$P_{ci} = 0, \text{ при } \frac{\xi \cdot \bar{E}}{a_{i1} \cdot H} > 1. \quad (24)$$

Із відношення (23) виходить, що всі одиничні площинки контакту, радіус яких у положенні 1 не менше  $(\xi \cdot \bar{E} / H)$ , в новому положенні не будуть перебувати в контакті. На основі цього відношення під час розподілення розмірів одиничних площинок контакту у положенні 1 формулою (12) можна встановити зв'язок різних параметрів контактування із переміщенням у відповідності із наступними залежностями (представленими у безрозмірній формі):

$$\alpha = 2\sqrt{2} \cdot \int_Z^\infty \sqrt{\bar{\rho}} \cdot \bar{n}' \cdot X^2 \cdot \sqrt{1 - \frac{Z}{X}} dX; \quad (25)$$

$$\frac{P}{H} = 4\pi \cdot \int_Z^\infty \bar{\rho} \cdot \bar{n}' \cdot X^3 \cdot \left(1 - \frac{Z}{X}\right) \cdot \sqrt{1 - \frac{Z}{X}} dX; \quad (26)$$

$$\frac{A_r}{A_a} = 4\pi \cdot \int_Z^\infty \bar{\rho} \cdot \bar{n}' \cdot X^3 \cdot \left(1 - \frac{Z}{X}\right) dX; \quad (27)$$

$$\bar{n} = \bar{n}'_1 - 2 \int_0^Z \bar{n}' \cdot X dX, \quad (28)$$

$$\text{де } X \equiv \frac{a_{i1}}{\sqrt{2\rho\sigma}}, \quad Z \equiv \frac{\xi \cdot \bar{E}}{H \cdot \sqrt{2\rho\sigma}},$$

$$\bar{n}' \equiv -\frac{\sigma^2}{\text{tg}^2 \theta} \cdot \left[ \frac{dn}{d\eta} \right]_{(\eta_1 + X^2)}.$$

У приведених виразах  $\rho$  визначається для  $(\eta_1 + X^2)$ .

Залежності (25)–(27) зв'язують параметри, необхідні для оцінки переміщення  $Z$ , а рівняння (26) зв'язує  $\rho$  із  $Z$ . При умові що  $Z = 0$ , із (25)–(27) отримуємо параметри, які відповіда-

ють максимальному тиску  $p_1$  на поверхні контакту. В такому випадку вирази (27) і (28) стають ідентичними і відображають відношення (1) для пластичного деформування. Крім того, підстановка  $\bar{\rho}$  із (27) при  $Z = 0$  призводить до виразу (2).

### Наукова новизна та практична значимість

Аналіз аналітично отриманих виразів, графічно відображених на рис. 4, підтверджує, що відносна площа  $(A_r/A_{r1})$ , представлена як функція відношення  $(p/p_1)$ , де  $A_{r1}$  – фактична площа контакту при максимальному тиску. При підвищенні тиску із зростанням навантаження на зону контакту «колесо-рейка», у процесі першого навантаження у відповідності з припущенням про пластичне деформування, величина  $A_r$  є пропорційною тиску.

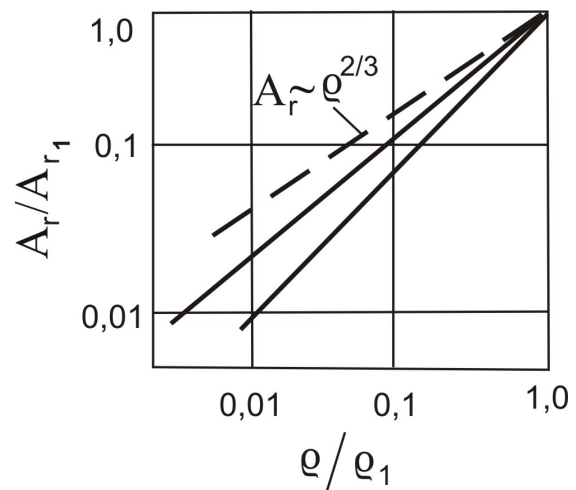


Рис. 4. Залежність відносної площі поверхні фактичного контакту від тиску

### Висновки

Для дослідження впливу попереднього навантаження на контактування поверхонь «колесо-рейка» із певним показником шорсткості даних поверхонь застосовувалась теоретична модель, що ґрунтувалась на нормальному розподіленні висоти мікронерівностей (поверхні приймаються гауссовими) і пластичному деформуванню під час першого навантаження. Встановлено, що при помірного зменшенні навантаження (тиску в зоні контакту) у порівнюванні з початковим (в межах  $1 > p/p_1 > 0,5$ ) фактична

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

площа контакту є пропорційною тиску в відношенні  $2/3$ . При зменшенні тиску  $p$  у зоні контакту, тобто при поступовому перекочуванні колеса з певної області на поверхні рейки, ця площа змінюється сильніше – при зміні  $p$  у межах одного порядку фактична поверхня контакту в середньому пропорційна  $p^{3/4}$ .

Взагалі за результатами проведених досліджень слід констатувати, що нетривалий (до часу), нерухомий контакт робочих поверхонь «колеса-рейки» при певному (початковому) навантаженні супроводжується явищем пружно-пластичного деформування матеріалів цих поверхонь. Із збільшенням навантаження на зону контакту, що відбувається у процесі вантажних операцій засобів залізничного транспорту, і нерухомого перебування у такому положенні відбуватиметься процес пластичного деформування контактних поверхонь, що супроводжується руйнуванням залізничних рейок.

Питання збереження в належному технічному стані рейкового полотна в зоні проведення вантажних транспортних операцій і терміну їх тривалості є доволі важливими і заслуговують уваги фахівців-експлуатаційників залізничного транспорту. Розробка практичних рекомендацій із порушеного питання вимагає окремих додаткових досліджень науковців [3, 8, 9, 11–13].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров, В. М. Введение в механику контактных взаимодействий / В. М. Александров, М. И. Чебаков. – Ростов н/Д. : Изд-во ООО «ЦВВР», 2007. – 114 с.
2. Вакуленко, І. О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу / І. О. Вакуленко. – Д. : Маковецький, 2012. – 152 с.
3. Волков, И. А. Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И. А. Волков, Ю. Г. Коротких. – М. : Мир, 1984. – 624 с.
4. Кузін, М. О. Математичне моделювання параметрів втомної міцності структурно-неоднорідних металічних систем / М. О. Кузін, Т. М. Мещерякова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 38. – С. 213–219.
5. Кузін, О. А. Роль структури в процесах зношування ферито-перлітних сталей / О. А. Кузін, Т. М. Мещерякова, М. О. Кузін // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 224–229.
6. Куліченко, А. Я. Методика визначення якісних характеристик поверхні металу, обробленої інструментом з гнучкими робочими елементами / А. Я. Куліченко // Транспортні системи і технології : зб. наук. праць. – Київ, 2007. – Вип. 11. – С. 67–69.
7. Куліченко, А. Я. Оптимізація параметрів точності при виготовленні та ремонті деталей засобів транспорту / А. Я. Куліченко // Заліз. трансп. України. – 2008. – № 1 – С. 38–39.
8. Прочность материалов и конструкций / Под ред. В. Т. Трошенко. – К. : Академперіодика, 2005. – 1088 с.
9. Сокол, Э. Н. Железнодорожно-транспортное происшествие и его механизм / Э. Н. Сокол. – Львов : Паіс, 2011. – 376 с.
10. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянц. – М. : Транспорт, 1987. – 479 с.
11. Modeling and simulation in engineering / Edited by Catalin Alexandru. – Rijeka, 2012. – 312 p.
12. Popov, V. Contact Mechanics and Friction / V. Popov. – Springer, 2010. – 368 p.
13. Zavarise, G. Trends in Computational Contact Mechanics / G. Zavarise, P. Wriggers. – Springer, 2011. – 354 p.

А. Я. КУЛИЧЕНКО<sup>1</sup>, Н. О. КУЗИН<sup>1\*</sup>, И. А. ВАКУЛЕНКО<sup>2</sup>

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

<sup>1\*</sup> Каф. «Подвижной состав и путь», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевича 12 а, 79052, Львов, Украина, тел. +38 (050) 170 28 18, эл. почта n\_kuzin@mail.ru

<sup>2</sup> Каф. «Технология материалов», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (095) 795 81 24, эл. почта dnuzt\_textmat@ukr.net.

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНТАКТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО–РЕЛЬС»

**Цель.** Современные представления о контактном взаимодействии тел в условиях трения основываются на моделях, которые учитывают геометрические параметры приповерхностных слоев составляющих трибо-систем. Данные модели позволяют с высокой степенью адекватности описывать особенности рельефа поверхностей деталей и их влияние на эксплуатационные характеристики узлов трения в условиях упругих нагрузок. Вместе с тем возможность появления пластических деформаций в поверхностных слоях, особенно перед началом эксплуатации фрикционных систем, данные модели не учитывают. Целью данной работы является разработка новых математических подходов учета предварительно приложенных деформаций и их влияние на эксплуатационные характеристики трибо-систем. **Методика.** С использованием подходов контактной механики проведен анализ влияния предварительной нагрузки на контактирование плоских шероховатых поверхностей с использованием модели, основанной на предположениях о нормальном распределении высот микронеровностей и пластического деформирования при первой нагрузке. **Результаты.** Аналитически установлено, что при умеренном снижении давления по сравнению с исходным, фактическая площадь контакта пропорциональна давлению в отношении 2/3. **Научная новизна.** Установлено, что размер пятна контакта пропорционален давлению первой нагрузки. **Практическая значимость.** Показано, что при давлениях, меньших, чем изначально приложенные к контактирующим поверхностям, характерны большие значения фактической поверхности контакта, число пятен фактического контакта, чем для тех же давлений при первой нагрузке.

**Ключевые слова:** микровыступ; шероховатость; контакт; деформация; нагрузка

A. J. KULICHENKO<sup>1</sup>, N. O. KUZIN<sup>1\*</sup>, I. O VAKULENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dep. "Rolling stock and track", Lviv branch office, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych Str., 12 а, 79052, Lviv, Ukraine, tel. + 38 (093) 741 51 27, e-mail kulan47@mail.ru

<sup>1\*</sup>Dep. "Rolling stock and track", Lviv branch office, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, I. Blazhkevych Str., 12 а, 79052, Lviv, Ukraine, tel. + 38 (050) 170 28 18, e-mail n\_kuzin@mail.ru

<sup>2</sup>Dep. "Materials technology", Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. + 38 (095) 79 58 124, e-mail dnuzt\_textmat@ukr.net

## EVALUATION OF QUALITY INDICATORS CONTACTING THE SURFACE OF THE TRIBOLOGICAL SYSTEM «WHEEL–RAIL»

**Purpose.** Modern ideas about the contact interaction of bodies in friction are based on models that take into account the geometric parameters of the surface layers constituting tribosystems. These models provide a high level of adequacy to describe the features of the relief of the surfaces of parts and their impact on the performance characteristics of friction in the elastic stresses. However, the possibility of plastic deformations in the surface layers, particularly before using friction systems, these models do not account for. The aim of this work is the development of new mathematical approaches previously applied accounting strains and their effect on the performance of tribosystems. **Methodology.** Using the contact mechanics approaches analyzed the influence of

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

preload on contacting a flat rough surfaces using a model based on the assumption of normal distribution of heights and roughness of plastic deformation at the first load. **Findings.** Analytically determined that under moderate pressure reduction from baseline, the actual contact area is proportional to the pressure in the 2/3 power. **Originality.** It is found that the contact patch size is proportional to the pressure of the first load. **Practical value.** It is established that at pressures lower than originally applied to the contact surfaces, the high values of the actual surface contact, the number of patches of actual contact are typical, than for the same pressure at the first load.

*Keywords:* microirregularity; roughness; contact; deformation; load

## REFERENCES

1. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Vvedeniye v mekhaniku kontaktnykh vzaimodeystviy* [Introduction in to mechanics of contact interaction]. Rostov-na-Donu, JSC «CVVR» Publ., 2007. 114 p.
2. Vakulenko I.O. *Vtoma metalevykh materialiv v konstruktsiiakh rukhomoho skladu* [Fatigue of metal materials in constructions of rolling stock]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2012. 152 p.
3. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniye sostoyaniya vyzkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami* [State equation of viscoelastic-plastic medium with damages]. Moscow, Mir Publ., 1984. 624 p.
4. Kuzin M.O. Matematychnye modeliuvannya parametriv vtomnoi mitsnosti strukturno-neodnorodnykh metalichnykh system [Mathematical simulation of fatigue strength parameters in structural non-uniform metallic systems]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 213-219.
5. Kuzin O.A. Rol struktury v protsesakh znoshuvannya feryto-perlitnykh stalei [The role of structure in the ferrite-pearlitic steel wear processes]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 37, pp. 224-229.
6. Kulichenko A.Ya. Metodyka vyznachennia yakisnykh kharakterystyk poverkhni metalu, obroblenoї instrumentom z hnuchkymy robochymy elementamy [Feature finding of metal surface qualitative characteristics, treated by instrument with flexible working elements]. *Transportni systemy i tekhnolohii* [Transport systems and technologies], 2007, issue 11, pp. 67-69.
7. Kulichenko A.Ya. Optyimizatsiya parametriv tochnosti pry vyhotovlenni ta remonti detaley zasobiv transportu [Parameter optimization of accuracy at components of transport equipment making and repair]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2008, no. 1, pp. 38-39.
8. Troshchenko V.T. *Prochnost materialov i konstruktsiy* [Strength of materials and constructions]. Kiev, Akademperiodika Publ., 2005. 1088 p.
9. Sokol Ye.N. *Zheleznodorozhno-transportnoye proisshestviye i yego mekhanizm* [Railway accident and it mechanism]. Lvov, Pais Publ., 2011. 376 p.
10. Shakhunants G.M. *Zheleznodorozhnyye puti* [Railway lines]. Moscow, Transport Publ., 1987. 479 p.
11. Catalin Alexandru. Modeling and simulation in engineering. Rijeka, 2012. 312 p.
12. Popov V. Contact Mechanics and Friction. Springer, 2010. 368 p.
13. Zavarise G., Wriggers P. Trends in Computational Contact Mechanics. Springer, 2011. 354 p.

*Стаття рекомендована до публікації к.т.н., доц. Е. І. Плешаковим (Україна); к.т.н., доц. С. В. Пройдаком (Україна)*

Надійшла до редколегії: 10.04.2013

Прийнята до друку: 05.06.2013

## УДК 669.715

О. В. ЛЮТОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Начертательная геометрия и компьютерная графика», Запорожский национальный технический университет,  
ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769 85 32, эл. почта tmzntu@gmail.com

## ПОВЫШЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ СВОЙСТВ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

**Цель.** Изучить влияние металлургических факторов производства на литейные свойства вторичного алюминиевого сплава АК9М2. **Методика.** Для экспериментальных плавов в качестве независимых переменных были выбраны количество стружки в шихте, содержание железа и величина присадки модификатора. Компоненты модификатора изменялись в интервалах 25...40 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 12...20 % SiC, 3...8 % Ti, остальное – S. Микроструктуру сплавов исследовали под световым микроскопом, с использованием методик количественной металлографии. Анализ влияния конкретных параметров сплавов осуществляли с использованием методов математической статистики. Изучали влияние добавок стружки, количества железа и модификатора на жидкотекучесть и пористость получаемых сплавов. **Результаты.** В работе показано, что увеличение содержания стружки в шихте от 1 до 19 % и количества железа в сплаве от 0,66 до 2,34 %, приводило к снижению жидкотекучести сплава на 30...35 %. Одновременно наблюдалось уменьшение линейной усадки на 18...20 % и прирост пористости от 0,5 до 2,5 балла. Представленные изменения литейных свойств сплава обусловлены количеством интерметаллидных фаз неблагоприятной формы и его способностью к насыщению газами. Увеличение присадки модификатора с 0,02 до 0,15 % приводило к повышению жидкотекучести на 10...15 %, росту линейной усадки на 30...35 % и снижению пористости с 2,5 до 0,5 балла. Одновременно наблюдалось изменение формы интерметаллидных фаз и рост равномерности их распределения. **Научная новизна.** Увеличение концентрации железа в составе силумина сопровождается снижением его жидкотекучести. При этом темп снижения жидкотекучести сплава пропорционален количеству растворенного железа. Характер влияния железа обусловлен образованием высокотемпературных интерметаллидных соединений типа  $\text{Al}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_5\text{SiFe}$ , которые повышают вязкость металла. **Практическая значимость.** Использование полученных научных результатов на практике позволило разработать технические решения, направленные на повышение качественных показателей силуминового сплава.

**Ключевые слова:** вторичные алюминиевые сплавы; жидкотекучесть; линейная усадка; пористость; модификатор

### Введение

Благодаря малой плотности, хорошей коррозионной стойкости и достаточно высокой удельной прочности алюминиевые сплавы по объемам применения занимают второе место после стали и чугуна. В железнодорожном транспорте Европы на сегодняшний день 80 % вагонов изготовлены с использованием алюминиевых сплавов [1, 4, 8]. Для снижения массы деталей, уменьшения инерционных сил и вибраций машин, а также затрат на механическую обработку производится замена чугунных деталей (шкив, дисков, рабочих колес и лопаток вентиляторов, различного рода крышек и корпусов механизмов) на алюминиевые.

В связи с постоянным ростом производства изделий из алюминиевых сплавов, накоплением лома и отходов, в современных условиях суще-

ствует проблема их переработки. Одним из перспективных направлений является использование при производстве алюминиевых сплавов указанных отходов в качестве вторичного сырья [10, 11, 13]. Более того, указанная проблема является особенно актуальной для Украины. Имея достаточно развитую отрасль, которая непрерывно требует повышения производства алюминиевых сплавов, в действительности можно полагать, что Украина практически уже утратила собственное производство алюминия. На основании этого, производство вторичного алюминия и его сплавов, в силу меньших энергетических затрат и выбросов в окружающую среду, имеет тенденцию к возрастанию.

С другой стороны, вторичные алюминиевые сплавы имеют более низкие механические и технологические свойства по сравнению

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

с первичними [3, 12]. Литейные свойства, такие как жидкотекучесть и линейная усадка вторичных алюминиевых сплавов, позволяют получить отливки более точных размеров (по сравнению со стальными и чугунами) и со значительно высоким уровнем чистоты поверхности. Достаточно существенное влияние на качество алюминиевых сплавов оказывает их способность насыщаться газами.

## Цель

Целью работы явилось изучение влияния металлургических факторов, таких как: изменение состава шихтовых материалов, содержания железа в сплаве и количества добавляемого модификатора – на качественные показатели вторичных силуминов.

## Методика

Для экспериментальных плавов была использована шихта, состоящая из вторичного сплава на основе алюминия АК9М2 и стружки того же сплава. Плавки проводились согласно матрице планирования эксперимента  $2^3$ . В качестве независимых переменных были выбраны количество стружки в шихте от 1 до 19 %, содержание железа (в сплаве изменялось от 0,66 до 2,34 %) и величина добавляемого модификатора (изменение в интервале от 0,02 до 0,22 %). Состав модификатора варьировали в следующих соотношениях компонентов (в % по массе): 25...40 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 12...20 %  $\text{SiC}$ , 3...8 %  $\text{Ti}$ , остальное – S. Необходимость приведенного соотношения компонентов изложена в [9].

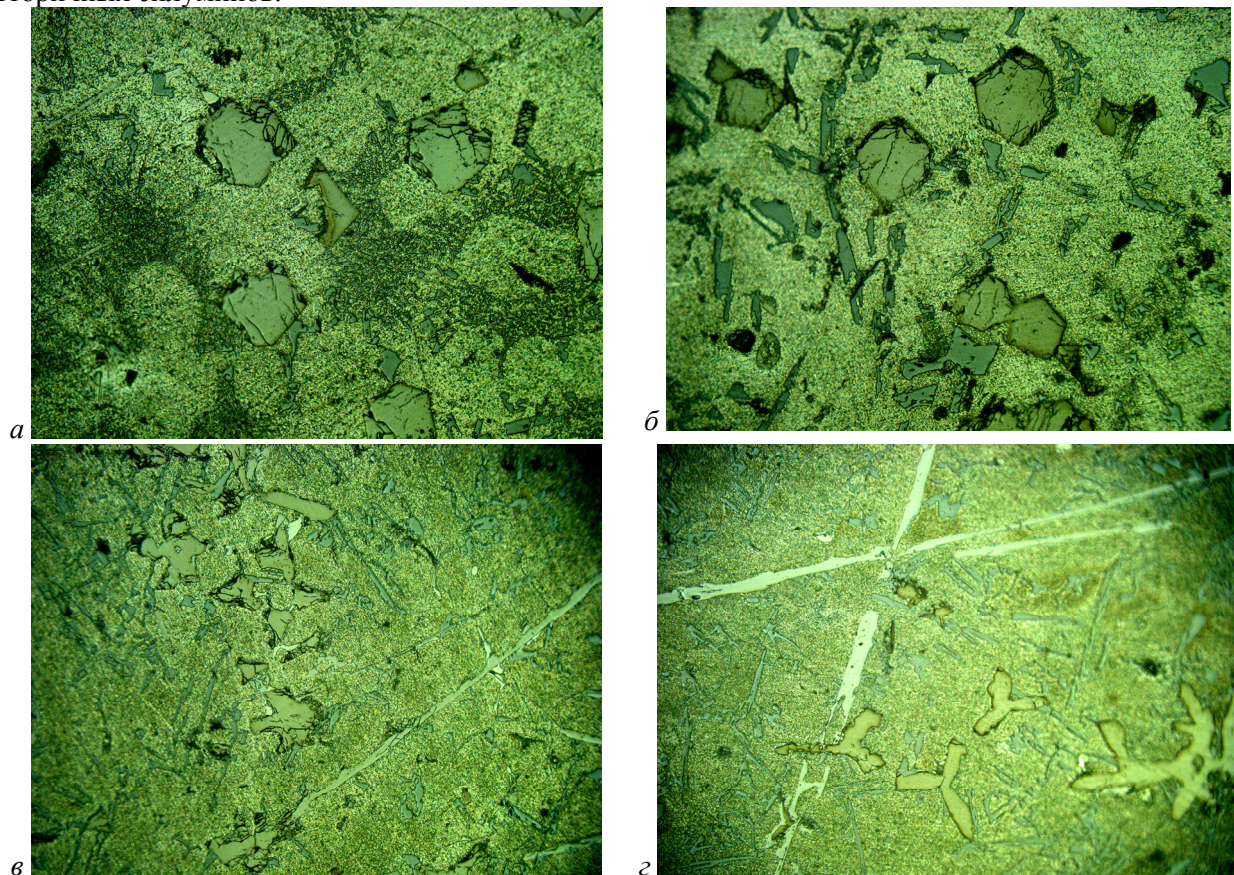


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 500$ ) сплава АК9М2 в состоянии без термической обработки: а – 15,4 % С; 1,185 % Fe; 0,18 % М; б – 15,4 % С; 1,869 % Fe; 0,18 % М; в – 4,6 % С; 1,895 % Fe; 0,06 % М; з – 10 % С; 2,090 % Fe; 0,12 % М; (С – стружка; М – модификатор)

Микроструктуру сплавов после изготовления исследовали под световым микроскопом, с использованием методик количественной металлографии. Анализ и оценку степени влияния

конкретных параметров сплавов осуществляли с использованием методов математической статистики. В работе значительное внимание уделялось изучению влияния добавок стружки

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

алюминиевого сплава, количества железа и модификатора на жидкотекучесть и пористость получаемых сплавов.

## Результаты

Экспериментальные сплавы имели структуру типичную для доэвтектических сплавов, состоящую из  $\alpha$ -твердого раствора кремния и других элементов в алюминии ( $\alpha$ -Al) и эвтектики, состоящей из  $\alpha$ -Al и частиц разной формы на основе легированного кремния ( $\beta$ -Si), а также интерметаллидных включений (рис. 1, а).

В зависимости от состава шихты, содержания в ней стружки и присадки модификатора частицы кремния серо-зеленого цвета имели форму от близкой к глобулярной (рис. 1, б) до пластинчатой (рис. 1, в). Основными включениями интерметаллидов были железосодержащие фазы, наиболее часто встречалась фаза  $Al_5SiFe$  белого цвета, имевшая ярко выраженную пластинчатую форму, наиболее часто она встречалась в сплавах с повышенным содержанием железа (рис. 1, в, з). С целью анализа влияния исследуемых параметров на качество сплава (литейные свойства) использовались методы математической статистики. Результаты обработки позволили построить зависимости влияния количества стружки, концентрации железа и модификатора на жидкотекучесть и пористость сплава.

Как видно из рис. 2 а, б увеличение содержания стружки в шихте, а также количества железа в сплаве, в исследуемых пределах однозначно приводили к снижению жидкотекучести на 30...35 %.

Такое влияние железа можно объяснить образованием интерметаллидных фаз  $Al_3Fe$ ,  $Al_5SiFe$ , которые согласно [2, 6] имеют более высокую температуру плавления по сравнению с алюминиевыми сплавами, что приводит к увеличению вязкости жидкого металла и, как следствие, к снижению его жидкотекучести.

Увеличение присадки модификатора с 0,02 до 0,15 % приводило к повышению жидкотекучести на 10...15 %. При дальнейшем увеличении присадки модификатора жидкотекучесть оставалась практически неизменной (рис. 2, в). Увеличение содержания стружки с 1 до 19 % приводило к росту пористости с 0,5 до 2...2,5 балла ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93) (рис. 3.а). Такое явление можно объяснить повышенным содержанием газов и оксида алюминия  $Al_2O_3$  в

стружке и соответственно в сплаве. Железо не оказало существенного влияния на пористость сплава (рис. 3, б).

Модификатор, который применяли в настоящих исследованиях, предназначен для решения двух основных задач: перехода к глобулярной форме интерметаллидных фаз и снижения содержания газов в силуминах.

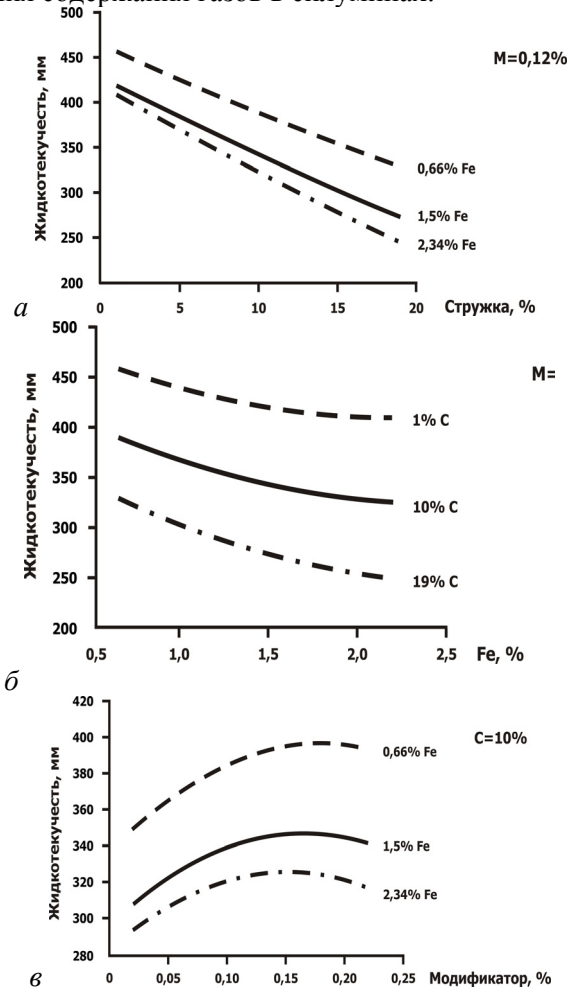


Рис. 2. Влияние металлургических факторов на жидкотекучесть сплава АК9М2: а – стружки; б – железа; в – модификатора

За счет последнего фактора можно объяснить существенное снижение с 2,5 до 0,5 балла пористости с увеличением присадки модификатора с 0,02 до 0,22 % (рис. 3, в).

На рис. 4 представлена зависимость линейной усадки  $\epsilon_L$  от исследуемых металлургических факторов. Некоторое уменьшение величины линейной усадки с ростом содержания стружки, на наш взгляд, объясняется увеличением газосодержания сплава. Тенденцию к

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

снижению линейной усадки с увеличением в сплаве содержания железа можно объяснить образованием дополнительных центров кристаллизации в виде железосодержащих интерметаллидных фаз.

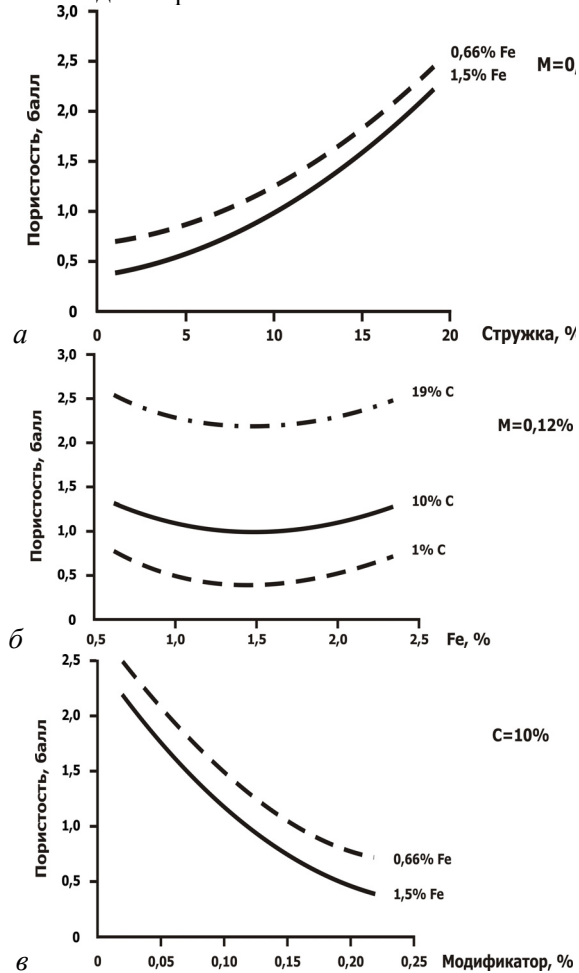


Рис. 3. Влияние металлургических факторов на пористость сплава АК9М2:

*a* – стружки; *б* – железа; *в* – модификатора

Увеличение модификатора приводит к повышению величины линейной усадки вследствие рафинирования жидкого металла, что согласуется с данными [5, 7].

#### Научная новизна и практическая значимость

Увеличение концентрации железа в составе силумина сопровождается снижением его жидкотекучести. При этом темп снижения жидкотекучести сплава пропорционален количеству растворенного железа. Характер влияния железа обусловлен образованием высокотемпера-

турных интерметаллидных соединений типа  $Al_3Fe$ ,  $Al_5SiFe$ , которые повышают вязкость металла.

Использование полученных научных результатов на практике позволило разработать технические решения, направленные на повышения качественных показателей силуминового сплава.

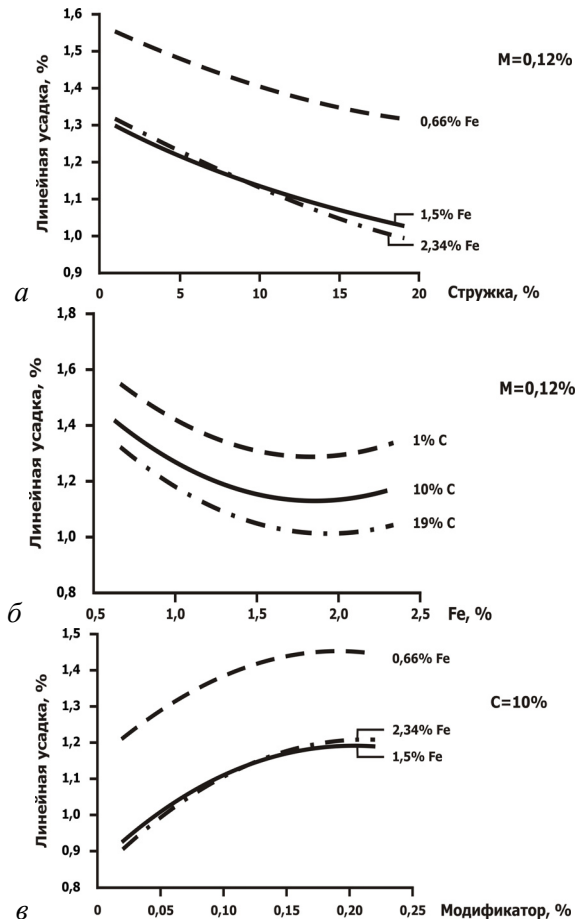


Рис. 4. Влияние металлургических факторов на линейную усадку сплава АК9М2:

*a* – стружки; *б* – железа; *в* – модификатора

#### Выводы

1. Использование в качестве шихты стружки в количестве до 10...15 % и присадок железа в сплаве до 1...1,5 % способствуют достижению достаточно высокого уровня свойств алюминиевого сплава.

2. Добавление модификатора в количестве до 0,1...0,15 %, способствуя рафинированию сплава, приводит к повышению его линейной усадки.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волчок, И. П. Применение вторичных алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении / И. П. Волчок, О. В. Лютова // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 14. – С. 225–227.
2. Диаграммы состояния металлических систем / Н. И. Ганина, А. М. Захарова, В. Г. Оленичева, Л. А. Петрова. – Вып. XXXIV. – М. : ВИНТИ, 1990. – 600 с.
3. Лютова, О. Підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів / О. Лютова, О. Мітяєв, І. Волчок // Машинознавство. – 2007. – № 8 (122). – С. 32–35.
4. Мітяєв, О. А. Підвищення якості алюмінієвих сплавів методами рафінування та модифікування / О. А. Мітяєв, О. Л. Скуйбіда // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 195–197.
5. Модифицирование сплава АК6М2 / В. И. Никитин, А. И. Ивашкевич, А. В. Ивлева, А. Н. Лесницкий, Е. Б. Пронь // Литейное производство. – 1999. – № 1. – С. 30–31.
6. Мондольфо, Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо. – М. : Металлургия, 1979. – 640 с.
7. Скуйбіда, О. Л. Підвищення механічних властивостей вторинного силуміну АК5М2 / О. Л. Скуйбіда, І. П. Волчок // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 215–218.
8. Пат. 57584А Україна, МКВ С22С1/06. Модифікатор для алюмінієвих сплавів / Волчок І. П., Мітяєв О. А. (Україна) ; заявник і патенто-власник Запорізький нац. техн. ун-т. – № 2002108343 ; заявл. 22.10.2002 ; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6. – 4 с.
9. Скуйбіда, О. Л. Підвищення якості алюмінієвих сплавів за рахунок модифікування / О. Л. Скуйбіда, І. П. Волчок // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д., 2011. – Вип. 37. – С. 235–237.
10. Engler, S. Continuous monitoring of the degassing process in aluminium melts / S. Engler, X.-G. Chen, F.-J. Klinkenberg // Cast Metals – 1995. – № 8 (1). – P. 27–34.
11. Koewius, A. Aluminium, automobil und recycling einige grundsätzliche aspekte / A. Koewius // Automobiltechnische Zeitschrift. – 1995 – № 4. – P. 248–250.
12. Lyutova, O. V. Increase of foundry properties of secondary silumins / O. V. Lyutova, I. P. Volchok // Archives of foundry engineering. – 2008. – Vol. 8. – P. 89–91.
13. Recycling of aluminum swarf by direct incorporation in aluminum melts / H. Puga, J. Barbosa, D. Soares, F. Silva, S. Ribeiro // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209. – P. 5195–5203.

О. В. ЛЮТОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Нарисна геометрія та комп'ютерна графіка», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769 85 32, ел. пошта tmzntu@gmail.com

## ПІДВИЩЕННЯ ЛИВАРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

**Мета.** Вивчити вплив металургійних чинників виробництва на ливарні властивості вторинного алюмінієвого сплаву АК9М2. **Методика.** Для експериментальних плавок в якості незалежних змінних були вибрані кількість стружки в шихті, зміст заліза і величина присадки модифікатора. Компоненти модифікатора змінювалися в інтервалах 25...40 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 12...20 %  $\text{SiC}$ , 3...8 %  $\text{Ti}$ , решта – S. Мікроструктуру сплавів досліджували під світловим мікроскопом, з використанням методик кількісної металографії. Аналіз впливу конкретних параметрів сплавів здійснювали з використанням методів математичної статистики. Вивчали вплив добавок стружки, кількість заліза і модифікатора на рідкотекучість і пористість отримуваних сплавів. **Результати.** У роботі показано, що збільшення вмісту стружки в шихті від 1 до 19 % і кількості заліза в сплаві від 0,66 до 2,34 % призводило до зниження рідкотекучості сплаву на 30...35 %. Одночасно спостерігалось зменшення лінійної усадки на 18...20 % і приросту пористості від 0,5 до 2,5 балів. Представлені зміни ливарних властивостей сплаву обумовлені кількістю інтерметалідних фаз несприятливої форми і його здатністю до насичення газами. Збільшення присадки модифікатора з 0,02 до 0,15 % призводило до підвищення рідкотекучості на 10...15 %, зростанню лінійної усадки на 30...35 % і зниженню пористості з 2,5 до 0,5 балу. Одночасно спостерігалась зміна форми інтерметалідних фаз і зростання рівномірності їх розподілу. **Наукова новизна.** Збільшення концентрації заліза у складі силуміну супроводжується зниженням його рід-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

котекучості. При цьому темп зниження рідкотекучості сплаву пропорційний кількості розчиненого заліза. Характер впливу заліза обумовлений утворенням високотемпературних інтерметалідних з'єднань типу  $Al_3Fe$ ,  $Al_5SiFe$ , які підвищують в'язкість металу. **Практична значимість.** Використання отриманих наукових результатів на практиці дозволило розробити технічні рішення, які спрямовані на підвищення якісних показників силумінового сплаву.

**Ключові слова:** вторинні алюмінієві сплави; рідкотекучість; лінійна усадка; пористість; модифікатор

O. V. LYUTOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Descriptive Geometry, Engineer and Computer Graphics», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy Str., 64, 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (061) 769 85 32, e-mail tmzntu@gmail.com

## INCREASING OF FOUNDRY PROPERTIES OF SECONDARY ALUMINIUM ALLOYS

**Purpose.** To study the influence of metallurgical factors of production on casting properties of secondary aluminum alloy AK9M2. **Methodology.** For the experimental melts shaving amount in a charge, iron content and the quantity of modifier additive were chosen as independent variables. The components of modifier were being changed in the intervals of 25...40 %  $Na_2CO_3$ , 12...20 %  $SiC$ , 3...8 %  $Ti$ , the other – S. The microstructure of alloys was investigated under a light microscope, using the method of quantitative metallography. Influence analysis of certain parameters of alloys was conducted by mathematical statistics methods. The influence of shaving additions, iron and modifier amount on liquidity and porosity of the resulting alloys was studied. **Findings.** The paper shows that the increase of shaving content in the charge from 1 to 19 % and iron content in alloy from 0.66 to 2.34 % resulted in the decline of alloy liquidity on 30...35 %. Simultaneously the linear shrinkage reduction for 18...20 % and the porosity increase from 0.5 to 2.5 points were observed. The presented changes of alloy casting properties are conditioned by the amount of intermetallic phases of unfavorable form and its capacity for aeration. Increase of modifier additive from 0.02 to 0.15 % resulted in the liquidity increase on 10...15 %, the increase of linear shrinkage on 30...35 % and porosity decline from 2.5 to 0.5 points. At the same time a change of form of intermetallic phases and increase of their evenness were observed. **Originality.** The increase of iron concentration in silumin composition is accompanied by the decline of its liquidity. Thus, the rate of decline of alloy liquidity is proportional to the amount of dissolved iron. The character of iron influence is caused by formation of high temperature intermetallic compounds of the type  $Al_3Fe$ ,  $Al_5SiFe$ , which promote the metal viscosity. **Practical value.** Practical use of the obtained scientific results would develop the technical solutions oriented to the quality indicator increase of silumin alloy.

**Keywords:** secondary aluminum alloys; liquidity; linear shrinkage; porosity; modifier

## REFERENCES

1. Volchok I.P., Lyutova O.V. *Primeneniye vtorichnykh alyuminiyevykh splavov v transportnom mashinostroyenii* [Use of the secondary aluminum alloys in the transport machine building]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2007, issue 14, pp. 225-227.
2. Ganina N.I., Zakharova A.M., Olenicheva V.G., Petrova L.A. *Diagrammy sostoyaniya metallicheskih sistem* [Structural diagram of the metal systems], 1990, issue XXXIV, 600 p.
3. Liutova O., Mitiaiev O., Volchok I. *Pidvyshchennia yakosti vtorynnykh aliuminiyevykh splaviv* [Quality improvement of the secondary aluminum alloys]. *Mashynoznavstvo – Machine Science*, 2007, no. 8 (122), pp. 32-35.
4. Mitiaiev O.A., Skuibida O.L. *Pidvyshchennia yakosti aliuminiyevykh splaviv metodamy rafinuvannia ta modyfikuvannia* [Quality improvement of the secondary aluminum alloys by means of refinement and modification]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2009, issue 29, pp. 195-197.
5. Nikitin V.I., Ivashkevich A.I., Ivlev A.V., Lesnitskiy A.N., Pron Ye.B. *Modifitsirovaniye splava AK6M2* [Modification of the AK6M2 alloy]. *Liteynoye proizvodstvo – Foundry engineering*, 1999, no. 1, pp. 30-31.
6. Mondolfo L.F. *Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov* [Structure and properties of aluminum alloys].

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 640 p.
7. Skuibida O.L., Volchok I.P. Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei vtorynnoho syluminu AK5M2. [Mechanical properties improvement of the secondary silumin AK5M2]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2010, issue 34, pp. 215-218.
  8. Volchok I.P., Mitiaiev O.A. *Modyfikator dlia aliuminiievykh splaviv* [Modifier for aluminum alloys]. Patent UA, no. 2002108343, 2003.
  9. Skuibida O.L., Volchok I.P. Pidvyshchennia yakosti aliuminiievykh splaviv za rakhunok modyfikuvannia [Aluminum alloys quality improvement using modification]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2011, issue 37, pp. 235-237.
  10. Engler S., Chen X.-G., Klinkenberg F.-J. Continuous monitoring of the degassing process in aluminum melts. *Cast Metals*, 1995, no. 8 (1), pp. 27-34.
  11. Koewius A. Aluminium, Automobil und Recycling einige grundsätzliche Aspekte. *Automobiltechnische Zeitschrift*, 1995, no. 4, pp. 248-250.
  12. Lyutova O.V., Volchok I.P. Increase of foundry properties of secondary silumins. *Archives of foundry engineering*, 2008, vol. 8, pp. 89-91.
  13. Puga. H., Barbosa J., Soares D., Silva F., Ribeiro S. Recycling of aluminum swarf by direct incorporation in aluminum melts. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, pp. 5195-5203.

Статья рекомендована к публикации к.т.н., доц. Л. И. Котовой (Украина); к.т.н., доц. О. А. Чайковским (Украина)

Поступила в редколлегию 27.03.2013

Принята к печати 04.06.2013

## УДК 669.141.24-048.77

С. О. ПОЛІШКО<sup>1\*</sup>, М. А. КУШНІР<sup>1</sup>, Ю. В. ТАТАРКО<sup>1</sup>, А. Ф. САНІН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>\*Каф. «Технології виробництва», Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. + 38 (093) 581 41 88, ел. пошта polishko\_sergey@mail.ru

**ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ СТ1КП ТА КОЛІСНОЇ КП-Т**

**Мета.** Встановлення впливу модифікування на стабілізацію хімічного складу, покращення морфології і розташування неметалевих включень та підвищення стабільності і рівня механічних властивостей сталей Ст1кп та КП-Т. **Методика.** Для досягнення поставленої в роботі мети використовували сучасні методи досліджень: хімічний і спектральний; електрономікроскопічний; металографічний; визначення механічних властивостей. Хімічний склад сталей визначали за ДСТУ 2651-2006 і ТУ У 35.2-23365425-600:2006. **Результати.** Встановлено вплив багатофункціональних модифікаторів на хімічний склад, формування неметалевих включень та механічні властивості в маловуглецевій сталі Ст1кп і колісній КП-Т. Доведено, що багатофункціональні модифікатори зменшують кількість неметалевих включень та покращують їх морфологію, сприяють стабілізації хімічного складу і підвищенню рівня механічних властивостей сталей, що досліджувались. **Наукова новизна.** Вперше доведено можливість стабілізації хімічного складу та механічних властивостей, зміни морфології неметалевих включень завдяки об'ємній кристалізації під час модифікації. **Практична значимість.** Використання модифікаторів різних за складом на підприємствах ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» і ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» при виплавці сталей Ст1кп і КП-Т дозволило підвищити механічні характеристики, особливо ударну в'язкість готових коліс із сталі марки КП-Т в середньому на 14 %. Розроблено два нових модифікатора багатофункціональної дії для обробки маловуглецевої і колісної сталей, новизну яких підтверджено патентами України № 85254 та № 93684.

**Ключові слова:** арматурна та колісна сталі; неметалеві включення; багатофункціональні модифікатори; механічні властивості; хімічний склад

**Вступ**

При виготовленні коліс для залізничного транспорту і арматури для будівних споруд широко застосовують вуглецеві сталі. Всі зростаючі вимоги до якості залізничних коліс з високовуглецевої сталі та арматури з напівспокоїної і киплячої маловуглецевої сталі на світовому ринку та жорстка конкуренція викликають необхідність пошуків альтернативних рішень підвищення їх якості, окрім загальновідомих – легування і термічної обробки [1, 5, 6, 13]. Тому задача обробки розплавів багатофункціональними розкислювачами-модифікаторами з метою стабілізації хімічного складу, підвищення рівня механічних властивостей і зменшення кількості неметалевих включень, зміни їх розташування та морфології є, безумовно, актуальною [3, 9, 14].

**Мета**

Стабілізація хімічного складу, покращення морфології і розташування неметалевих вклю-

чень та підвищення стабільності і рівня механічних властивостей сталей Ст1кп та КП-Т шляхом модифікування.

**Методика**

Матеріалами досліджень були маловуглецева сталь Ст1кп, яку виплавлено на ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у в 160-ти тонних конвертерах, а також колісна КП-Т, яку виплавляли в основній 250-ти тонній печі мартенівського цеху ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ». Дослідницько-промислові сталі Ст1кп і КП-Т обробляли багатофункціональними модифікаторами, склад яких захищено патентами України [7, 8]. Додавали модифікатори в розплав сталі Ст1кп під струмінь під час зливу металу з конвертера в ківш, а в КП-Т – на установці вакуумної обробки сталі (УВОС).

Для досягнення поставленої в роботі мети використовувались сучасні методи досліджень: хімічний і спектральний; електрономікроскопічний; металографічний; визначення механічних властивостей. Хімічний склад сталей визначали за ТУ У

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

35.2-23365425-600:2006 і ДСТУ 2651-2006.

Масова частка хімічних елементів, %:

– арматурної сталі Ст1кп за ДСТУ 2654-2005 (ГОСТ 380-2005): С – 0,06...0,12; Mn – 0,25...0,50; Si – 0,05; P – 0,04; S – 0,05; Cr – 0,3; Cu – 0,3; Ni – 0,3; N – 0,01; H ≤ 2 ppm;

– колісної сталі КП-Т згідно з вимогами ТУ У 35.2-23365425-600 : 2006: С – 0,61...0,69; Mn – 0,70...0,90; Si – 0,4; P – 0,025; S – 0,02; Cr – 0,4; Cu – 0,3; Ni – 0,25; V – 0,08...0,15; Al – 0,013...0,03; H ≤ 2 ppm.

### Результати

Результати порівняльних досліджень серійних та модифікованих сталей маловуглецевої Ст1кп та колісної КП-Т довели [4, 10], що в немодифікованих сталях спостерігається більш значний розкид вмісту легуючих елементів і шкідливих домішок (рис. 1) порівняно зі сталями тих же марок, які оброблено багатофункціональними модифікаторами.

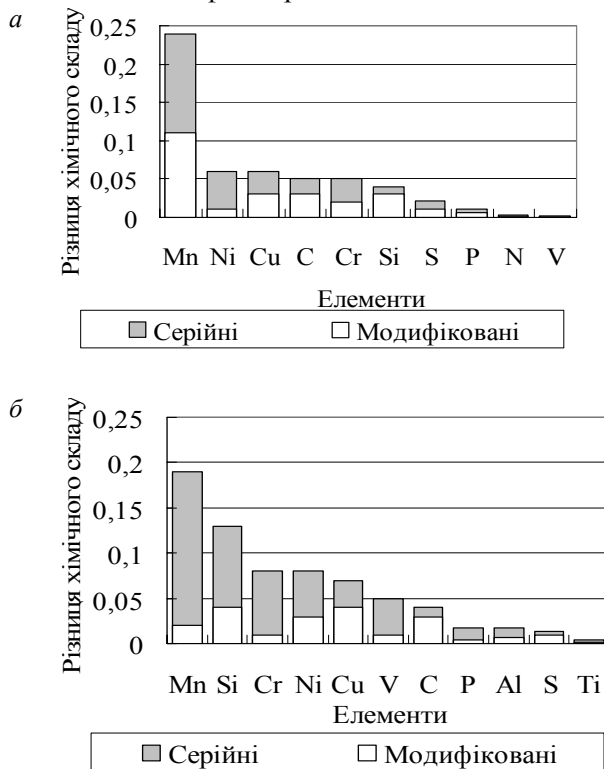


Рис. 1. Зменшення різниці міжплавочного вмісту елементів концентрації кожного компоненту в серійних та модифікованих сталях *а* – Ст1кп, *б* – КП-Т

У модифікованому металі кількість неметалевих включень у 2 рази менша, ніж у серійній сталі, а їхні розміри значно менші (від 2 до 7

мкм) і включення мають глобулярну форму. У сталі Ст1кп вміст сульфідів зменшився до 0,9 бала (замість 1,5), силікатів до 2,3 балів (замість 4,7), оксидів рядкових – 0 балів (замість 0,4), а в КП-Т: сульфідів до 1,19 бала (замість 1,43), силікатів до 0,78 балів (замість 1,3), оксидів – 0,44 балів (замість 0,5).

Було виявлено більш повне засвоєння розплавами алюмінію у модифікованому металі, особливо у Ст1кп, що сприяло зниженню концентрації окрихчующих оксидів заліза FeO.

Дослідження неметалевих включень у сталях, що досліджувались, довели, що середні бали неметалевих включень у серійних сталях більші за модифіковані як в арматурній сталі Ст1кп, так і в колісній сталі КП-Т (табл. 1). На поверхні шліфа проволочки утворювались джерела атмосферної корозії (~1 рік) на основі сульфиду, що сприяють руйнуванню металу (рис. 2, 3).

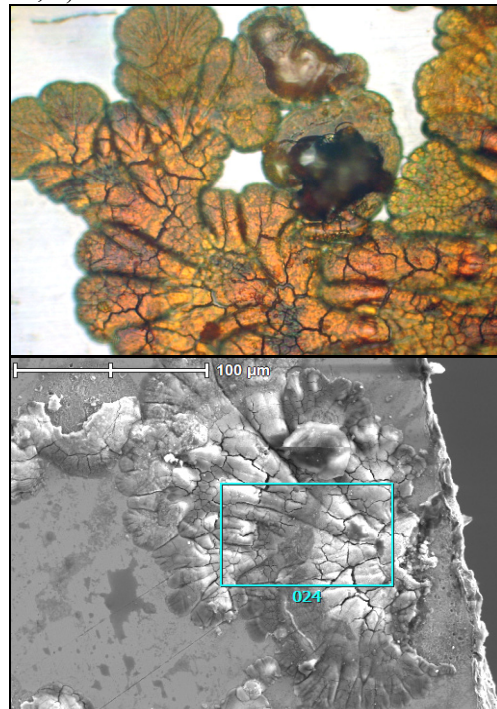


Рис. 2. Продукти корозії сталі Ст1кп (*а*), х600

| № точки | O     | S    | Fe    | Разом, % |
|---------|-------|------|-------|----------|
| 024     | 14,76 | 0,82 | 84,42 | 100      |

Рис. 3. Зона ураження з високою концентрацією заліза, х3000

Жовто-рудий окрас свідчить про наявність тут продуктів атмосферної корозії у вигляді оксидів заліза, їх існування підтверджено нами

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

експериментально за допомогою растрового електронного мікроскопа JEOL JSN-6360LA, який обладнано системою JED-2300. Як видно, в зоні корозійного ураження знаходяться продукти корозії з високою концентрацією заліза: 84,42 % Fe, 14,7 % O, 0,82 % S (рис. 2).

Аналогічні дослідження було проведено і для сталі КП-Т, результати яких зображено на рис. 4, 5.

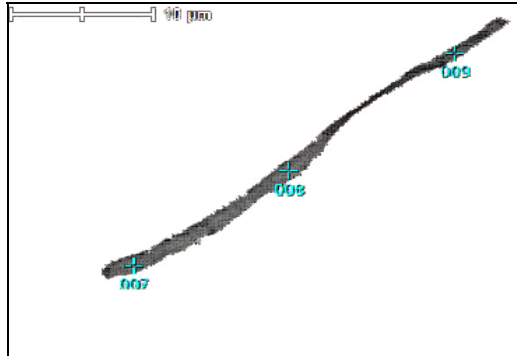


Рис. 4. Неметалеві включення в серійній сталі КП-Т, х3000

| № точки | S     | Mn    | Fe    | Всього, % |
|---------|-------|-------|-------|-----------|
| 007     | 29,84 | 61,79 | 8,38  | 100       |
| 008     | 28,67 | 57,41 | 13,93 | 100       |
| 009     | 26,26 | 57,72 | 16,03 | 100       |

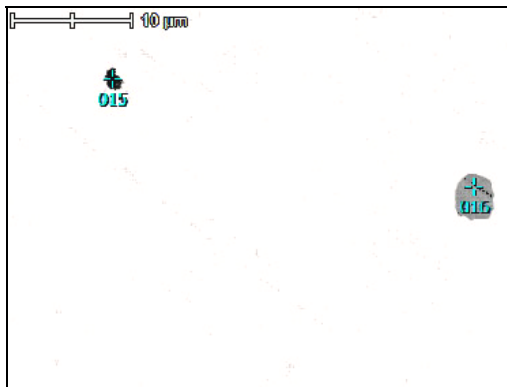


Рис. 5. Неметалеві включення в сталі КП-Т, яку оброблено багатофункціональними модифікаторами, х3000

| № точки | O | Si | S    | Ca  | Mn   | Fe | Всього, % |
|---------|---|----|------|-----|------|----|-----------|
| 015     | 0 | 0  | 31,2 | 6,3 | 62,5 | 0  | 100       |
| 016     | 0 | 0  | 33,6 | 2,8 | 63,7 | 0  | 100       |

Вищенаведені дані підтверджують, що в модифікованій сталі неметалеві включення навіть при великих збільшеннях мають глобулярну форму. Склад неметалевих включень комплексний – це оксиди заліза і кремнію разом з

сульфідами марганцю і заліза, силікати, оксиди марганцю і заліза разом з цементитом [4].

Таблиця 1

**Середні бали неметалевих включень промислових немодифікованих і модифікованих плавок маловуглецевої сталі Ст1кп і колісної КП-Т**

| Неметалеві включення   | ГОСТ 1778-70, бал | Статистичні показники | Немодифіковані, бал | Модифіковані, бал |
|------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| Сталь Ст1кп            |                   |                       |                     |                   |
| Сульфід                | 2,0               | max                   | 2,0                 | 1,5               |
|                        |                   | min                   | 1,5                 | 0,5               |
|                        |                   | середнє               | 1,5                 | 0,9               |
| Крихкі силікати        | 2,0               | max                   | 2,5                 | 2,5               |
|                        |                   | min                   | 0                   | 1,0               |
|                        |                   | середнє               | 1,8                 | 1,6               |
| Пластичні силікати     | 1,5               | max                   | 2,0                 | 1,0               |
|                        |                   | min                   | 0                   | 0                 |
|                        |                   | середнє               | 1,6                 | 0,4               |
| Недеформовані силікати | 2,5               | max                   | 2,0                 | 1,0               |
|                        |                   | min                   | 0                   | 0                 |
|                        |                   | середнє               | 1,3                 | 0,3               |
| Оксиди рядкові         | 1,0               | max                   | 2,0                 | 0                 |
|                        |                   | min                   | 0                   | 0                 |
|                        |                   | середнє               | 0,4                 | 0                 |
| Сталь КП-Т             |                   |                       |                     |                   |
| Неметалеві включення   | ТУ, бал           | Статистичні показники | Немодифіковані, бал | Модифіковані, бал |
| Сульфід                | 2,0               | max                   | 3,5                 | 2,0               |
|                        |                   | min                   | 0,5                 | 0,5               |
|                        |                   | середнє               | 1,43                | 1,19              |
| Крихкі силікати        | 2,0               | max                   | 3,0                 | 1,5               |
|                        |                   | min                   | 0,5                 | 0,5               |
|                        |                   | середнє               | 1,08                | 1,03              |
| Пластичні силікати     | 1,5               | max                   | 2,0                 | 1,5               |
|                        |                   | min                   | 0,5                 | 0,5               |
|                        |                   | середнє               | 1,03                | 0,78              |
| Недеформовані силікати | 2,5               | max                   | 4,0                 | 2,5               |
|                        |                   | min                   | 0,5                 | 0,5               |
|                        |                   | середнє               | 1,45                | 1,37              |
| Оксиди рядкові         | 1,0               | max                   | 1,0                 | 0,5               |
|                        |                   | min                   | 0,5                 | 0,5               |
|                        |                   | середнє               | 0,5                 | 0,44              |

Неметалеві включення в серійних сталях Ст1кп та КП-Т витягнуті уздовж напрямку де-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

формування і їх сумарна довжина в полі зору достатньо велика від 7 до 57 мкм (рис. 6, а та рис. 7, а). У модифікованих сталях (рис 6, б та рис. 7, б) навпаки – неметалеві включення навіть у місцях скупчень мали глобулярну форму настільки дрібну, що для переміщення дислокацій вони не є істотними перешкодами і не можуть бути концентраторами напружень через свою округлу форму.

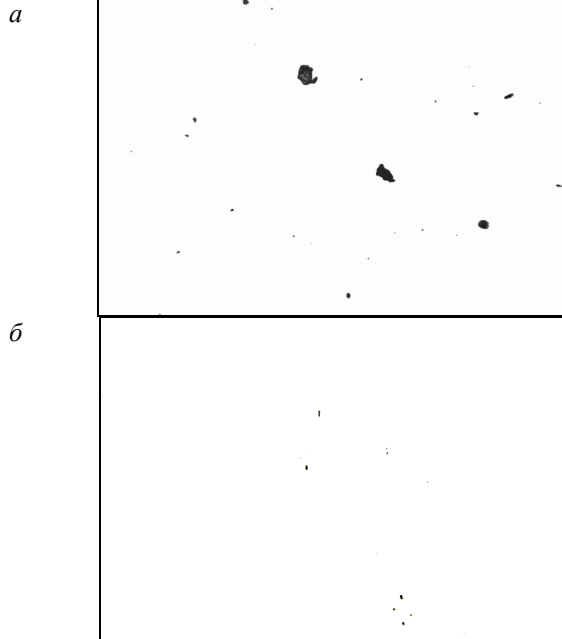


Рис. 6. Неметалеві включення сталі Ст1кп, х 150  
а – серійній, б – модифікованій

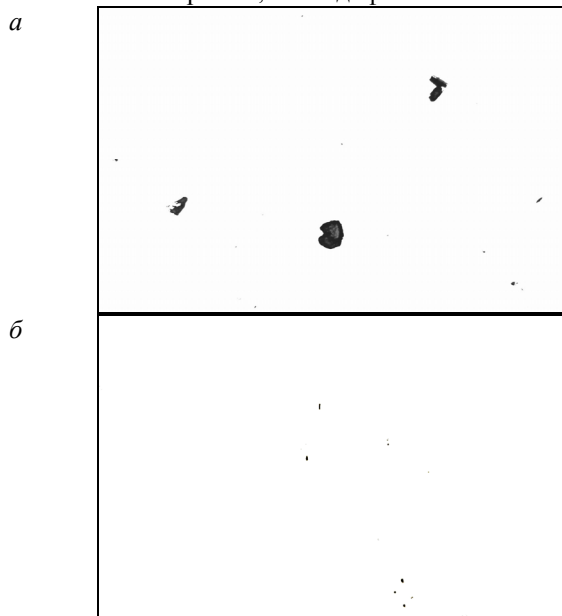


Рис. 7. Неметалеві включення сталі КП-Т, х 150  
а – серійній, б – модифікованій

Механічні властивості досліджених сталей наведено в табл. 2.

Таблиця 2

## Механічні властивості сталей Ст1кп та КП-Т

| Назва                                    | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ ,% | $\psi$ ,% | НВ <sub>30</sub> , МПа | КСУ, Дж<br>м /см <sup>2</sup> |      |
|------------------------------------------|------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------------------------|------|
|                                          |                  |             |           |                        | диск                          | обод |
| Ст1кп (ДСТУ 2770-94)                     |                  |             |           |                        |                               |      |
| Вимоги                                   | ≤420             | -           | -         | -                      | -                             | -    |
| Середні значення серійних плавок         | 372,3            | 42,5        | 74,0      | 885                    | -                             | -    |
| Різниця (max – min) серійних плавок      | 35               | 25          | 8         | 4                      | -                             | -    |
| Середні значення модиф. плавок           | 380,8            | 46,2        | 78,0      | 981                    | -                             | -    |
| Різниця (max – min) модифікованих плавок | 25               | 20          | 6         | 2                      | -                             | -    |
| КП-Т (ТУ У 35.2-23365425-600 : 2006 )    |                  |             |           |                        |                               |      |
| Вимоги                                   | 1020-1180        | ≥9          | ≥16       | 3200-3600              | ≥18                           | ≥20  |
| Середні значення серійних плавок         | 1132             | 11,1        | 22,9      | 3254                   | 23                            | 20   |
| Різниця (max – min) серійних плавок      | 120              | 6,7         | 20        | 450                    | 17                            | 17   |
| Середні значення модифікованих плавок    | 1153             | 11,2        | 26,2      | 3273                   | 27                            | 24   |
| Різниця (max – min) модифікованих плавок | 60               | 2,8         | 7         | 220                    | 13                            | 15   |

За даними, які наведено в табл. 2, випливає, що значення механічних властивостей модифікованих сталей вищі, ніж їх значення в серійному металі. Це гарантує більш високу надійність залізобетону та коліс при використанні в будівництві і транспортних засобів завдяки підвищенню рівня механічних властивостей [2, 11]. Обробка колісної сталі КП-Т та маловуглецевої Ст1кп багатофункціональними моди-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

фікаторами стабілізувала хімічний склад досліджених сталей та водночас сприяла підвищенню і стабілізації рівня характеристик міцності та пластичності (рис. 1 та табл. 2).

### Наукова новизна та практична значимість

Вперше доведено можливість стабілізації хімічного складу та механічних властивостей, зміни морфології неметалевих включень завдяки об'ємній кристалізації при модифікуванні. Використання модифікаторів різних за складом на підприємствах ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» і ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» при виплавці сталей Ст1кп і КП-Т дозволило підвищити механічні характеристики, особливо ударну в'язкість готових коліс із сталі марки КП-Т в середньому на 14 %. Розроблено два нових модифікатори багатофункціональної дії для обробки маловуглецевої і колісної сталей, новизну яких підтверджено патентами України № 85254 та № 93684.

### Висновки

1. Встановлено, що дія багатофункціональних модифікаторів забезпечила:

- зниження кількості неметалевих включень;
- стабілізування хімічного складу та підвищення стабільності і рівня механічних властивостей сталей Ст1кп і КП-Т.

2. Стабілізація хімічного складу і механічних властивостей відіграє першорядну роль для якості сталевих арматур відповідального призначення через зниження ризику обривності і розвитку корозійних пошкоджень металу, а також транспортного металу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вакуленко, Л. И. Повреждаемость при эксплуатации катаных железнодорожных колес повышенной прочности / Л. И. Вакуленко, В. Г. Анофриев // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 231–234.
2. Влияние элементов на параметры механических свойств серийной и модифицированной стали Ст1кп / С. А. Полишко, И. А. Маркова, Т. И. Ивченко, Т. В. Носова // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 73–75.

3. Голубцов, В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи / В. А. Голубцов. – Челябинск : Компания НПП, 2006. – 422 с.
4. Исследование состава и идентификация неметаллических включений, выявляемых при контроле железнодорожных колес / А. И. Бабаченко, П. Л. Литвиненко, А. А. Кононенко, А. В. Рослик // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2011. – Вып. 5. – С. 45–48.
5. Мурадян, Л. А. Исследование действующих условий эксплуатации и анализ причин сокращения ресурса работы железнодорожных колес / Л. А. Мурадян // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 206–210.
6. Мямлин, С. В. Влияние условий эксплуатации на внутреннее строение металла железнодорожных колес / С. В. Мямлин, Л. И. Вакуленко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 42. – С. 164–166.
7. Пат 93684 Україна МПК (2011.01) C22C 35/00 C21C 7/04. Розкислювач-модифікатор для обробки розплавів сталей і сплавів / Шаповалова О. М., Шаповалов В. П., Шаповалов О. В., Полішко С. О. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац ун-т ім. Олеся Гончара. – № а 200801124 ; заявл. 30.01.2008 ; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5. – 12 с.
8. Пат 85254 Україна МПК (2006) C22C 35/00 C22C 38/06 C21C 7/04 C21C 7/06. Композиційний розкислювач для обробки сталей / Шаповалова О. М., Шаповалов В. П., Шаповалов О. В., Полішко С. О. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т ім. Олеся Гончара. – № а 2007 00858 ; заявл. 26.01.2007 ; опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1. – 12 с.
9. Рябчиков, И. В. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов / И. В. Рябчиков. – М. : Экомет, 2008. – 400 с.
10. Стабилизация химического состава и механических свойств в сталях 1кп и R7 под влиянием модифицирования / О. М. Шаповалова, А. Е. Камышный, А. В. Шаповалов, С. А. Полишко, М. А. Кушнир, Е. Н. Майстренко, Ю. А. Финдлинг // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. – Вып. 48. – Ч. 3. – Д., 2009. – С. 232–236.
11. Alloys with modified characteristics / O. Mirsado, R. Milenko, B. Omer, M. Salejman // Materials in Technologies. – 2011. – № 5. – P. 485–489.
12. Effects of modification on microstructure and ultrahigh carbon (1.9wt% C) steel / K. P. Lin, X. H. Dun, J. P. Hai, H. S. Hin // Mater Science and

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Engineering A. – 2011. – Vol. 528, № 28. – P. 8263–8268.

H. Lunnge, C.-D. Wuppermann // Stahl und Eisen. – 2008. – № 2. – P. 50–53.

13. Fandrich, R. Secondary metallurgy – state of the art and research trends in Germany / R. Fandrich,

С. А. ПОЛИШКО<sup>1\*</sup>, М. А. КУШНИР<sup>1</sup>, Ю. В. ТАТАРКО<sup>1</sup>, А. Ф. САНИН<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технологии производства», Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Днепропетровск, Украина, тел. + 38 (093) 581 41 88, эл. почта polishko\_sergey@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ СТ1кп И КОЛЕСНОЙ Кп-Т

**Цель.** Установление влияния модифицирования на стабилизацию химического состава, улучшение морфологии и расположения неметаллических включений и повышения стабильности и уровня механических свойств сталей Ст1кп и Кп-Т. **Методика.** Для выполнения поставленной в работе цели использовали современные методы исследований: химический и спектральный; электронномикроскопический; металлографический; определение механических свойств. Химический состав сталей определяли по ДСТУ 2651-2006 и ТУ В 35.2-23365425-600:2006. **Результаты.** Установлено влияние многофункциональных модификаторов на химический состав, формирование неметаллических включений и механические свойства в малоуглеродистой стали Ст1кп и колесной Кп-Т. Доказано, что многофункциональные модификаторы уменьшают количество неметаллических включений и улучшают их морфологию, способствуют стабилизации химического состава и повышению уровня механических свойств исследуемых сталей. **Научная новизна.** Впервые доказана возможность стабилизации химического состава и механических свойств, изменения морфологии неметаллических включений благодаря объемной кристаллизации при модифицировании. **Практическая значимость.** Использование модификаторов разных составов на предприятиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» при выплавке сталей Ст1кп и Кп-Т позволило повысить механические характеристики, особенно ударную вязкость готовых колес из стали марки Кп-Т в среднем на 14 %. Разработано два новых модификатора многофункционального действия для обработки малоуглеродистой и колесной сталей, новизна которых подтверждена патентами Украины № 85254 и № 93684.

**Ключевые слова:** арматурная и колесная стали; неметаллические включения; многофункциональные модификаторы; механические свойства; химический состав

S. POLISHKO<sup>1\*</sup>, M. KUSHNIR<sup>1</sup>, J. TATARKO<sup>1</sup>, A. SANIN<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Technologies of production», Dnepropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Gagarin Av., 72, 49050, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel. + 38 (093) 581 41 88, e-mail polishko\_sergey@mail.ru

## INFLUENCE OF MODIFICATION ON DESCRIPTIONS OF LOW-CARBON STEEL OF ST1KP AND WHEELED KP-T

**Purpose.** Establishment of influence of modification on chemical composition stabilizing, improvements of morphology and location of nonmetallics and increase of stability and level of mechanical properties of steels St1kp and KP-T. **Methodology.** For the performance of the given goal the modern methods of researches are used: chemical and spectral; electron microscopy; metallography; determination of mechanical properties. Chemical composition of steels was determined on DSTU 2651-2006 and specifications U 35.2-23365425-600:2006. **Findings.** Influence of multifunction modifiers were set on chemical composition, forming of nonmetallics and mechanical properties in low-carbon steel of St1kp and wheeled KP-T. It is proved that multifunction modifiers diminish the amount of nonmetallics and improve their morphology, facilitate chemical composition stabilization and increase of mechanical properties level of probed steels. **Originality.** Possibility of chemical composition stabilization and mechanical properties, changes morphology of nonmetallics due to volume crystallization at modification were first proved. **Practical value.** Use of modifiers of different compositions at the enterprises of JSCo «ArselorMittal Krivoi Rog» and JSCo «INTERPAYP NTZ» at smelting of steels St1kp and KP-T allowed to promote mechanical descriptions, especially shock viscosity of the prepared wheels from steel KP-T at the average on 14 %. Two new modifiers

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

of multifunction action for treatment low-carbon and wheeled steels were developed, the novelty of which was confirmed by the patents of Ukraine № 85254 and № 93684.

**Keywords:** armature and wheeled steels; nonmetallics; multifunctional modifiers; mechanical properties; chemical composition

## REFERENCES

1. Vakulenko L.I., Anofriyev V.G. Povrezhdayemost pri ekspluatatsii katanykh zhelezodorozhnykh koles povyshennoy prochnosti [Defectiveness during exploitation of rolled railway extra-strong wheels]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 231-234.
2. Polishko S.A., Markova I.A., Ivchenko T.I., Nosova T.V. Vliyaniye elementov na parametry mekhanicheskikh svoystv seriynoy i modifitsirovannoy stali St1kp [Influence of elements on the parameters of mechanical properties of serial and modified steel St1kp]. *Metallurgiya i gornorudnaya promyshlennost – Metals and Mining Industry*, 2012, no. 4, pp 73-75.
3. Golubtsov V.A. *Teoriya i praktika vvedeniya dobavok v stal vne pechi* [Theory and practice of introduction of additions in steel out of a stove]. Chelyabinsk, Kompaniya NPP Publ., 2006. 422 p.
4. Babachenko A.I., Litvinenko P.L., Kononenko A.A., Roslik A.V. Issledovaniye sostava i identifikatsiya nemetallicheskh vklucheni, vyyavlyayemykh pri kontrole zhelezodorozhnykh koles [Research of composition and authentication of nonmetallics, exposed at control of railway wheels]. *Metallurgiya i gornorudnaya promyshlennost – Metals and Mining Industry*, 2011, no. 5, pp 45-48.
5. Muradyan L.A. Issledovaniye deystviyushchikh usloviy ekspluatatsii i analiz prichin sokrashcheniya resursa raboty zhelezodorozhnykh koles [Research of effective operating conditions and analysis of resource reduction reasons of railway wheels work]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 34, pp. 206-210.
6. Myamlin S.V. Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na vnutrenneye stroyeniye metalla zhelezodorozhnykh koles [Effect of operating conditions on the internal metal structure of the railroad wheels]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 164-166.
7. Shapovalova O.M., Shapovalov V.P., Shapovalov O.V., Polishko S.O. *Rozkysliuvach-modifikator dlia obrobky rozplaviv stalei i splaviv* [Deoxidizer-modifier for treatment of steels and alloys fusions]. Patent UA, no. a 20080112493684, 2011.
8. Shapovalova O.M., Shapovalov V.P., Shapovalov O.V., Polishko S.O. *Kompozytsiyni rozkysliuvach dlia obrobky stalei* [A composition deoxidizer for treatment of steels]. Patent UA, no. a 2007 00858, 2009.
9. Ryabchikov I.V. *Modifikatory i tekhnologii vnepechnoy obrabotki zhelezouglerodistykh splavov*. [Modifiers and technologies of ladle treatment of iron-carbon alloys]. Moscow, Ekomet Publ., 2008. 400 p.
10. Shapovalova O.M., Kamyshnyy A.Ye., Shapovalov A.V., Polishko S.A., Kushnir M.A., Maystrenko Ye.N., Findling Yu.A. Stabilizatsiya khimicheskogo sostava i mekhanicheskikh svoystv v stalyakh 1kp i R7 pod vliyaniyem modifitsirovaniya [Stabilizing of chemical composition and mechanical properties in steels 1kp and R7 under influence of modification]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Building, Material Science, Mechanical Engineering], 2009, issue 48, part 3, pp. 232-236.
12. Mirsado O., Milenko R., Omer B., Salejman M. Alloys with modified characteristics. *Materials in Technologies*, 2011, no. 5, pp. 485-489.
13. Lin K.P., Dun X.H., Hai J.P., Hin H.S. Effects of modification on microstructure and ultrahigh carbon (1.9wt%C) steel. *Mater Science and Engineering A*, 2011, vol. 528, no. 28, pp. 8263-8268
14. Fandrich R., Lunngen H., Wuppermann C.-D. Secondary metallurgy – state of the art and research trends in Germany. *Stahl und Eisen*, 2008, no. 2, pp. 50-53.

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. О. Вакуленко (Україна); д.т.н., проф. Н. Є. Калініно (Україна)*

Надійшла до редколегії 03.04.2013

Прийнята до друку 18.06.2013

## УДК 669.141.24-048.77

Ю. В. ТАТАРКО<sup>1\*</sup>, М. А. КУШНІР<sup>1</sup>, І. А. МАРКОВА<sup>1</sup>, Т. І. ІВЧЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технології виробництва», Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. + 38 (050) 480 81 90, ел. пошта julia.tatarko@gmail.com

**ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ МОДИФІКАТОРІВ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СТАЛІ R7**

**Мета.** Стабілізація хімічного складу та властивостей, зниження концентрацій шкідливих домішок, кількості неметалевих включень, подрібнення зерна колісної сталі R7 шляхом обробки багатокомпонентними модифікаторами. **Методика.** Досліджували хімічний склад та механічні властивості за UIC 812-3 і євростандартом EN 13262 серійних плавок сталі R7 та оброблених багатокомпонентним розкислювачем-модифікатором. Обробку даних проводили за допомогою регресивно-кореляційного аналізу. **Результати.** Установлено вплив операцій позапічної обробки на вміст шкідливих домішок. Найбільш ефективно знижувало концентрацію сірки введення комплексних модифікаторів. Показано, що в модифікованих плавках розкид як основних легуючих елементів, так і домішок зменшився, підвищилась однорідність та дисперсність структури, завдяки чому стабілізувались механічні властивості коліс. **Наукова новизна.** Вперше встановлено вплив кожного з етапів позапічної обробки сталі R7 на концентрацію шкідливих домішок, мікротвердість, структуру загартованих ківшових проб. Одержані залежності механічних характеристик від концентрацій шкідливих домішок. **Практична значимість.** Шляхом обробки багатокомпонентними розкислювачами-модифікаторами досягнуто стабілізацію хімічного складу, зниження концентрації сірки, кількості неметалевих включень, подрібнення зерна та підвищення однорідності структури, що сприяло стабілізації та підвищенню рівня механічних властивостей. Показано ефективність використання багатокомпонентних розкислювачів-модифікаторів для зростання якості сталі R7 та надійності коліс з неї.

**Ключові слова:** колісна сталь; позапічна обробка; багатокомпонентні розкислювачі-модифікатори; хімічний склад; механічні властивості; стабілізація

**Вступ**

Поліпшення якості колісних сталей є однією з важливіших проблем сучасного виробництва [6]. Перспективним шляхом її вирішення є позапічна обробка розплавів модифікаторами [3, 11, 12] для подрібнення зеренної та внутрішньозеренної структури, підвищення її однорідності, зниження концентрації шкідливих домішок, кількості неметалевих включень.

Колісні сталі є багатокомпонентними системами з широким інтервалом концентрацій легуючих елементів та домішок, що може призводити до нестабільності механічних властивостей і не прогнозованого зниження експлуатаційних характеристик. Питання стабілізації складу і властивостей розплавів залишається актуальним, незважаючи на використання технологій вакуумування сплавів у рідкому стані, впровадження безперервного лиття, обробки рідини металів алюмінієвою катанкою, порошковими проволочками тощо.

**Мета**

Пропоновані дослідження мали за мету стабілізацію хімічного складу та властивостей, зниження концентрацій шкідливих домішок, кількості неметалевих включень, подрібнення зерен колісної сталі R7 шляхом обробки багатокомпонентними модифікаторами.

**Методика**

Матеріалом для досліджень були ківшові проби після позапічної обробки сталі R7 та зразки, які вирізані з готових коліс з неї.

Проведено аналіз хімічного складу, механічних властивостей та структур, які були визначені за UIC 812-3 і євростандартом EN 13262, серійної та обробленої багатокомпонентним розкислювачем-модифікатором [7, 8] колісної сталі марки R7. Обробку даних проводили за допомогою регресійно-кореляційного аналізу. Досліджували вміст шкідливих домішок, мікротвердість та структуру загартованих зразків ківшових проб після кожного з етапів позапічної обробки.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

## Результати

Для оцінки впливу концентрацій шкідливих домішок у результаті регресійно-кореляційного аналізу масивів даних серійної сталі визначені коефіцієнти кореляції механічних властивостей з вмістом сірки та фосфору (таблиця 1). На рис. 1 показано графічні та аналітичні залежності характеристик міцності і роботи удару від концентрації сірки в колесах зі сталі R7.

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції механічних властивостей та концентрацій шкідливих домішок

| Механічні властивості        | Коефіцієнти кореляції |       |
|------------------------------|-----------------------|-------|
|                              | S                     | P     |
| Границя міцності ободу       | -0,27                 | -0,09 |
| Границя текучості ободу      | -0,20                 | -0,23 |
| Відносне подовження ободу    | -0,09                 | -0,18 |
| Робота удару при 20 °С ободу | -0,38                 | -0,26 |
| Робота удару при мінус 20 °С | -0,21                 | -     |
| Границя міцності диску       | -0,38                 | 0,03  |
| Відносне подовження диску    | 0,03                  | -0,14 |

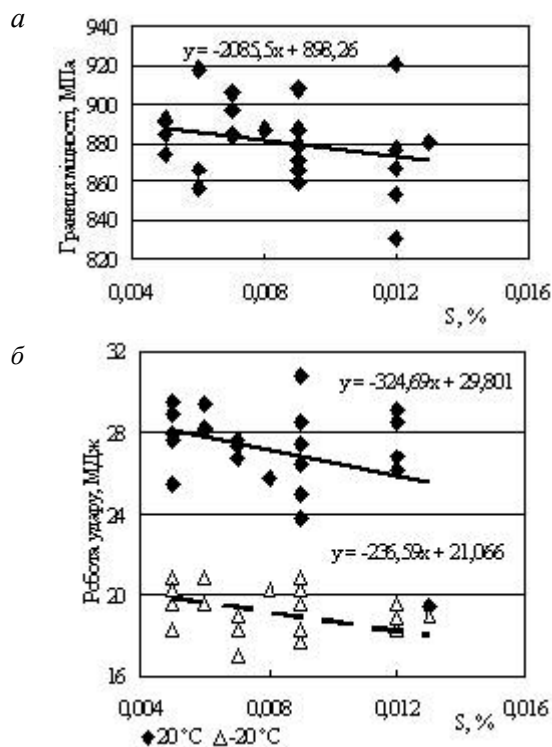


Рис. 1. Залежність механічних властивостей обода від концентрації сірки: а – границя міцності, б – робота удару при позитивних та негативних температурах

Як виходить з наведених даних, границя міцності обода і диска, твердість, робота удару при позитивних та негативних температурах обода зменшувались при зростанні вмісту сірки, значення відносного подовження майже не залежали від її концентрації. Підвищення вмісту фосфору викликало зниження характеристик пластичності ободу і диску, роботи удару ободу, майже не впливаючи на міцність. Таким чином, слід очікувати, що зниження концентрацій шкідливих домішок буде сприяти підвищенню границі міцності та роботи удару при позитивних та негативних температурах.

Досліджено зміну вмісту сірки і фосфору в процесі позапічної обробки колісної сталі R7 серійної та обробленої комплексними модифікаторами (таблиця 2). Склад багатоконпонентних модифікаторів розроблено з урахуванням термодинамічних, технологічних, фізичних, фізико-хімічних властивостей компонентів. Вони відрізняються дискретністю структури, мають певну вагу для проходження в метал через шлак. Це забезпечує їх високоефективну взаємодію з розплавом у всьому об'ємі, що збігається з дослідженнями, викладеними С. В. Корнєєвим та ін. [9].

Таблиця 2

Зміна концентрацій сірки та фосфору на різних етапах позапічної обробки

| № етапу | Етап                                                | Вміст сірки, % |        | Вміст фосфору, % |        |
|---------|-----------------------------------------------------|----------------|--------|------------------|--------|
|         |                                                     | серійн.        | модиф. | серійн.          | модиф. |
| 1       | Після мартену                                       | 0,020          | 0,034  | 0,010            | 0,008  |
| 2       | Після введення шлакоутворюючих, феросплавів, нікелю | 0,018          | 0,028  | 0,010            | 0,005  |
| 3       | Перша стадія розкислення (Al проволока, SiCa) РМШ*  | 0,016          | 0,017  | 0,012            | 0,005  |
| 4       | Вакуумування, доведення хімічного складу            | 0,010          | 0,006  | 0,012            | 0,005  |
| 5       | Друге розкислення (Al проволока, SiCa) РМШ*         | 0,010          | 0,004  | 0,012            | 0,005  |

\* – тільки для модифікованих плавов

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

З наведених даних видно, що жодна з операцій позапічної обробки майже не мала впливу на вміст фосфору. Незначне зниження його концентрації відбувалося після введення кальцієвмісних технологічних добавок, незначне зростання після введення технологічних добавок, які могли містити фосфор.

У серійних плавках концентрація сірки зменшувалась на кожному етапі позапічної обробки, що особливо помітно під час вакуумування, загалом від 0,020 % до 0,010 %, див. табл. 2, що збігається з даними [10]. Найбільш ефективно знижувало концентрацію сірки введення комплексних модифікаторів. Як видно з табл. 2, її вміст зменшувався з 0,034 % після мартену до 0,004 % після завершення позапічної обробки.

Паралельно з хімічним складом на різних етапах позапічної обробки модифікованої сталі вимірювали мікротвердість металу ківшевої проби після гартування (рис. 2).

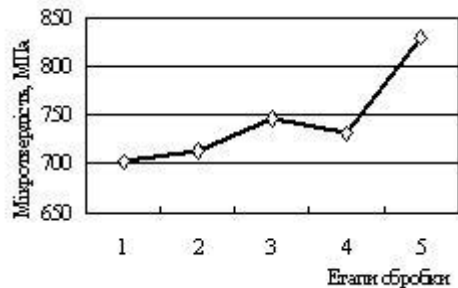


Рис. 2. Зміна мікротвердості зразків у процесі позапічної обробки

Виявилося, що після введення комплексних модифікаторів мікротвердість металу зростала. Металографічне дослідження загартованих зразків показало формування більш однорідної та дисперсної структури після третього та п'ятого етапів. Таким чином, обробка багатокомпонентними розкислювачами-модифікаторами не тільки сприяла видаленню шкідливих домішок, а й впливала на формування структури. Це давало підставу очікувати підвищення границі міцності, твердості та ударної в'язкості [1, 13, 14].

Проведено порівняльні дослідження хімічного складу, структури, механічних властивостей коліс, виготовлених з серійного та модифікованого металу.

Дані з розкиду концентрацій компонентів сталі R7 між плавками та в межах однієї плавки наведено в табл. 3.

Таблиця 3

**Розкид вмісту хімічних елементів у сталі R7**

| Елементи | Розкид концентрацій елементів, % за масою |          |                |        |
|----------|-------------------------------------------|----------|----------------|--------|
|          | між плавками                              |          | в межах плавки |        |
|          | серійна                                   | модифік. | серійна        | модиф. |
| C        | 0,06                                      | 0,04     | 0,03           | 0,01   |
| Mn       | 0,11                                      | 0,01     | 0,04           | 0,03   |
| Si       | 0,08                                      | 0,05     | 0,03           | 0,015  |
| P        | 0,013                                     | 0,011    | 0,004          | 0,003  |
| S        | 0,012                                     | 0,002    | 0,004          | 0,002  |
| Cr       | 0,06                                      | 0,05     | 0,02           | 0,015  |
| Ni       | 0,04                                      | 0,11     | 0,01           | 0,01   |
| Mo       | 0,008                                     | 0,016    | 0,005          | 0,005  |
| V        | 0,020                                     | 0,006    | 0,004          | 0,002  |

З таблиці виходить, що в модифікованих плавках розкид як основних легуючих елементів, так і домішок, як між плавками, так і в межах однієї плавки, мав менші значення. Слід відзначити, що в результаті обробки комплексними модифікаторами суттєво знизилась концентрація сірки. Це обумовило зменшення кількості неметалевих включень, у тому числі сульфідів, як тонких, так і товстих (рис. 3).

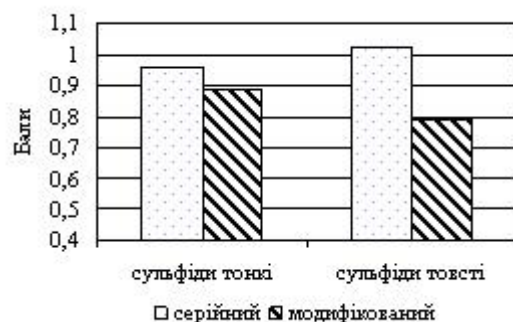


Рис. 3. Зменшення кількості сульфідів під впливом модифікування в плавках сталі R7

Змінились також розміри, форма та розташування неметалевих включень, сформувалися дрібні глобулярні неметалеві включення, а не гострокутові більших розмірів, як у серійній сталі [5]. Це дозволить зменшити негативний вплив неметалевих включень як концентраторів напружень на механічні властивості [4].

У результаті металографічних досліджень встановлено підвищення однорідності та подрібнення зеренної структури під дією комплексних модифікаторів. На рис. 4 представлено гістограму розподілу розмірів зерен у серійних та модифікованих плавках.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

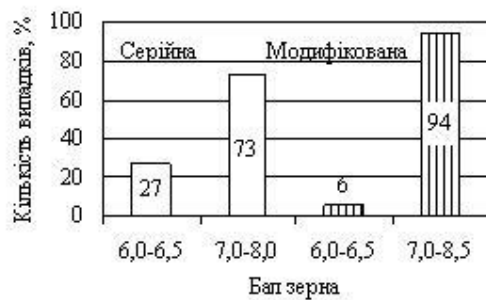


Рис. 4. Розподіл розмірів зерен у серійних та модифікованих плавках сталі R7

Як видно з рис., 27 % серійних плавок мали розмір зерна 6,0...6,5 бали, 73 % – 7,0...8,0 бали, в модифікованих же плавках більш дрібне зерно (7,0...8,5 бали) мали 94 % плавок і тільки 6 % – 6,0...6,5 бали, тобто зеренна структура модифікованого металу була більш однорідною та дрібною. Це обумовлено розвитком кристалізації на багатьох субмікроскопічних центрах. Вони частково вносяться самим модифікатором, частково утворюються в розплаві при взаємодії компонентів модифікатора і розплаву.

Формування однорідної структури з дрібним зерном мало сприяє стабілізації властивостей металу [2], підвищенню міцності та ударної в'язкості. Так середні значення границі міцності в серійних плавках складала 881 МПа, а в модифікованих – 899 МПа, відповідні значення роботи удару були 23,8 та 26,9 Дж.

Розкид механічних властивостей коліс, виготовлених з однієї та різних плавки серійної сталі R7 і обробленої багатокомпонентними модифікаторами, наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

## Розкид механічних властивостей у сталі R7

| Сталь R7              | Розкид механічних властивостей обода коліс |                  |              |        |
|-----------------------|--------------------------------------------|------------------|--------------|--------|
|                       | $\sigma_b$ , МПа                           | $\sigma_T$ , МПа | $\delta$ , % | KU, Дж |
| У межах однієї плавки |                                            |                  |              |        |
| Серійна               | 60                                         | 51               | 6            | 5,9    |
| Модифікована          | 56                                         | 46               | 3            | 1,2    |
| Між плавками          |                                            |                  |              |        |
| Серійна               | 96                                         | 129              | 8,6          | 11,4   |
| Модифікована          | 25                                         | 41               | 1,4          | 5,8    |

З таблиці виходить, що всі характеристики механічних властивостей мали більш стабільні значення у випадку обробки багатокомпонентними модифікаторами.

Формування однорідної структури обумовило підвищення виходу придатної продукції (колiс) з одного зливку.

## Наукова новизна та практична значимість

Вперше встановлено вплив кожного з етапів позапічної обробки на концентрацію шкідливих домішок, мікротвердість, структуру загартованих ківшових проб сталі R7.

Доведено, що використання розроблених комплексних модифікаторів сприяло розвитку об'ємної кристалізації.

Визначено залежність механічних характеристик від зміни концентрацій сірки і фосфору в межах, припустимих технічною документацією.

Практична значимість отриманих результатів полягає в підвищенні якості колісної сталі R7 за рахунок стабілізації хімічного складу та механічних властивостей, зменшення концентрації шкідливих домішок та кількості неметалевих включень шляхом використання розроблених за участю авторів багатокомпонентних розкислювачів-модифікаторів. Це дало можливість виготовляти з одного зливку на 5...10 % коліс більше, ніж за традиційною технологією.

## Висновки

Доведено ефективність використання багатокомпонентних розкислювачів-модифікаторів для підвищення якості сталі R7 за рахунок реалізації об'ємного механізму кристалізації. Це сприяло рівномірному розподілу компонентів та формуванню однорідної структури у всьому об'ємі зливку, що обумовило стабілізацію хімічного складу та механічних властивостей в межах кожної плавки та між плавками.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вакуленко, Л. И. Повреждаемость при эксплуатации катаных железнодорожных колес повышенной прочности / Л. И. Вакуленко, В. Г. Анофриев // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 231–234.
2. Вплив структурного стану вуглецевої сталі на процес утворення аустеніту при нагріві в двофазну ( $\alpha+\gamma$ )-область / І. О. Вакуленко, Б. І. Кіндрацький, С. О. Яковлев, І. Є. Крамар, О. І. Шаптала // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 36. – С. 218–221.
3. Голубцов, В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи / В. А. Голубцов. – Челябинск, 2006. – 422 с.
  4. Губенко, С. И. Особенности развития пластической деформации вблизи неметаллических включений / С. И. Губенко // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2013. – Вып. 67. – С. 46–50.
  5. Исследование состава и идентификация неметаллических включений, выявляемых при контроле железнодорожных колес // А. И. Бабаченко, П. Л. Литвиненко, А. А. Кононенко, А. В. Рослик // Металлургия и горнорудная промышленность. – 2011. – № 5. – С. 45–48.
  6. Напрямки підвищення надійності використання залізничних коліс / І. О. Вакуленко, О. М. Перков, Б. О. Перков, А. Е. Камишний // Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп. : тези доповідей 67 міжн. наук.-практ. конф. / Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – С. 244–245.
  7. Пат. 91633 Україна, МПК7 C22C 35/00 C21C 7/04. Розкислювач-модифікатор для обробки розплавів сталей та сплавів / Шаповалова О. М., Шаповалов В. П., Шаповалов О. В., Кушнір М. А., Татарко Ю. В. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т імені Олеся Гончара. – № а 2009 00952 ; заявл. 09.02.2009 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15. – 6 с.
  8. Сировинні композити для обробки сталей та безрозплавна технологія їх виготовлення / О. В. Шаповалов, О. П. Бабенко, Т. І. Івченко, І. А. Маркова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 6. – С. 48–50.
  9. Технологические особенности модифицирующей обработки стали / С. В. Корнеев, В. А. Розум, И. А. Трусова, С. П. Заруцкий // Литье и металлургия. – 2011. – № 4. – С. 115–121.
  10. Шаповалова, О. М. Влияние формы слитка и вакуумирования на содержание серы в колесной стали КП-2 / О. М. Шаповалова, А. В. Дейнега // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 28. – С. 175–179.
  11. Шуб, Л. Г. О целесообразности модифицирования стального литья / Л. Г. Шуб, А. Ю. Ахмадеев // Металлургия машиностроения. – 2006. – № 5. – С. 38–41.
  12. Chaob, Z. Transformation Conditions – Microstructures – Mechanical Properties Relationship in 0,60 % C Hypoeutectoid Steel / Z. Chaobi, L. Yazheng, Z. Leyu // Steel Res. Int. – 2011. – Vol. 82, № 10. – P. 1207–1212.
  13. Lin, K. Effects of modification on microstructure and ultrahigh carbon (1,9 % C) steel / K. Lin, X. Dun, J. Lai // Mater Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 528, № 28. – P. 8263–8268.
  14. Mirsada, O. Alloys with modified characteristics // O. Mirsada, R. Milenko, B. Omer / Materials in technologies. – 2011. – Vol. 45, № 5. – P. 483–485.

Ю. В. ТАТАРКО<sup>1\*</sup>, М. А. КУШНИР<sup>1</sup>, И. А. МАРКОВА<sup>1</sup>, Т. И. ИВЧЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Технологии производства», Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Днепропетровск, Украина, тел. + 38 (050) 480 81 90, эл. почта julia.tatarko@gmail.com

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ R7

**Цель.** Стабилизация химического состава и свойств, снижение концентраций вредных примесей, количества неметаллических включений, измельчение зерна колесной стали R7 путем обработки многокомпонентными модификаторами. **Методика.** Исследован химический состав и механические свойства согласно UIC 812-3 и евростандарту EN 13262 серийных плавов стали R7, обработанных многокомпонентным раскислителем-модификатором. Обработка данных проведена с помощью регрессионно-корреляционного анализа. **Результаты.** Установлено влияние операций внепечной обработки на содержание вредных примесей. Наиболее эффективно снижает концентрацию серы введение комплексных модификаторов. Показано, что в модифицированных плавках разброс как основных легирующих элементов, так и примесей уменьшился, повысилась однородность и дисперсность структуры, благодаря чему стабилизировались механические свойства колес. **Научная новизна.** Впервые установлено влияние каждого из этапов внепечной обработки стали R7 на концентрацию вредных примесей, микротвердость, структуру закаленных ковшевых проб. Получены зависимости механических характеристик от концентраций вредных примесей. **Практическая значимость.** Путем обработки многокомпонентными раскислителями-модификаторами достигнута стабилизация химического состава, снижение концентрации серы, количества неметаллических включений, измельчение зерна

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

и повышение однородности структуры, что способствовало стабилизации расплава и повышению уровня механических свойств. Показана эффективность использования многокомпонентных раскислителей-модификаторов для улучшения качества стали R7 и надежности колес из нее.

**Ключевые слова:** колесная сталь; внепечная обработка; многокомпонентные раскислители-модификаторы; химический состав; механические свойства; стабилизация

J. TATARKO<sup>1\*</sup>, M. KUSHNIR<sup>1</sup>, I. MARKOVA<sup>1</sup>, T. IVCHENKO<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> Dep. «Technologies of production», Dnipropetrovsk National University named after Oles Gonchar, Gagarin Av., 72, 49050, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. + 38 (050) 480 81 90, e-mail julia.tatarko@gmail.com

## USE OF COMPLEX MODIFIERS FOR IMPROVEMENT OF STEEL R7 QUALITY

**Purpose.** Stabilizing of chemical composition and properties, decrease of detrimental impurities concentrations, amount of nonmetallics, grinding down of grain of the R7 wheeled steel by treatment of multicomponent modifiers.

**Methodology.** Probed chemical composition and mechanical properties in accordance with UIC 812-3 and EN 13262 serial melting steel R7 and treated a multicomponent deoxidizers-modifiers are researched. Processing of data is conducted by a regressive-cross-correlation analysis. **Findings.** Influence of operations of out-of-furnace treatment is set on detrimental impurities concentration. Using of complex modifiers has reduced the concentration of sulfur most effectively. It is shown that in the modified melting variation of both basic alloying elements and admixtures has decreased, homogeneity and dispersion of structure have increased, what mechanical properties of wheels were stabilized due to. **Originality.** Influence was first set each of the stages of out-of-furnace treatment steel R7 on the detrimental impurities concentration, micro hardness, structure of hard-tempered tests. Dependences of mechanical characteristics were got of the detrimental impurities concentrations. **Practical value.** By treatment of multicomponent deoxidizers-modifiers, stabilization of chemical composition, sulfur concentration reducing, nonmetallic inclusions amount, grain refining and improving the homogeneity of the structure are achieved, this led to stabilizing and increase of mechanical properties level. It is shown the efficiency of multicomponent deoxidizers-modifiers usage in order to improve quality of steel R7 and reliability of wheels made of it.

**Keywords:** wheeled steel; out-of-furnace treatment; multicomponent deoxidizers-modifiers; chemical composition; mechanical properties; stabilization

## REFERENCES

1. Vakulenko L.I. Povrezhdayemost pri ekspluatatsii katanykh zheleznodorozhnykh koles povyshennoy prochnosti [Damage probability during exploitation of rolled railway wheels of extra-strong] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 231-234.
2. Vakulenko I.O., Kindratskiy B.I., Yakovlev S.O., Kramar I.Ye., Shaptala O.I. Vplyv strukturnoho stanu vuhletsevoi stali na protses utvorennia austenitu pry nahrivi v dvofaznu ( $\alpha+\gamma$ )-oblast [Influence of the structural state of carbon steel on the process of formation of austenite at heating in dysphasic ( $\alpha+\gamma$ ) - range]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 218–221.
3. Golubtsov V.A. *Teoriya i praktika vvedeniya dobavok v stal vne pechi* [Theory and practice of introduction of additions in steel out of stove]. Chelyabinsk Publ., 2006. 422 p.
4. Gubenko S.I. *Osobennosti razvitiya plasticheskoy deformatsii vblizi nemetallicheskih vklyucheniy* [Features of development of flowage nearby nonmetallics]. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye – Construction, Metal Science, Mechanical Engineering*, 2013, issue 67, pp.46-50.
5. Babachenko A.I., Litvinenko P.L., Kononenko A.A., Roslik A.V. Issledovaniye sostava i identifikatsiya nemetallicheskih vklyucheniy, vyavlyayemykh pri kontrole zheleznodorozhnykh koles [Researches of composition and authentication of nonmetallics, exposed at railway wheels control]. *Metallurgiya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgy and Mining Industry*, 2011, no. 5, pp.45-48.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

6. Vakulenko I.O., Perkov O.M., Perkov B.O., Kamishnyi A.Ye. *Napriamky pidvyshchennia nadiinosti vykorystannia zaliznychnykh kolis* [Directions of increase the reliability of the railway wheels use]. Tezy dopovidei 67 mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zalizничного транспорту» [Proc. of the 67<sup>th</sup> Int. Scientific and Practical Conf. «Problems and prospects of the railway transport development»]. Dnipropetrovsk, 2007, pp.244-245.
7. Shapovalova O.M., Shapovalov V.P., Shapovalov O.V., Kushnir M.A., Tatarko Yu.V. *Rozkysliuvach-modyfikator dlia obrobky rozplaviv stalei ta splaviv* [Deoxidizer-modifier for treatment of steels and alloys fusions]. Patent UA, no. a 2009 00952, 2009.
8. Shapovalov O.V., Babenko O.P., Ivchenko T.I., Markova I.A. *Syrovynni kompozyty dlia obrobky stalei ta bezrozplavna tekhnolohiia yikh vyhotovlennia* [Raw material composites for treatment of steels and non-melting technology of their manufacture]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost – Metallurgy and Mining Industry*, 2012, no. 6, pp. 48-50.
9. Korneyev S.V., Rozum V.A., Trusova I.A., Zarutskiy S.P. *Tekhnologicheskiye osobennosti modifitsiruyushchey obrabotki stali* [The technological features of modifying treatment of steel]. *Litye i metalurgiya – Casting and Metallurgy*, 2011, no. 4, pp. 115-121.
10. Shapovalova O.M., Deynega A.V. *Vliyanie formy slitka i vakuumirovaniya na sodержaniye sery v kolesnoy stali KP-2* [Influence of the ingot form and vacuuming on the sulfur content in wheel steel KP-2]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnogo universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 28, pp. 175-179.
11. Shub L.G., Akhmadeyev A.Yu. *O tselesoobraznosti modifitsirovaniya stalnogo litya* [About expedience of modifying treatment of the steel casting]. *Metallurgiya mashinostroyeniya – Metallurgy of Mechanical Engineering*, 2006, no. 5, pp. 38-41.
12. Chaobi Z., Yazheng L., Leyu Z. *Transformation Conditions –Microstructures – Mechanical Properties Relationship in 0,60 % C Hypoeutectoid Steel*. *Steel Pesearch International*, 2011, vol. 82, no. 10, pp. 1207-1212.
13. Lin K., Dun X., Lai J. *Effects of modification on microstructure and ultrahigh carbon (1,9 % C) steel*. *Mater Science and Engineering A*, 2001, vol. 528, no. 28, pp. 8263-8268.
14. Mirsada O., Milenko R., Omer B. *Alloys with modified characteristics*. *Materials in Technologies*, 2011, vol. 45, no. 5, pp. 483-485.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. О. Вакуленко (Україна); д.т.н., проф. М. О. Матвєєвою (Україна)

Надійшла до редколегії 02.04.2013

Прийнята до друку 14.06.2013

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

УДК 629.4

Е. П. БЛОХИН<sup>1</sup>, М. Л. КОРОТЕНКО<sup>1</sup>, И. В. КЛИМЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Отраслевая научно-исследовательская лаборатория динамики и прочности подвижного состава железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 793 19 08, эл. почта irklmn@mail.ru

### ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ ОТ СХОДА КОЛЕСА С РЕЛЬСОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЛИБО БОКОВОЙ СИЛЫ

**Цель.** Уточнение критериев безопасности от схода колеса с рельсов, в которых используется либо боковая, либо направляющая силы. **Методика.** Методика связана с анализом выражений критериев безопасности от схода колеса с рельсов, в которых используется боковая или направляющая силы в положении предельного равновесия системы, а также с анализом выражений для коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельсов при использовании указанных критериев. **Результаты.** Показано, что критерии безопасности от схода колеса с рельсов, представляющие собой либо отношение боковой силы к вертикальной, либо направляющей силы к вертикальной, действующие в точке контакта гребня набегающего колеса с головкой рельса, эквиваленты. В отношении коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельсов показано, что вблизи границы безопасности их использование дает практически одинаковые результаты. **Научная новизна.** Проведена детализация понятий критериев безопасности, использующих боковую или направляющую силы, и показана их эквивалентность. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют вместо двух выражений критериев безопасности, приводящихся в нормативной литературе, использовать одно из этих двух выражений, что дает ряд удобств при обработке результатов испытаний. Также даны рекомендации по использованию критериев, в которых используется отношение боковой или направляющей силы к вертикальной, действующих в точке контакта гребня набегающего колеса с головкой рельса.

**Ключевые слова:** критерий безопасности; сход колеса с рельсов; коэффициент запаса устойчивости; безопасность; сход

#### Введение

Еще в 1976 г. в работе [6] отмечалось, что до тех пор не было единого мнения, какое из отношений  $\frac{Y_b}{P_1}$ ,  $\frac{Y_n}{P_1}$ ,  $\frac{Y_p}{P_1}$  горизонтальных поперечных сил, действующих на колесную пару, к вертикальной силе  $P_1$ , действующей в точке контакта конической части гребня (при одноточечном контакте) с головкой рельса, следует

выбрать в качестве критерия безопасности колеса от схода с рельсов. Здесь через  $Y_b$  обозначена боковая сила в точке контакта гребня и головки рельса, через  $Y_n$  – направляющая сила, через  $Y_p$  – рамная сила, то есть горизонтальная поперечная сила, действующая на колесную пару со стороны рамы тележки.

Так, например, для оценки безопасности от схода колеса с рельсов для вагонов используется коэффициент запаса устойчивости от схода

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

колеса с рельсов, в который входит критерий безопасности (1) как отношение боковой силы  $Y_B$  к вертикальной  $P_1$ , действующих в точке контакта гребня набегающего колеса с головкой рельса при одноточечном контакте [3]:

$$\frac{Y_B}{P_1} < \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \beta} = \frac{\sin \beta - \mu \cos \beta}{\cos \beta + \mu \sin \beta}, \quad (1)$$

а для оценки безопасности движения локомотивов и моторвагонного подвижного состава используется коэффициент запаса устойчивости, в который входит критерий (2) как отношение направляющей силы  $Y_H$  к вертикальной  $P_1$  [10, 11]:

$$\frac{Y_H}{P_1} < \frac{1}{\operatorname{ctg} \beta + \mu} = \frac{\sin \beta}{\cos \beta + \mu \sin \beta}, \quad (2)$$

Здесь  $\beta$  – угол наклона образующей конической части гребня к горизонту;  $\mu$  – коэффициент трения.

**Цель**

Цель данной работы – показать эквивалентность критериев безопасности от схода колеса с рельсов, в которых используется либо боковая, либо направляющая силы, а также провести анализ выражений для коэффициентов запаса устойчивости от схода колеса с рельсов, использующих указанные критерии.

**Методика**

Методика решения поставленной задачи связана с анализом выражений критериев безопасности от схода колеса с рельсов, в которых используется боковая или направляющая сила в положении предельного равновесия системы, а также с анализом выражений для коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельсов при использовании указанных критериев. Для этого используем известное соотношение [8]

$$Y_H = N_1 \sin \beta \quad (3)$$

и [1]

$$Y_H = Y_B + H_1, \quad (4)$$

где  $N_1$  – нормальная реакция рельса в точке контакта;  $H_1$  – проекция на горизонтальную ось силы трения  $T_1$  в точке контакта набегающего колеса с рельсом.

Так как

$$T_1 = \mu \cdot N_1, \quad (5)$$

а

$$H_1 = T_1 \cos \beta = \mu N_1 \cos \beta, \quad (6)$$

то, используя (3), (4) и (6), получим

$$Y_B = N_1 (\sin \beta - \mu \cos \beta). \quad (7)$$

Подставив (7) в (1), выразим критерий безопасности (1) через нормальную силу  $N_1$ :

$$\frac{N_1}{P_1} < \frac{1}{\cos \beta + \mu \sin \beta}. \quad (8)$$

Аналогично, подставив (3) в выражение критерия (2), получим:

$$\frac{N_1}{P_1} < \frac{1}{\cos \beta + \mu \sin \beta}, \quad (9)$$

то есть выражения критериев (1) и (2) приведены к одному и тому же выражению, что свидетельствует об их эквивалентности.

Иным путем это можно показать, если взять отношение выражений (3) и (7):

$$\frac{Y_H}{Y_B} = \frac{\sin \beta}{\sin \beta - \mu \cos \beta}, \quad (10)$$

из которого следует, что

$$Y_H = Y_B \frac{\sin \beta}{\sin \beta - \mu \cos \beta}. \quad (11)$$

Легко проверить, что подстановкой (11) в (2) можно получить критерий безопасности (1).

Из эквивалентности выражений критерия безопасности (1) и (2) следует, что для оценки безопасности движения подвижного состава от схода колеса с рельсов равнозначно применение и того, и другого выражения (1) или (2). Выбор одного из этих выражений для оценки безопасности движения подвижного состава от схода колеса с рельсов можно оценивать равнозначно по любому из них, и выбор того или

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

иною определяется удобством его использования, и нет смысла рассматривать эти критерии как независимые.

Для количественной оценки опасности схода колеса с рельса принято использовать коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельсов.

Для вагонов используют коэффициент запаса устойчивости, представляющий отношение в состоянии предельного равновесия перед скольжением колеса вниз относительно головки рельса теоретического значения боковой силы к вертикальной нагрузке на набегавшем

колесе к его опытному значению [2-6, 9, 12–17]:

$$K_{y1} = \frac{\left(\frac{Y_6}{P_1}\right)_{\text{теор}}}{\left(\frac{Y_6}{P_1}\right)_{\text{оп}}} \quad (12)$$

Если выразить формулу (12) через динамические показатели конкретного вагона, то, как известно, эта формула примет вид:

$$K_{y1} = \frac{\text{tg}\beta - \mu}{1 + \mu \text{tg}\beta} \cdot \frac{P_1}{Y_6} = \frac{\text{tg}\beta - \mu}{1 + \mu \text{tg}\beta} \cdot \frac{2Q_{\text{ш}} \left[ \frac{b-a_2}{\ell} (1-k_{\text{дв1}}) - \frac{b}{\ell} k_{\text{дв2}} \right] + Y_p \cdot \frac{r}{\ell} + q \cdot \frac{b-a_2}{\ell}}{Y_p + \mu \cdot \left\{ 2Q_{\text{ш}} \left[ \frac{b-a_1}{\ell} (1-k_{\text{дв1}}) + \frac{b}{\ell} k_{\text{дв2}} \right] - Y_p \cdot \frac{r}{\ell} + q \cdot \frac{b-a_1}{\ell} \right\}} \quad (13)$$

где  $Q_{\text{ш}}$  – сила тяжести обрессоренных частей вагона, действующая на шейку оси колесной пары;  $q$  – сила тяжести необрессоренных частей, приходящихся на колесную пару;  $k_{\text{дв1}}$  – расчетное значение коэффициента вертикальной динамики экипажа;  $k_{\text{дв2}}$  – расчетное значение коэффициента динамики боковой качки;  $Y_p = k_{\text{дг}} \cdot P_{\text{ст}}$  – расчетное среднее значение рамной силы;  $k_{\text{дг}}$  – коэффициента горизонтальной динамики;  $P_{\text{ст}} = q + 2Q_{\text{ш}}$  – статическое давление колеса на рельс;  $2b$  – расстояние между серединами шеек оси;  $\ell$  – расчетное расстояние между средними точками контакта колес с рельсами;  $a_{1,2}$  – расстояние от точек контакта до середин шеек;  $r$  – радиус среднеизношенного колеса.

$$K_{y2} = \frac{1}{\text{ctg}\beta + \mu} \cdot \frac{P_1}{Y_H} =$$

$$= \frac{1}{\text{ctg}\beta + \mu} \cdot \frac{Q_{\text{ш}} \left[ 2(b-a_2) - k_{\text{дв1}}(\ell + a_1) + a_2 k_{\text{дв2}} \right] + Y_p \cdot r +}{\left( Y_p \cdot \ell + \mu \cdot \left\{ Q_{\text{ш}} \left[ 2(b-a_1) - k_{\text{дв2}}(\ell + a_2) + a_1 k_{\text{дв1}} \right] - Y_p \cdot r + q \cdot (b-a_1) \right\} \right) \cdot (1 + \mu \sin\beta \cos\beta) +} \quad (15)$$

$$\frac{+ q \cdot (b-a_2)}{+ \left\{ Q_{\text{ш}} \left[ 2(b-a_2) - k_{\text{дв1}}(\ell + a_1) + a_2 \cdot k_{\text{дв2}} \right] + Y_p \cdot r + q(b-a_2) \right\} \mu \cos^2 \beta}$$

Для локомотивов и моторвагонного подвижного состава используют коэффициент запаса устойчивости, представляющий отношение в состоянии предельного равновесия перед скольжением колеса вниз относительно головки рельса теоретического значения направляющего усилия к вертикальной нагрузке на набегавшем колесе к его опытному значению [10]:

$$K_{y2} = \frac{\left(\frac{Y_H}{P_1}\right)_{\text{теор}}}{\left(\frac{Y_H}{P_1}\right)_{\text{оп}}} \quad (14)$$

или, после выражения формулы (14) через динамические показатели конкретного локомотива, эта формула примет вид [10]:

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

## Результаты

Для анализа возможности использования формул (13) и (15) определим значения коэффициентов запаса устойчивости от схода колеса с рельсов по каждой из указанных формул для одного и того же локомотива при разных значениях его динамических параметров.

В качестве исходных данных возьмем данные магистрального грузо-пассажирского электровагона типа ДС3:  $P_{ст} = 221$  кН,  $q = 37$  кН,  $\beta = 70^\circ$ ,  $2b = 2,036$  м,  $\ell = 1,58$  м,  $a_1 = 0,264$  м,  $a_2 = 0,219$  м,  $r = 0,625$  м.

В первом варианте расчета рассматривается случай, когда берутся такие значения динамических параметров: коэффициенты вертикальной динамики в буксовой ступени подвешивания принимаются одинаковыми для набегающей и ненабегающей стороны колесной пары и их значения изменяются от 0 до 0,4. Коэффициент горизонтальной динамики берется постоянным и равным  $[k_{дг}] = 0,4$  (допускаемое значение). Результаты расчетов представлены на рис. 1. Здесь по горизонтали отложены значения коэффициентов вертикальной динамики в буксовой ступени рессорного подвешивания, а по вертикали – значение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельсов.

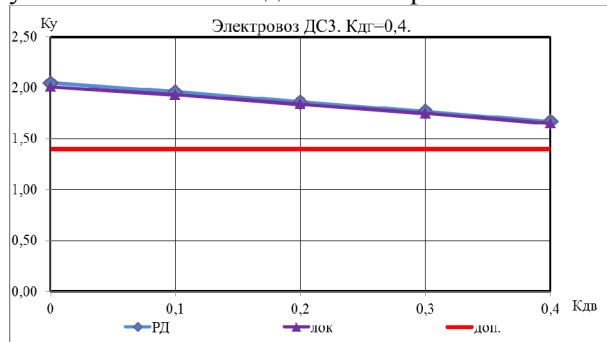


Рис. 1. Значения коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельсов, вычисленные по критерию с боковой силой (РД) и с направляющей силой (лок.) при изменении  $k_{дв}$

Из рис. 1 видно, что значения коэффициентов запаса устойчивости от схода колеса с рельсов, вычисленные по формулам (13) и (15), достаточно близки, причем они имеют большие расхождения при больших значениях коэффициента запаса устойчивости, что мало существ-

венно для оценки безопасности движения от схода колеса с рельсов, а при меньших значениях  $K_y$  вблизи его допускаемых нормативными документами [10] значениях практически совпадают (расхождение составляет 1 %).

Во втором варианте расчета рассматривается случай, когда коэффициенты вертикальной динамики в буксовой ступени подвешивания принимаются одинаковыми для набегающей и ненабегающей стороны колесной пары и равными 0,4, а коэффициент горизонтальной динамики изменяется от 0 до 0,4. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

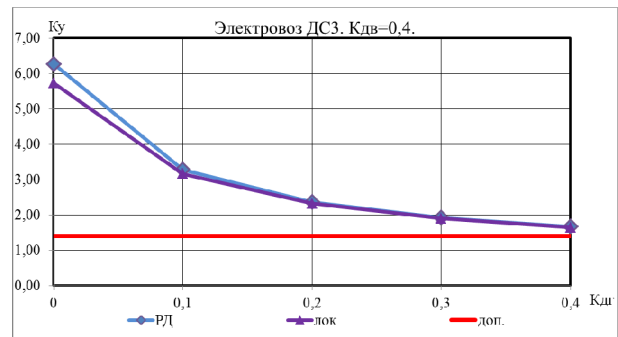


Рис. 2. Значения коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельсов, вычисленные по критерию с боковой силой (РД) и с направляющей силой (лок.) при изменении  $k_{дг}$

Из рис. 2 видно, что значения коэффициентов запаса устойчивости от схода колеса с рельсов, вычисленные по формулам (13) и (15), также достаточно близки и имеют большие расхождения при больших значениях коэффициента запаса устойчивости, что мало существенно для оценки безопасности движения от схода колеса с рельсов, а при меньших значениях  $K_y$  вблизи его допускаемых нормативными документами [10] значениях также практически совпадают (расхождение составляет 1 %).

### Научная новизна и практическая значимость

В работе проведена детализация понятий критериев безопасности от схода колеса с рельсов, использующих боковую или направляющую силы, и показана их эквивалентность.

Анализ возможностей применения критериев (1) и (2) в практике расчетов и эксперимен-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

тов показал, что преимущества в этом отношении имеет критерий (1) по боковой силе. Эти преимущества заключаются в следующем.

1. В случае использования из опыта сил, действующих со стороны надрессорного строения на колесную пару, при использовании формулы (13), полученной на основании первого критерия, упрощается расчетная формула по сравнению с формулой (15) для расчета  $K_y$ , полученной по второму критерию, так как вычисление боковой силы по указанным данным проще, чем направляющей силы.

2. При использовании из опыта сил взаимодействия колеса и рельса в точке контакта непосредственно, например, с помощью тензометрической колесной пары, определяется боковая сила, значения которой прямо подставляются в формулу для оценки безопасности движения от схода колеса с рельсов без всяких пересчетов. А в том случае, когда используется формула, в которую входит направляющая сила, то для ее определения нужны дополнительные расчеты.

3. Упрощается сравнение данных испытаний по критерию (1) с данными, полученными при помощи европейских норм [19], так как в этих нормах используется критерий безопасности движения от схода колеса с рельсов, связанный с боковой силой.

## Выводы

1. Показана эквивалентность критериев безопасности от схода колеса с рельсов, полученных с использованием либо боковой, либо направляющей сил.

2. Из рассмотренных двух эквивалентных критериев в качестве критерия безопасности от схода колеса с рельсов целесообразно выбрать критерий (1), представляющий отношение боковой силы к вертикальной в точке контакта гребня набегающего колеса с головкой рельса.

3. Результаты расчета, выполненные по формулам (13) и (15), практически совпадают. Поэтому нет смысла иметь две формулы для оценки безопасности и использовать для оценки степени безопасности разного типа подвижного состава единую формулу. При этом целесообразно использовать формулу для определения коэффициента запаса устойчивости, по-

лученную на основании критерия безопасности от схода колеса с рельсов, в которую входит боковая сила.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бирюков, И. В. Механическая часть тягового подвижного состава / И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак ; под ред. И. В. Бирюкова. – М. : Транспорт, 1992. – 440 с.
2. Блохин, Е. П. Динамика скоростного электровоза ДСЗ / Е. П. Блохин, А. Н. Пшинько, М. Л. Коротенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2004. – Вип. 5. – С. 9–12.
3. Блохин, Е. П. К вопросу зависимости коэффициента запаса устойчивости против схода колеса с рельса от горизонтальных поперечных ускорений пола в шкворневом сечении пассажирского вагона / Е. П. Блохин, С. В. Мямлин // Вісник СХУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2011. – № 12 (166). – Ч. 1. – С. 237–248.
4. Дьомін, Р. Ю. До способів оцінювання динамічної взаємодії коліс і рейок / Р. Ю. Дьомін, А. В. Мостович, Ю. В. Щербина // Вісник СХУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2010. – № 5 (147). – Ч. 1. – С. 27–31.
5. Коган, А. Я. Оценка достаточного условия устойчивости колеса на рельсе с учетом вероятностного характера влияющего на нее некоторых факторов / А. Я. Коган, Е. А. Черняков // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 2. – С. 36–41.
6. Кондрашов, В. М. Единые принципы исследования динамики железнодорожных экипажей в теории и эксперименте / В. М. Кондрашов. – М. : Интекст, 2001. – 190 с.
7. Кондрашов, В. М. Критерий устойчивости экипажа против схода с рельсов / В. М. Кондрашов // Труды ЦНИИ МПС. – М., 1976. – Вып. 548 – С. 75–86.
8. Медель, В. Б. Взаимодействие электровоза и пути / В. Б. Медель. – М. : Трансжелдориздат, 1956. – 335 с.
9. Мямлин, С. В. САПР железнодорожных вагонов. Алгоритм подсистемы «подбор автосцепного оборудования» / С. В. Мямлин, Е. П. Блохин, Е. Ф. Федоров // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 30. – С. 165–172.
10. Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов ж. д. МПС РФ колеи 1520 мм. – М. : МПС РФ, ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

11. Нормы расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств моторвагонного подвижного состава ж. д. МПС РФ колеи 1520 мм. – М. : МПС РФ, ВНИИЖТ, 1997. – 147 с.
12. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / [У. Дж. Харрис, С. М. Захаров, Дж. Ландгрэн, Х. Турне, В. Эберсен. ; пер. с англ. С. М. Захаров, С. С. Карцев, В. Л. Мельников, Б. М. Райсин]. – М. : Интекст, 2002. – 408 с. ; 1 электрон. опт. диск.
13. Погорелов, Д. Ю. Показатель для оценки опасности схода подвижного состава путем вкатывания колеса на головку рельса / Д. Ю. Погорелов, В. А. Симонов // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2010. – № 5 (147). – Ч. I. – С. 64–70.
14. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 101 с.
15. Туранов, Х. Т. Построение расчетной модели колесной пары вагона от вкатывания при движении подвижного состава по кривому участку пути / Х. Т. Туранов // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2010. – № 10 (152). – Ч. 2. – С. 196–204.
16. Elkins, J. New Criteria for Flange Climb Derailment / J. Elkins, Wu. Huimun // ASME/IEEE Joint Railroad Conference (4–6 April, 2000). – Newark, 2000. – P. 1–7.
17. Guangxiong, Ch. A New Method for Evaluation of Wheel Climb Derailment / Chen Guangxiong, Jin Xincan // ASME/IEEE Joint Railroad Conference (4–6 April, 2000). – Newark, 2000. – P. 9–13.
18. UIC Code 518 : 2009. Testing and approval of railway vehicles from the point at view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality. 3-d ed. Paris October 2005.

Є. П. БЛОХІН<sup>1</sup>, М. Л. КОРОТЕНКО<sup>1</sup>, І. В. КЛИМЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Галузева науково-дослідна лабораторія динаміки і міцності рухомого складу залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 793 19 08, ел. пошта irklmn@mail.ru

## ПРО ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ КРИТЕРІЇВ БЕЗПЕКИ ВІД СХОДУ КОЛЕСА З РЕЙОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ НАПРЯМНОЇ АБО БІЧНОЇ СИЛИ

**Мета.** Уточнення критеріїв безпеки від сходу колеса з рейок, у яких використовується або бічна, або напрямна сили. **Методика.** Методика пов'язана з аналізом виразів критеріїв безпеки від сходу колеса з рейок, у яких використовується бічна або напрямна сили в положенні граничної рівноваги системи, а також з аналізом виразів для коефіцієнта запасу стійкості від сходу колеса з рейок при використанні зазначених критеріїв. **Результати.** Показано, що критерії безпеки від сходу колеса з рейок, що представляють собою або відношення бічної сили до вертикальної, або напрямної сили до вертикальної, що діють у точці контакту гребеня колеса, що набігає, з головкою рейки, еквіваленти. Відносно коефіцієнта запасу стійкості від сходу колеса з рейок показано, що поблизу границі безпеки їх використання дає практично однакові результати. **Наукова новизна.** Проведено деталізацію понять критеріїв безпеки, що використовують бічну або напрямну сили, і показано їхню еквівалентність. **Практична значимість.** Одержані результати дозволяють замість двох виразів критеріїв безпеки, що приводяться в нормативній літературі, використовувати один із цих двох виразів, що дає ряд зручностей при обробці результатів випробувань. Також дані рекомендації з використання критеріїв, в яких використовується відношення бічної або напрямної сили до вертикальної, що діють в точці контакту гребеня набігаючого колеса з головкою рейки.

**Ключові слова:** критерій безпеки; схід колеса з рейок; коефіцієнт запасу стійкості; безпека; схід

**Ye. P. BLOKHIN<sup>1</sup>, M. L. KOROTENKO<sup>1</sup>, I. V. KLIMENKO<sup>1\*</sup>**

<sup>1\*</sup>Branch Research Laboratory of the Dynamics and Strength of Railway Rolling Stock, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str. 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 793 19 08, e-mail irklmn@mail.ru

## ON THE EQUIVALENCE OF SAFETY CRITERIA OF THE WHEELS DERAILMENT FROM THE RAILS WHEN USING THE DIRECTING OR LATERAL FORCE

**Purpose.** Clarification of safety criteria of the wheels derailment from the rails using either the lateral or the directing force. **Methodology.** Technique is connected with the analysis of safety criteria expressions of the wheels derailment from the rails, which use the lateral or the directing force in the position of limit equilibrium of the system, as well as with the analysis of expressions for the coefficient of stability from the wheels derailment from the rails when using the specified criteria. **Findings.** It is shown that the safety criteria of derailment, representing either the ratio of the lateral force to vertical one or the directing force ratio to the vertical one, which operate in the contact point of the climbing wheel flange with the rail head, are equivalent. As for the stability coefficient of derailment, it is shown that near to the safety limit their use yields almost the same results. **Originality.** The concept of the safety criteria, using the lateral or directing forces is specified and their equivalence is shown. **Practical value.** Obtained results allow one to use one of these two safety criteria expressions instead of two expressions cited in the normative literature, which gives the number of advantages for the processing of testing results. And the recommendations on the use of criteria, in which the ratio of lateral or directing forces to the vertical force acting in the contact point of the climbing wheel flange with the rail head were given.

**Keywords:** safety criteria; derailment of wheels from the rails; stability coefficient; safety; derailment

### REFERENCES

1. Biryukov I.V., Savoskin A.N., Burchak G.P. *Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava* [Mechanical portion of the traction rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1992. 440 p.
2. Blokhin Ye.P., Pshinko A.N., Korotenko M.L. Dinamika skorostnogo elektrovoza DS3 [Dynamics of the high-speed locomotive DS3]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2004, issue 5, pp. 9-12.
3. Blokhin Ye.P., Myamlin S.V. K voprosu zavisimosti koeffitsienta zapasa ustoychivosti protiv skhoda kolea s relsa ot gorizontalnykh poperechnykh uskoreniy pola v shkvornevom sechenii passazhirskogo vagona [To the question of dependency of derailment coefficient on the horizontal transverse acceleration]. *Visnyk Shkhdnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia* [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], 2011, no. 12 (166), Part 1, 237-248.
4. Domin R.Yu., Mostovych A.V., Shcherbyna Yu.V. Do sposobiv otsiniuvannia dynamichnoi vzaiemodii kolis i reiok [To the ways of evaluation the dynamic interaction between wheels and rails]. *Visnyk Shkhdnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia* [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], 2010, no. 5 (147), Part I, pp. 27-31.
5. Kogan A.Ya., Chernyakov Ye.A. Otsenka dostatochnogo usloviya ustoychivosti kolea na relse s uchetom veroyatnostnogo kharaktera vliyayushchego na naye nekotorykh faktorov [Evaluation of sufficient condition of the wheel stability on the rail, taking into account the probabilistic nature of some factors influencing it]. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Bulletin*, 2008, no. 2, pp. 36-41.
6. Kondrashov V.M. *Yedinyye printsipy issledovaniya dinamiki zheleznodorozhnykh ekipazhey v teorii i eksperimente* [Common principles of study of the railway vehicles dynamics in theory and experiment]. Moscow, Intekst Publ., 2001. 190 p.
7. Kondrashov V.M. Kriteriy ustoychivosti ekipazha protiv skhoda s relsov [Stability criterion of the vehicle against derailment]. *Trudy TsNII MPS. – Proceedings of Central Research Institute of the Ministry of Communications*, 1976, issue 548, pp. 75-86.
8. Medel V.B. *Vzaimodeystviye elektrovoza i puti* [Interaction of the electric locomotive and the track]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1956. 335 p.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

9. Myamlin S.V., Blokhin Ye.P., Fedorov Ye.F. SAPR zheleznodorozhnykh vagonov. Algoritm podsystemy «podbor avtostsepnogo oborudovaniya» [The computer-aided design of the railway cars. Algorithms of the subsystem «selection of auto coupling equipment»]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], Dnipropetrovsk, 2009, issue 30, pp. 165-172.
10. *Normy dlya rascheta i otsenki prochnosti nesushchikh elementov, dinamicheskikh kachestv i vozdeystviya na put ekipazhnoy chasti lokomotivov zh. d. MPS RF kolei 1520 mm* [Standards for calculating and assessing the strength of supporting elements, dynamic qualities and impact on the track of the locomotive under frame of the Ministry of Railways of the 1520 mm track]. Moscow, MPS RF, VNIIZhT Publ., 1998. 145 p.
11. *Normy rascheta i otsenki prochnosti nesushchikh elementov i dinamicheskikh kachestv motorvagonnogo podvizhnogo sostava zh. d. MPS RF kolei 1520 mm* [Standards of calculating and assessing the strength of supporting elements and the dynamic qualities of multiple unit of the Ministry of Railways of the 1520 mm track]. Moscow, MPS RF, VNIIZhT Publ., 1997. 147 p.
12. Kharris U. Dzh., Zakharov S.M., Landgren Dzh., Turne Kh., Ebersen V. *Obobshcheniye peredovogo opyta tyazhelovestnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolea i relsa* [Generalization of the advanced experience of the heavy-weight traffic: problems of interaction between wheel and rail]. Moscow, Intekst Publ., 2002. 408 p.
13. Pogorelov D.Yu., Simonov V.A. Pokazatel dlya otsenki opasnosti skhoda podvizhnogo sostava putem vkatyvaniya kolea na golovku relsa [The indicator for assessing the risk of rolling stock derailment by wheel mounting on the rail head]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia* [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], 2010, no. 5 (147), Part I, pp. 64-70.
14. RD 24.050.37-95. *Vagony gruzovyye i passazhirskyye. Metody ispytaniy na prochnost i khodovyye kachestva* [RD 24.050.37-95. Freight and passenger cars. Strength tests methods and running qualities]. Moscow, GosNIIV Publ., 1995. 101 p.
15. Turanov Kh.T. Postroyeniye raschetnoy modeli kolesnoy pary vagona ot vkatyvaniya pri dvizhenii podvizhnogo sostava po krivomu uchastku puti [Design model construction of the car wheel set from the mounting during the rolling stock movement in the curved track section]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia* [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], 2010, no. 10 (152), Part 2, pp. 196-204.
16. Elkins J., Huimin Wu. New Criteria for Flange Climb Derailment. ASME/IEEE Joint Railroad Conference. Newark, 2000, pp. 1-7.
17. Guangxiong Ch., Xincan Jin. A New Method for Evaluation of Wheel Climb Derailment. ASME/IEEE Joint Railroad Conference. Newark, 2000, pp. 9-13.
18. UIC Code 518:2009. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior – Safety – Track fatigue – Ride quality. 3-d ed. Paris, October, 2005.

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., ст. науч. співробітником Н. А. Радченко (Україна);  
д.т.н., проф. В. Л. Горобіцом (Україна)

Поступила в редколлегию 05.04.2013

Принята к печати 18.06.2013

УДК 622.75/77:622.33-047.58

О. В. ГРАЧЁВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Системная инженерия», Восточноукраинский национальный университет имени В. Даля, кв. Молодежный, 20 а, 91034, Луганск, Украина, тел. + 38 (0642) 41 22 25, эл. почта uni@snu.edu.ua

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПРЯМЛЕНИЯ ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ГРАНИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ И ЗОЛЬНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА УГЛЯ

**Цель.** Задача восстановления информации о фракционном составе является одной из главных задач углеобогащения, поскольку качество ее решения непосредственно влияет на все производственные процессы углеобогащательной фабрики. В силу того, что модель описания фракционного состава имеет стохастическую природу, как и метод идентификации параметров модели, одним из перспективных направлений дальнейших исследований является анализ влияния ошибок определения параметров модели на ее устойчивость. Для этого необходимо проанализировать экспериментальные данные для оценки влияния изменения параметров спрямления весовых функций распределения по граничной плотности и зольности на устойчивость модели описания фракционного состава угля. **Методика.** Задача решена методами математической статистики и случайных процессов и методами оптимизации. **Результаты.** Анализ влияния изменения параметров спрямления весовых функций распределения по граничной плотности и зольности на устойчивость модели описания фракционного состава угля показал следующее. В небольшой окрестности оптимального значения параметров  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_0$  и  $b_1$  оценка относительной погрешности определения выходов узких фракций и оценка относительной погрешности определения средней зольности узких фракций не превышает 0,05. **Практическая значимость.** Проведенный анализ показал, что в малой окрестности оптимальных значений параметров модели описания фракционного состава угля ошибка определения выходов и средних зольностей мало чувствительна к изменению значений параметров и не превышает погрешности получения экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** фракционный состав; устойчивость; весовая функция распределения; граничная плотность и зольность

### Введение

Восстановление информации об исходном сырье [1, 3, 4], в частности задача восстановления информации о фракционном составе [12, 13, 15], является одной из главных задач углеобогащения, поскольку качество ее решения непосредственно влияет на все процессы углеобогащательной фабрики. На практике решение этой задачи – это неизбежный компромисс между ценой проведения фракционного анализа и точностью, то есть количеством расслоений. Поэтому актуальной задачей современного углеобогащения является задача нахождения такого описания информации о фракционном составе угля [18, 19], которое позволяло бы максимально подробно рассчитывать выход и зольность угля произвольного числа узких фракций по минимальному объему опробований.

Одним из решений поставленной задачи является модель описания фракционного состава угля, основанная на применении весовых функций распределения по граничной плотности и граничной зольности в совокупности с понятием поверхности обогатимости. Такая модель позволяет получить аналитическое решение, которое учитывает физические ограничения, накладываемые на описание фракционного состава угля. В силу того, что данная модель имеет стохастическую природу, как и метод идентификации параметров модели, одним из перспективных направлений дальнейших исследований является анализ влияния ошибок определения параметров модели на ее устойчивость [6, 7, 10, 16].

### Цель

Провести анализ экспериментальных данных для оценки влияния изменения параметров

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

спрямлення весовых функций распределения по граничной плотности и зольности на устойчивость модели описания фракционного состава угля.

**Методика**

Параметры модели описания фракционного состава можно условно разделить на физические (минимальная и максимальная граничная плотность), вещественные (минимальная и максимальная граничная зольность) и параметры спрямления, определяемые методом вероятностной бумаги. Метод вероятностной бумаги [9, 11, 14] основан на поиске такого преобразования функции распределения, которое превращает ее в прямую линию. Тогда вопрос нахождения параметров функции распределения сводится к нахождению коэффициентов уравнения прямой [2, 17].

**Результаты**

Модель фракционного состава угля можно описать такой системой уравнений [13]:

$$\begin{cases} \Gamma(\rho) = \frac{1}{1 + (a_0 + a_1 t_\rho) \sqrt{\frac{1}{t_\rho} - 1}}, & t_\rho = \left( \frac{\rho - \rho_{01}}{\rho_{k1} - \rho_{01}} \right)^2, \\ F(\lambda) = \frac{1}{1 + (b_0 + b_1 t_\lambda) \sqrt{\frac{1}{t_\lambda} - 1}}, & t_\lambda = \left( \frac{\lambda - \lambda_{01}}{\lambda_{k1} - \lambda_{01}} \right)^2, \\ U(\rho_{i-1}, \rho_i) = \frac{\Lambda(\Gamma_i(\rho_i)) - \Lambda(\Gamma_{i-1}(\rho_{i-1}))}{\Gamma_i(\rho_i) - \Gamma_{i-1}(\rho_{i-1})}, \\ \Lambda(\Gamma) = \int_0^\Gamma \lambda(\Gamma) d\Gamma, \end{cases}$$

где  $a_0, a_1, b_0, b_1$  – параметры модели, получаемые по экспериментальным данным,  $\rho_0, \rho_1$  – соответственно минимальная и максимальная граничная плотность.

Из описания модели видно, что изменение параметров  $b_0, b_1$  оказывает влияние на вычисление средней зольности и не влияет на вычисление значений выходов узких фракций.

Рассмотрим экспериментальные данные о фракционном составе машинных классов рядового угля шахты имени В. М. Бажанова (класс +50 мм), проведем идентификацию параметров модели и сравним экспериментальные и теоретические

результаты (см. табл. 1):

$$a_0 = 0,29116839, \quad a_1 = 0,45787426,$$

$$b_0 = 0,4603119, \quad b_1 = 1,58157593,$$

$$\rho_0 = 1,36640131, \quad \rho_1 = 2,45014652,$$

$$\lambda_0 = 0,02037467, \quad \lambda_1 = 0,94608455,$$

$$\beta_{ke} = 59,026, \quad \beta_k = 59,026.$$

Таблица 1

**Сравнение теоретических и экспериментальных данных описания фракционного состава угля (шахты имени В. М. Бажанова)**

| $\gamma_e, \%$ | $\gamma_t, \%$ | $ \Delta\gamma $ | $A^d_e, \%$ | $A^d_t, \%$ | $ \Delta A^d $ |
|----------------|----------------|------------------|-------------|-------------|----------------|
| 41,4           | 41,4           | 0                | 17,2        | 17,3112     | 0,1112         |
| 13,1           | 13,1           | 0                | 74,6        | 74,1563     | 0,4437         |
| 45,5           | 45,49          | 0,1              | 92,6        | 92,6297     | 0,0297         |

Из результатов сравнения (см. табл. 1) видно, что относительная погрешность определения выхода и средней зольности угля узких фракций не превышает погрешности получения экспериментальных данных.

$\varepsilon_1 = \max_{1 \leq i \leq n} |\gamma_{ie} - \gamma_{it}|$  – оценка абсолютной погрешности определения выхода в описании фракционного состава;

$\varepsilon_2 = \max_{1 \leq i \leq n} \left| \frac{\gamma_{ie} - \gamma_{it}}{\gamma_{ie}} \right|$  – оценка относительной погрешности определения выхода в описании фракционного состава;

$\varepsilon_3 = \sum_{i=1}^n (\gamma_{ie} - \gamma_{it})^2$  – сумма квадратов отклонений выходов узких фракций в описании фракционного состава;

$\varepsilon_4 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\gamma_{ie} - \gamma_{it}}{\gamma_{ie}} \right)^2$  – сумма квадратов относительных отклонений выходов узких фракций в описании фракционного состава, где  $\gamma_{ie}, \gamma_{it}$  – соответственно выход  $i$ -й узкой фракции по экспериментальным и теоретическим данным;

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$\varepsilon_5 = \max_{1 \leq i \leq n} |A_{ie}^d - A_{it}^d|$  – оценка абсолютной погрешности определения зольности в описании фракционного состава;

$$\varepsilon_6 = \max_{1 \leq i \leq n} \left| \frac{A_{ie}^d - A_{it}^d}{A_{ie}^d} \right|$$
 – оценка относительной

погрешности определения средней зольности в описании фракционного состава;

$$\varepsilon_7 = \sum_{i=1}^n (A_{ie}^d - A_{it}^d)^2$$
 – сумма квадратов отклонений

средних зольностей узких фракций в описании фракционного состава;

$$\varepsilon_8 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_{ie}^d - A_{it}^d}{A_{ie}^d} \right)^2$$
 – сумма квадратов относительных

отклонений выходов узких фракций в описании фракционного состава, где  $A_{ie}^d, A_{it}^d$  – соответственно средняя зольность  $i$ -й узкой фракции по экспериментальным и теоретическим данным.

Проведем численный эксперимент в окрестности  $[0,24116839; 0,34017337]$  оптимального значения параметра  $a_0$ . Анализ результатов численного эксперимента показал, что оценка абсолютной погрешности определения выходов узких фракций (рис. 1) на промежутке  $[0,29042212; 0,29191466]$ , оценка относительной погрешности (рис. 2) на промежутке  $[0,26604401; 0,31878033]$  и сумма квадратов отклонений на промежутке  $[0,2894271; 0,29290968]$  (рис. 3) не превышают 0,05. Сумма квадратов относительных разностей (рис. 4) близка к нулю на всем исследуемом диапазоне. Поведение модели при определении средней зольности (рис. 5–8) имеет схожий характер: в диапазонах  $[0,29042212; 0,29191466]$ ,  $[0,27947685; 0,30435247]$ ,  $[0,28992461; 0,29241217]$  соответственно  $\varepsilon_5$ ,  $\varepsilon_6$ ,  $\varepsilon_7$  меньше 0,05, а  $\varepsilon_8$  – близка к нулю на всем исследуемом диапазоне.

Проведем численный эксперимент в окрестности  $[0,40787426; 0,50687924]$  оптимального значения параметра  $a_1$ . Анализ результатов численного эксперимента показал, что оценка абсолютной погрешности определения выходов узких фракций (рис. 9) на промежутке

$[0,29042212; 0,29191466]$ , сумма квадратов отклонений на промежутке  $[0,2894271; 0,29290968]$  (рис. 11) не превышают 0,05. Оценка относительной погрешности и сумма квадратов относительных разностей (рис. 10, 12) близка к нулю на всем исследуемом диапазоне. Поведение модели при определении средней зольности (рис. 13–16) имеет схожий характер: в диапазонах  $[0,44270013; 0,47454093]$ ,  $[0,44369516; 0,47205336]$ , соответственно  $\varepsilon_5$ ,  $\varepsilon_7$  меньше 0,05, а  $\varepsilon_6$ ,  $\varepsilon_8$  – близка к нулю на всем исследуемом диапазоне.

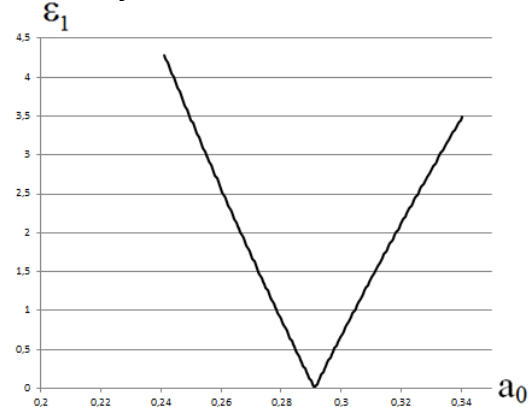


Рис. 1. Зависимость оценки абсолютной погрешности определения выходов узких фракций от коэффициента спрямления  $a_0$

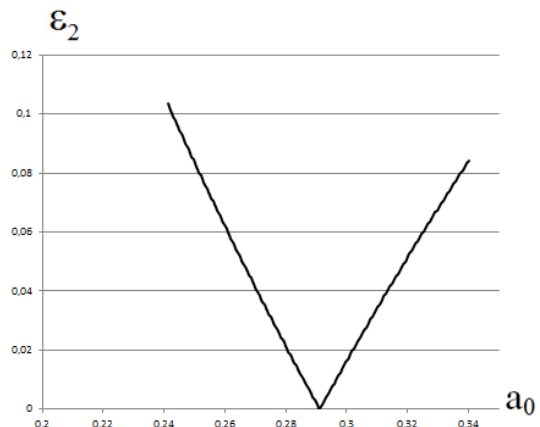
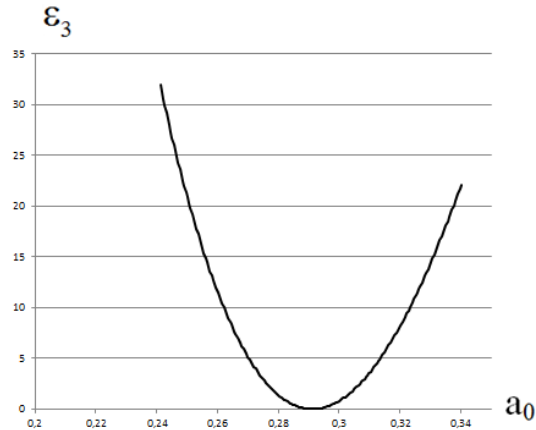
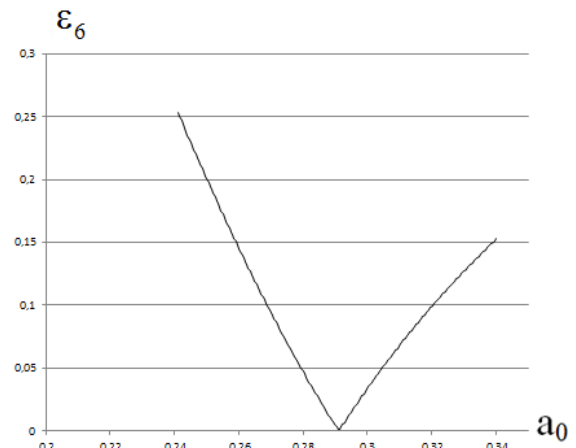
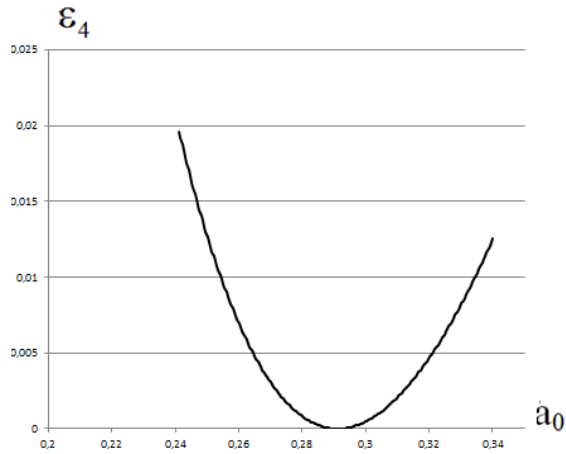
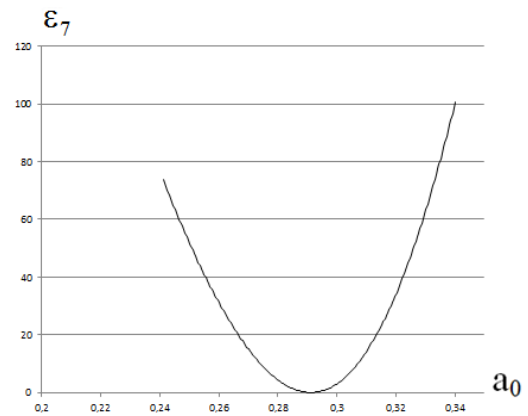
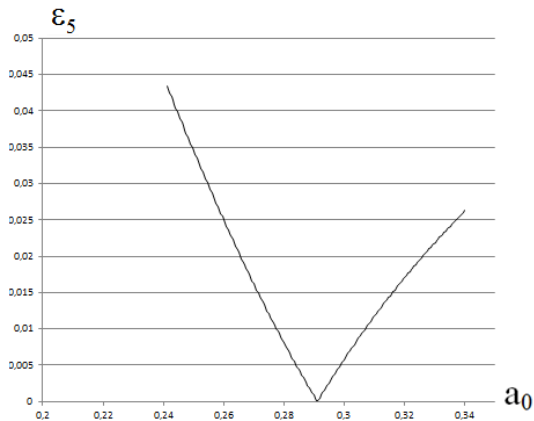
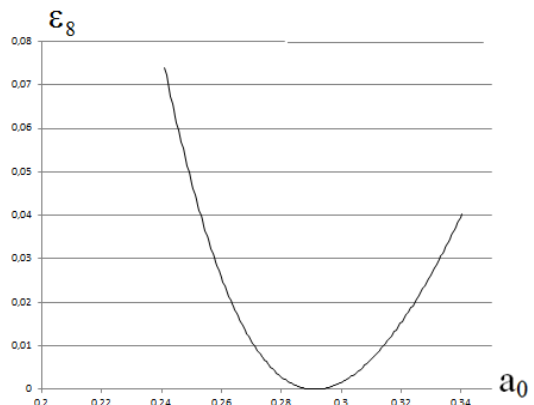


Рис. 2. Зависимость оценки относительной погрешности определения выходов узких фракций от коэффициента спрямления  $a_0$

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Рис. 3. Зависимость оценки суммы квадратов отклонений выходов узких фракций от коэффициента спрямления  $a_0$ Рис. 6. Зависимость оценки относительной погрешности определения зольности фракций от коэффициента спрямления  $a_0$ Рис. 4. Зависимость оценки относительных отклонений выходов узких фракций от коэффициента спрямления  $a_0$ Рис. 7. Зависимость оценки суммы квадратов отклонений зольности фракций от коэффициента спрямления  $a_0$ Рис. 5. Зависимость оценки абсолютной погрешности определения зольности фракций от коэффициента спрямления  $a_0$ Рис. 8. Зависимость оценки относительных отклонений зольности фракций от коэффициента спрямления  $a_0$

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

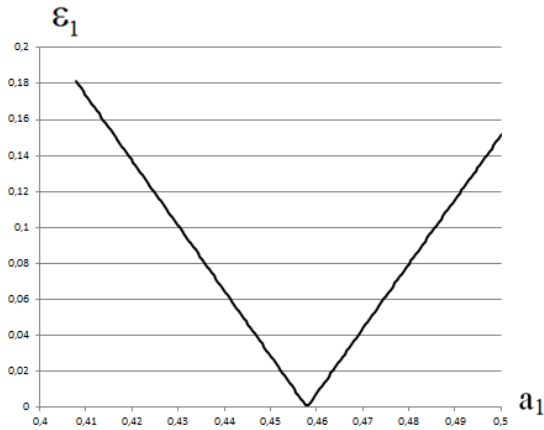


Рис. 9. Зависимость оценки абсолютной погрешности определения выходов узких фракций от коэффициента спрямления  $a_1$

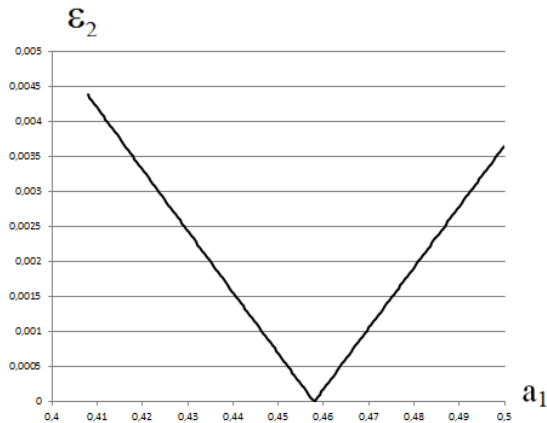


Рис. 10. Зависимость оценки относительной погрешности определения выходов узких фракций от коэффициента спрямления  $a_1$

Проведем численный эксперимент в окрестности  $[0,4103119; 0,50931688]$  оптимального значения параметра  $b_0$ . Анализ результатов численного эксперимента показал, что оценка абсолютной погрешности определения средних зольностей узких фракций (рис. 17) на промежутке  $[0,44762533; 0,47299847]$ , оценка относительной погрешности (рис. 18) на промежутке  $[0,43867011; 0,4824512]$  и сумма квадратов отклонений (рис. 19) на промежутке  $[0,45707807; 0,46354575]$  не превышают 0,05. Сумма квадратов относительных разностей (рис. 20) близка к нулю на всем исследуемом диапазоне.

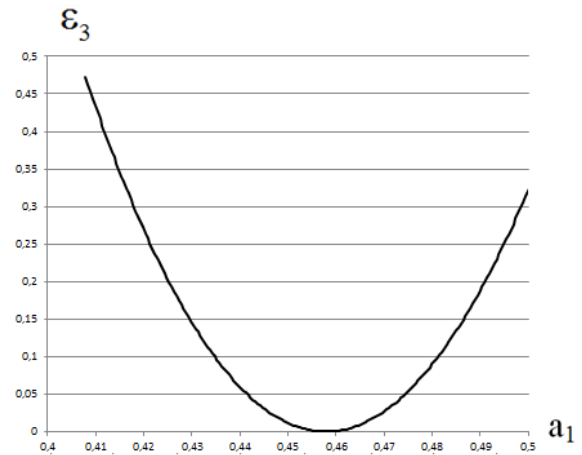


Рис. 11. Зависимость оценки суммы квадратов отклонений выходов узких фракций от коэффициента спрямления  $a_1$

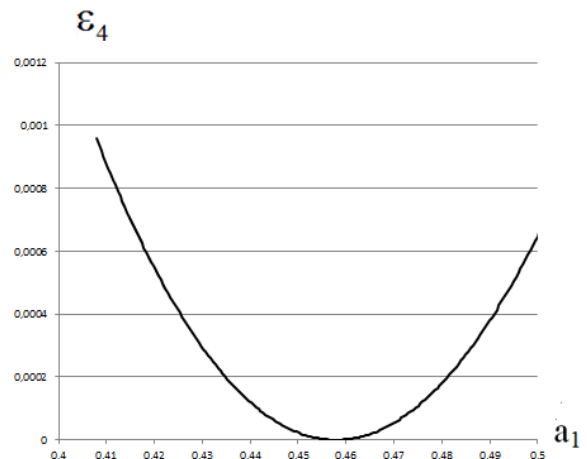


Рис. 12. Зависимость оценки относительных отклонений выходов узких фракций от коэффициента спрямления  $a_1$

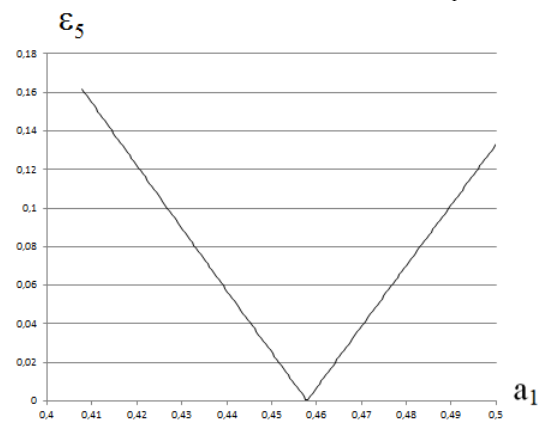


Рис. 13. Зависимость оценки абсолютной погрешности определения зольности фракций от коэффициента спрямления  $a_1$

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

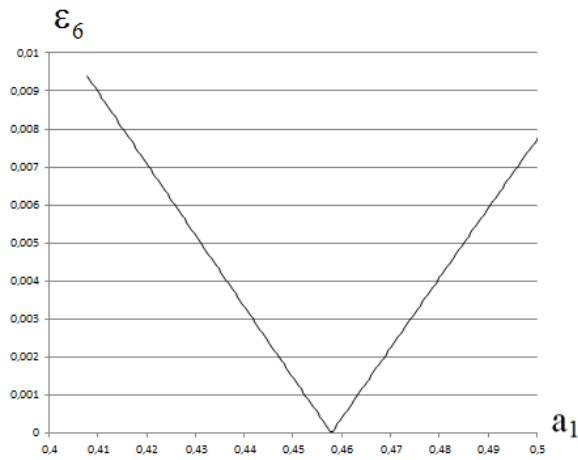


Рис. 14. Зависимость оценки относительной погрешности определения зольности фракций от коэффициента спрямления  $a_1$

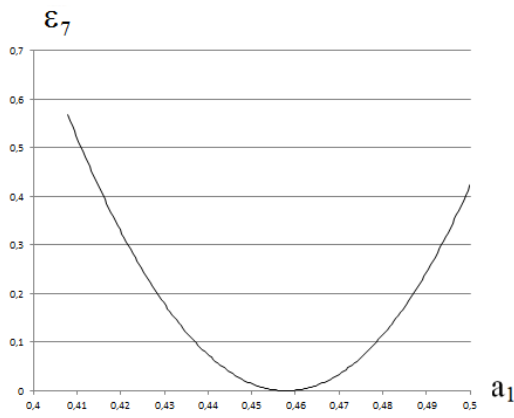


Рис. 15. Зависимость оценки суммы квадратов отклонений зольности фракций от коэффициента спрямления  $a_1$

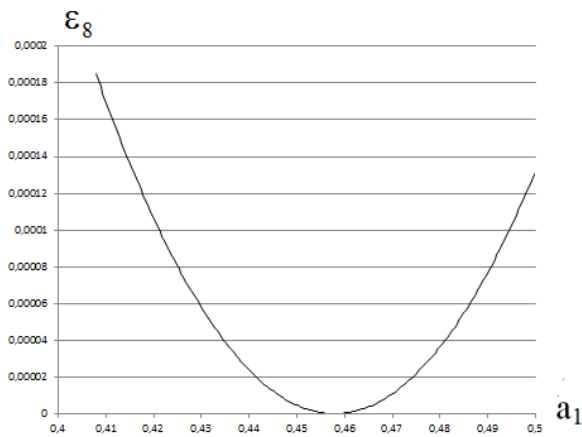


Рис. 16. Зависимость оценки относительных отклонений зольности фракций от коэффициента спрямления  $a_1$

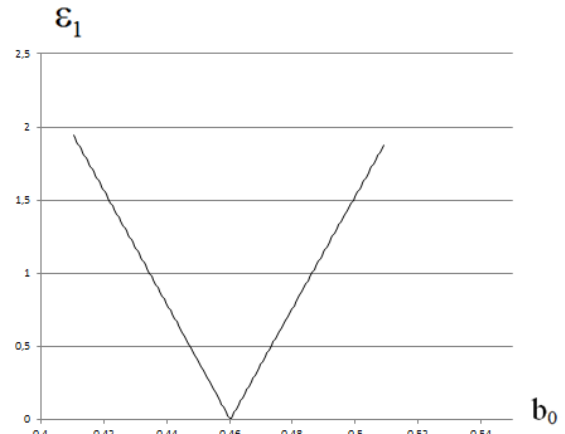


Рис. 17. Зависимость оценки абсолютной погрешности определения зольности фракций от коэффициента спрямления  $b_0$

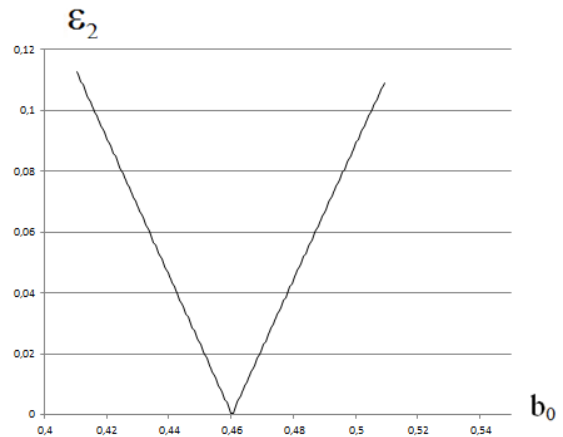


Рис. 18. Зависимость оценки относительной погрешности определения зольности фракций от коэффициента спрямления  $b_0$

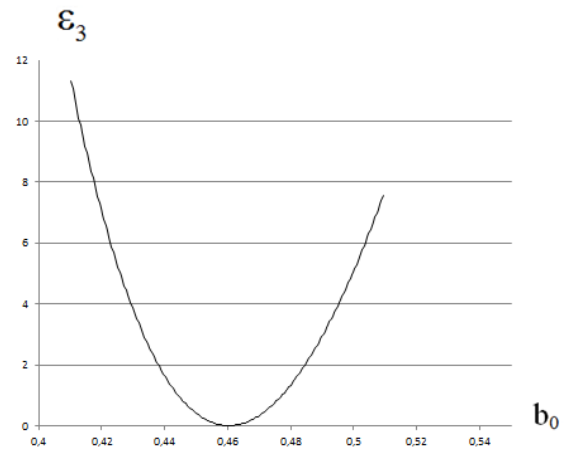


Рис. 19. Зависимость оценки суммы квадратов отклонений зольности фракций от коэффициента спрямления  $b_0$

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

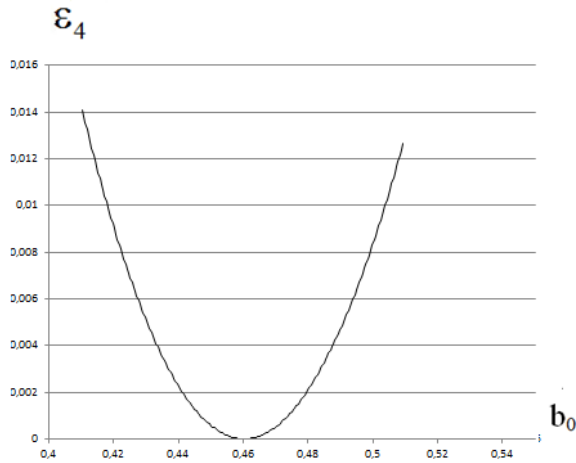
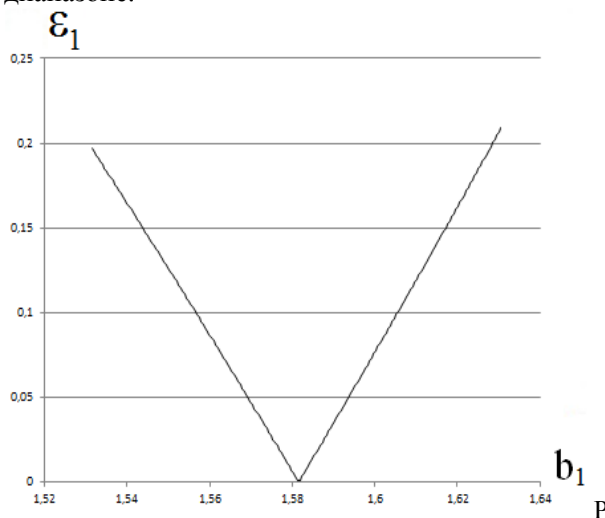


Рис 20. Зависимость оценки относительных отклонений зольности фракций от коэффициента спрямления  $b_0$

Проведем численный эксперимент в окрестности  $[1,53157593; 1,63058091]$  оптимального значения параметра  $b_1$ . Анализ результатов численного эксперимента показал, что оценка абсолютной погрешности определения средних зольностей узких фракций (рис. 21) на промежутке  $[1,569386888; 1,59326747]$  и сумма квадратов отклонений (рис. 23) на промежутке  $[1,57386449; 1,5902824]$  не превышают 0,05. Оценка относительной погрешности и сумма квадратов относительных разностей (рис. 22, 24) близка к нулю на всем исследуемом диапазоне.



ис. 21. Зависимость оценки абсолютной погрешности определения зольности фракций от коэффициента спрямления  $b_1$

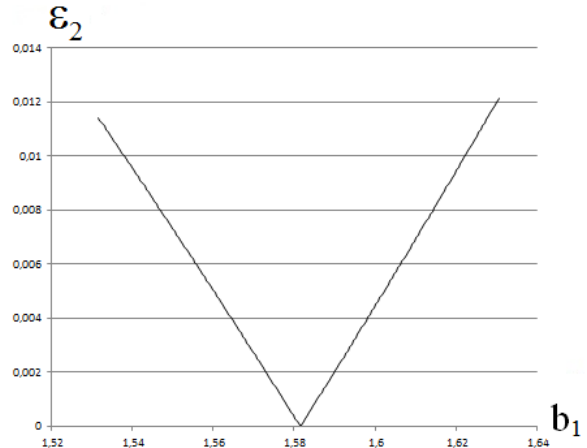


Рис. 22. Зависимость оценки относительной погрешности определения зольности фракций от коэффициента спрямления  $b_1$

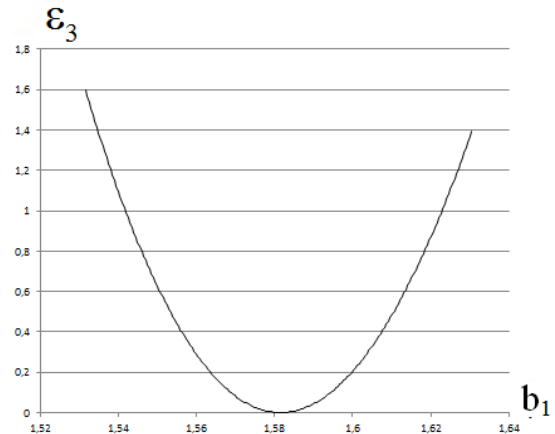


Рис. 23. Зависимость оценки суммы квадратов отклонений зольности фракций от коэффициента спрямления  $b_1$

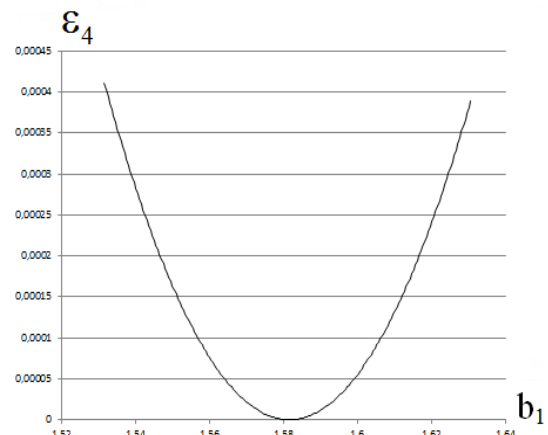


Рис. 24. Зависимость оценки относительных отклонений зольности фракций от коэффициента спрямления  $b_1$

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

**Практическая значимость**

Проведенный анализ показал, что в окрестности 0,05 оптимальных значений параметров модели описания фракционного состава угля ошибка определения выходов и средних зольностей мало чувствительна к изменению значений параметров и практически всегда (кроме значений на границах диапазона) не превышает погрешности получения экспериментальных данных.

**Выводы**

Проведенные исследования доказывают, что стохастическая природа модели описания фракционного состава угля и стохастический метод идентификации параметров модели не влияют в окрестности оптимальных значений параметров на результаты расчета фракционного состава. Таким образом, данная модель обладает в определенных пределах устойчивостью к ошибкам эксперимента и определения оптимальных значений параметров модели.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Аверин, Г. А. Прогноз содержания угля в техногенном месторождении / Г. А. Аверин, О. Г. Доценко, С. А. Чичерин // Уголь Украины. – 2008. – № 4. – С. 42–44.
2. Арлей, Н. Введение в теорию вероятностей и математическую статистику / Н. Арлей, К. Р. Бух. – М. : Иностранная литература, 1951. – 248 с.
3. Грачев, О. В. Вид весовой функции распределения плотности и зольности угля по фракциям / В. Ф. Пожидаев, О. В. Грачев // Науковці – підприємства і установи регіону : зб. наук. праць СЧУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2002. – Ч. 2. – С. 35.
4. Грачев, О. В. О неизменности вида функций распределения граничных плотностей и зольностей угля по фракциям / О. В. Грачев // Вісник СЧУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2010. – № 2 (144). – С. 41–46.
5. Грачев, О. В. Синтез детерминированного и стохастического алгоритмов поиска глобального экстремума с обучением / В. Ф. Пожидаев, О. В. Грачев // Вісник СЧУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2008. – № 9. – Ч. 1 (127). – С. 170–174.
6. Грачев, О. В. Эффективность повышения стабильности качества угольных концентратов / О. В. Грачев // Вісник СЧУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – № 4 (62). – С. 126–129.
7. Золотко, А. А. Направления сбережения и увеличения ресурсов углей / А. А. Золотко // Збагачення корисних копалин : наук.-техн. зб. – Д., 2000. – Вип. 7 (48). – С. 22–28.
8. Козлов, В. А. Методика по расчету продуктов дробления крупных классов угля. / В. А. Козлов. – М. : ГИАБ, 2011. – № 2. – С. 218–223.
9. Косолапов, А. А. Методика оценки надёжности нечётких систем с использованием различных видов размытых множеств / А. А. Косолапов // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – Вип. 2 (44). – С. 17–27.
10. Курченко, И. П. Дополнительные ресурсы угольной продукции / И. П. Курченко // Уголь Украины. – 2006. – № 4. – С. 40–41.
11. Мищенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод циклічної вольтамперної характеристики / Т. М. Мищенко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – Вип. 1 (43). – С. 119–125.
12. Назимко, Е. И. Повышение требования к качеству угольных концентратов для коксования / Е. И. Назимко, М. А. Ильяшов // Уголь Украины. – 2007. – № 11. – С. 42–44.
13. Рудько, Г. І. Стратегія розвитку мінеральних ресурсів України / І. Г. Рудько // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. междунар. симпоз. – Кривой Рог : Минерал, 2005. – С. 29–36.
14. Формалізація результатів розподільчих процесів у вуглезбагаченні : монографія / В. К. Гарус, О. В. Грачов, В. Ф. Пожидаев, О. Д. Полулях. – Луганськ : ООО «НВФ» СТЕК», 2003. – 176 с.
15. Филиппенко, Ю. Н. Состояние и перспективы развития углеобогащения в Украине / Ю. Н. Филиппенко, И. П. Курченко // Збагачення корисних копалин : наук.-техн. зб. – Д., 2008. – Вип. 33 (74). – С. 30–37.
16. Чмилев, В. И. Исследование промпродукта углеобогажительных фабрик как объекта обогащения / В. И. Чмилев, Д. А. Полулях, Д. В. Шевченко // Збагачення корисних копалин : наук.-техн. зб. – Д., 2005. – Вип. 24 (65). – С. 19–26.
17. Dixon, W. J. Introduction to statistical analysis / W. J. Dixon, F. J. Massey // New York : McGraw-Hill, 1951. – 370 p.
18. Characterization and Preparation of Dipka Coal from Korba Coalfield in India / S. Gollakota, R. Nagaraja, A. Deurbrouck, G. Staats // Proc. of

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

5th Annual International Pittsburgh Coal Conference (14.09–18.09.1998). – USA : Pitt. PA, 1998.

19. Nicol, Stuart K. The Principles of Coal Preparation / Stuart K. Nicol, Andrew R. Swanson // Australian Coal Preparation Society, 1997. – 275 p.

О. В. ГРАЧОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Системна інженерія», Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, кв. Молодіжний, 20 а, 91034, Луганськ, Україна, тел. + 38 (0642) 47 14 44, ел. пошта uni@snu.edu.ua

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ВИПРЯМЛЕННЯ ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ РОЗПОДІЛУ ЗА ГРАНИЧНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ Й ЗОЛЬНІСТЮ НА СТІЙКІСТЬ МОДЕЛІ ОПИСУ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ ВУГІЛЛЯ

**Мета.** Завдання відновлення інформації щодо фракційного складу рядового вугілля є одним із головних завдань вуглезбагачення, оскільки якість його вирішення безпосередньо впливає на всі процеси вуглезбагачувальної фабрики. З огляду на те, що модель опису фракційного складу має стохастичну природу, як і метод ідентифікації параметрів моделі, одним з перспективних напрямків подальших досліджень є аналіз впливу помилок визначення параметрів моделі на її стійкість. Для цього необхідно проаналізувати експериментальні дані для оцінки впливу зміни параметрів спрямлення вагових функцій розподілу за граничною щільністю й зольністю на стійкість моделі опису фракційного складу вугілля. **Методика.** Задача розв'язана методами математичної статистики й випадкових процесів і методами оптимізації. **Результати.** Виконаний аналіз впливу зміни параметрів спрямлення вагових функцій розподілу за граничною щільністю й зольністю на стійкість моделі опису фракційного складу вугілля показав таке. У невеликому околі оптимального значення параметрів  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_0$  і  $b_1$  оцінка відносної похибки визначення виходів вузьких фракцій і оцінка відносної похибки визначення середньої зольності вузьких фракцій не перевищує 0,05. **Практична значимість.** Виконаний аналіз показав, що в малому околі оптимальних значень параметрів моделі опису фракційного складу вугілля помилка визначення виходів і середніх зольностей мало чутлива до зміни значень параметрів і не перевищує похибки отримання експериментальних даних.

**Ключові слова:** фракційний склад; стійкість; вагова функція розподілу; гранична щільність та зольність

О. V. GRACHYOV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Systems Engineering», East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, Molodizhnyi Quarter, 20 a, 91034, Luhansk, Ukraine, tel. + 38 (0642) 47 14 44, e-mail uni@snu.edu.ua

## ANALYSIS OF PARAMETERS CHANGE EFFECT OF WEIGHT FLATNESS FUNCTIONS IN BOUNDARY DENSITY AND ASH CONTENT ON MODEL STABILITY OF COAL FRACTIONAL COMPOSITION DESCRIPTION

**Purpose.** The fractional composition information recovery is one of the main problems of coal enrichment, as the quality of its solving directly affects at all the processes of coal preparation plant. Due to the fact that this model has a stochastic nature, as well as the method of identifying the model parameters, a promising direction for further research is to analyze the effect of errors in the determination of model parameters on its stability. This requires an analysis of the experimental data to assess changes effect of weight flatness functions in boundary density and ash content on model description stability of coal fractional composition. **Methodology.** The problem is solved by methods of mathematical statistics and stochastic processes, and optimization methods. **Findings.** Analysis carried out of changes effect of weight flatness functions in boundary density and ash content on model description stability of coal fractional composition has shown the following. In a small neighborhood of the parameters  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_0$  and  $b_1$  assessment of the relative error in determining the output of narrow fractions and assessment of the relative error

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

in determining the average ash content of narrow fractions is less than 0.05. **Practical value.** The analysis showed that in a small neighborhood of the optimal values of the model parameters describing coal fractional composition an error in determining the composition of the coal output and an average ash content is not very sensitive to changes in parameter values and do not exceed the error of obtaining experimental data.

**Keywords:** fractional composition; stability; weight distribution function; boundary density; ash content

## REFERENCES

1. Averin G.A., Dotsenko O.G., Chicherin S.A. Prognoz sodержaniya uglya v tehnogenom mestorozhdenii [Forecast content of coal in technogenic deposit]. *Ugol Ukrainy – Coal Of Ukraine*, 2008, no. 4, pp. 42-44.
2. Arley N., Bukh K.R. *Vvedeniye v teoriyu veroyatnostey i matematicheskuyu statistiku* [Introduction to probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1951. 248 p.
3. Grachev O.V., Pozhidayev V.F. Vid vesovoy funktsii raspredeleniya plotnosti i zolnosti uglya po fraktsiyam [Type of the weight distribution function of density and ash content in fractions]. *Naukovtsi – pidpriemstvam i ustanovam regionu* [Scientists – to companies and institutions in the region], Lugansk, 2002, Part 2, p. 35.
4. Grachev O.V. O neizmennosti vida funktsiy raspredeleniya granichnykh plotnostey i zolnostey uglya po fraktsiyam [About the invariance of the form distribution functions of the boundary density and ash content of coal fractions]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], 2010, no. 2 (144), pp. 41-46.
5. Grachev O.V., Pozhidayev V.F. Sintez determinirovannogo i stohasticheskogo algoritmov poiska globalnogo ekstremuma s obucheniym [Synthesis of deterministic and stochastic search algorithms for global optimization with training] *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], 2008, no. 9 (127), Part 1, pp. 170-174.
6. Grachev O. V. Effektivnost povysheniya stabilnosti kachestva ugolnykh kontsentratorov [Efficiency of increase the stability of coal concentrates quality]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V. Dalia* [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], 2003, no. 4 (62), pp.126-129.
7. Zolotko A.A. Napravleniya sberezheniya i uvelicheniya resursov ugley [Areas of savings and increasing the resources of coal]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn* [Minerals processings], 2000, issue 7 (48), pp. 22-28.
8. Kozlov V.A. Metodika po raschetu produktov drobleniya krupnykh klassov uglya [Methodology for the calculation of coal large classes crushing products], Dnipropetrovsk, GIAB Publ., 2011, No. 2, pp. 218-223.
9. Kosolapov A.A. Metodika otsenki nadezhnosti nechetkikh sistem s ispolzovaniyem razlichnykh vidov razmytykh mnozhestv [Methods of assessing the reliability of fuzzy systems using different types of fuzzy sets]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, issue 2 (44), pp. 17-27.
10. Kurchenko I.P. Dopolnitelnyye resursy ugolnoy produktsii [Additional resources of coal products]. *Ugol Ukrainy – Coal Of Ukraine*, 2006, no. 4, pp. 40-41.
11. Mischenko T.M. Teoretychni aspekty ta metody identyfikatsii parametriv prystroiv systemy elektrychnoi tiah. Metod tsyklichnoi volt-ampernoї kharakterystyky [Theoretical aspects and methods of parameters identification of the electric traction system devices. Method of cyclic current-voltage characteristics]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2013, issue 1 (43), pp. 119-125.
12. Nazimko E.I., Ilyashov M.A. Povysheniye trebovaniya k kachestvu ugolnykh kontsentratorov dlya koksovaniya [Increasing demands on the quality of coking coal concentrate]. *Ugol Ukrainy – Coal Of Ukraine*, 2007, no. 11, pp. 42-44.
13. Rudko G.I. Stratehiia rozvytku mineralnykh resursiv Ukrainy [The development strategy of Mineral Resources of Ukraine]. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnogo Simpoziuma “Kachestvo mineralnogo syrya” [Proc. of Int. Symp. “Quality of Mineral Materials”]. Krivoy Rog, Mineral Publ., 2005, pp. 29-36.
14. Garus V.K., Grachov O.V., Pozhidayev V.F., Polulyakh O.D. Formalizatsiia rezultatov rozpodilchykh protsesiv u vuhlezbahachenni [Formalizing results distribution processes in coal]. Lugansk, OOO «NVF»STEK» Publ., 2003. 176 p.
15. Filippenko Yu.N., Kurchenko I.P. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya ugleobogasheniya v Ukraine [Formalizing results distribution processes in coal]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn* [Minerals processings], 2008, issue 33 (74), pp. 30-37.
16. Chmylev V.I., Polulyah D.A., Shevchenko D.V. Issledovaniye promprodukta ugleobogatitelnykh fabrik kak obyekt obogasheniya [The research of middling coal preparation plants as an object enrichment]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn* [Minerals processings], 2005, issue 24 (65), pp. 19-26.
17. Dixon W. J., Massey F. J. Introduction to statistical analysis, New York, McGraw-Hill Publ., 1951. 370 p.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

---

18. Gollakota, S., Nagaraja, R., Deurbrouck, A., Staats, G. Characterization and Preparation of Dipka Coal from Korba Coalfield in India. Proc. 5th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pitt. PA Publ., USA, 1998.
19. Stuart K. Nicol, Andrew R. Swanson. The Principles of Coal Preparation. Australian Coal Preparation Society Publ., 1997. 275 p.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. А. Ульиным (Украина); д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Украина)*

Поступила в редколлегию 28.03.2013

Принята к печати 18.06.2013

УДК 004.89: 37.012

А. Л. ДАНЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Системная инженерия», Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, кв. Молодежный, 20 а, 91034, Луганск, Украина, тел. + 38 (0642) 47 14 44, + 38 (050) 655 07 01, эл. почта danalleo@gmail.com.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

**Цель.** В условиях активного развития e-learning все большее значение приобретает качество электронных образовательных ресурсов обучающих систем. Быстрое устаревание информации при массовости образования обуславливает необходимость повышения эффективности процесса совершенствования качества электронных образовательных ресурсов путем автоматизации информационной поддержки принятия решений. **Методика.** Задача решена методами искусственного интеллекта путем разработки информационной структуры базы знаний системы поддержки принятия решений на основе фреймовой модели представления знаний и продукционных правил логического вывода. **Результаты.** По результатам анализа процессов жизненного цикла и требований к качеству электронных образовательных ресурсов разработаны информационная структура базы знаний системы поддержки принятия решений, правила логического вывода и программная реализация системы поддержки принятия решений. **Практическая значимость.** Установлено, что основными требованиями к качеству электронных образовательных ресурсов являются успеваемость, валидность, надежность и технологичность. Показано, что при использовании программной реализации системы поддержки принятия решений в ходе экспериментального исследования для всех курсов наблюдается рост качества по комплексному критерию. Информационная структура базы знаний системы поддержки принятия решений и правила логического вывода могут быть использованы методистами и разработчиками контента обучающих систем.

**Ключевые слова:** качество; образовательные ресурсы; представление знаний; правила логического вывода; лицо, принимающее решение

### Введение

В условиях активного развития e-learning все большее значение приобретает качество электронных образовательных ресурсов (ЭОР) обучающих систем. Принятие эффективного решения по совершенствованию качества образовательного контента обучающих систем в условиях массовости образования и быстрого устаревания информации невозможно без автоматизации информационной поддержки принятия решений, обеспечивающей автоматизацию процессов анализа/оценки качества, визуализации результатов вычислений и формирования рекомендаций для лица, принимающего решение (ЛПР) [4]. Анализ научных исследований в области оценки качества ЭОР [3, 5–6, 13] показал, что существующие системы выполняют оценку только по отдельным показателям и не обеспечивают автоматизированную информационную поддержку принятия решений по

совершенствованию качества образовательных ресурсов на основе системной оценки априорных и статистических данных о свойствах ЭОР. Таким образом, обусловлена необходимость повышения эффективности процесса совершенствования качества ЭОР путем автоматизации информационной поддержки принятия решений. Учитывая комплексное оценивание функциональных свойств и статистические данные о результатах применения ЭОР, в ходе учебного процесса разработаны системы поддержки принятия решений (СППР).

### Методика

Задача решена методами искусственного интеллекта путем разработки информационной структуры базы знаний системы поддержки принятия решений на основе фреймовой модели представления знаний и продукционных правил логического вывода. Разработана программная реализация для верификации пред-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ложенного рішення в ході експериментального дослідження з використанням Microsoft SQL Server 2008 в якості сервера бази даних і MS VisualStudio 2010 – в якості середовища розробки.

### Результати

В даній роботі ЭОР розглядається як інструмент для досягнення навчальної мети в формі завдання. Завдання будемо розуміти як «педагогічну форму, націлену на засвоєння... необхідного фрагмента підготовленості» [1, 2]. Комплекс ЭОР (КОР) будемо розуміти як кінцеве множинство ЭОР, застосовуваних для навчання в межах конкретної навчальної дисципліни, підлягає оцінці і пройденої емпіричної перевірки в ході навчального процесу.

Згідно [15–17] показники якості КОР як системи розділяються на три групи:

- якість потенціалу досягнення мети освіти, визначається на етапі проектування;
- якість навчального процесу, визначається в ході навчальної діяльності;
- якість результатів освіти.

Аналіз українських стандартів в області систем забезпечення якості [10–11], а також міжнародних стандартів по інформаційним технологіям в навчанні, освіті і підготовці [14–17] показав, що удосконалення якості ЭОР є складним ітеративним процесом. Замкнений життєвий цикл ЭОР є послідовністю процесів: «Аналіз» → «Проектування» → «Розробка» → «Внедрення» → «Навчальний процес» → «Оцінка/Оптимізація» → «Аналіз».

Результати аналізу основних процесів і підпроцесів життєвого циклу освітніх ресурсів застосовуються до задачі автоматизації оцінювання якості ЭОР докладно представлені в дослідженні А. Л. Данченко [7]. При цьому встановлено, що процеси, що визначають якість ЭОР і задовольняють умові контролюваності вхідних і вихідних параметрів засобами систем дистанційного навчання, класифікуються як:

- «Організація використання» (підпро-

цес основного процесу «Внедрення»);

- «Навчальна діяльність»;
- «Аналіз результатів навчальної діяльності»;
- «Оцінка»;
- «Пошук рішення по оптимізації».

Аналіз наукових досліджень в області розробки педагогічних завдань [1, 2, 12] показав, що основними вимогами до якості КОР є:

1. Відповідність форми і змісту цілям освітнього стандарту, навчальної програми, навчального плану.

2. Забезпечення необхідних показників успішності.

3. Валидність (відповідність) навчального контенту цільової аудиторії.

4. Надійність як ступінь завершеності освітніх ресурсів – повнота, грамотність, ясність, точність формулювань, відсутність помилок сприйняття, пов'язаних з двусмысленністю;

5. Технологічність як спосіб забезпечення індивідуалізації навчання при масовості освіти – ступінь автоматизації зворотного зв'язку і обробки результатів.

Розглянемо перераховані вимоги застосовуючи до задачі автоматизації інформаційної підтримки прийняття рішень по удосконаленню якості ЭОР. Відповідність форми і змісту ЭОР цілям освітнього стандарту, навчальної програми, навчального плану встановлюється по результатам експертизи змісту навчальних матеріалів, яка, в свою чергу, забезпечується методичними відділами, кафедрами і науковими радами освітніх установ. В даній роботі будемо вважати, що в склад КОР входять тільки ЭОР, успішно пройшли процедуру даної експертизи.

Однак застосування тільки експертного аналізу на етапі розробки навчального контенту не дозволяє виявити всі недоліки ЭОР через непередбачуваність результатів сприйняття вербальної і невербальної інформації, тому для об'єктивної оцінки якості навчальних матеріалів потрібно проведення емпіричної перевірки для урахування статистичних даних про результати застосування ЭОР в ході навчального процесу. При цьому такі вимоги

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

к качеству КОР как успеваемость и валидность являются требованиями к показателям, которые могут быть определены только по результатам обучения.

Показатель успеваемости – наиболее распространенный количественный показатель качества учебной деятельности, но, несмотря на простоту использования, является недостаточно информативным, т. к. не в полной мере характеризует подготовленность обучаемых и трудность заданий, вследствие чего успеваемость не может быть использована как основной критерий качества ЭОР.

Валидность, как степень соответствия педагогических заданий целевой аудитории, применяется в теории педагогического тестирования для решения узконаправленных задач по разработке тестов и в системах адаптивного обучения. В условиях реализации концепции индивидуализации обучения валидность является показателем, который необходимо учитывать при оценке качества ЭОР.

Надежность, как степень завершенности ЭОР, является показателем, позволяющим идентифицировать наличие скрытых дефектов учебных материалов.

Технологичность учебных материалов определяется функциональными свойствами ЭОР, которые проявляются в ходе учебного процесса и может быть оценена на этапе «Внедрение». Исходя из того, что только при высокой технологичности учебных материалов возможно обеспечение индивидуализации обучения в условиях массовости образования, это подтверждается и результатами исследований, выполненных на основе электронных ресурсов [14], технологичность выделяется как показатель, который также необходимо учитывать при оценке качества ЭОР.

Таким образом, в ходе анализа установлено, что процессы, определяющие качество ЭОР и удовлетворяющие условию контролируемости входных и выходных параметров средствами систем дистанционного обучения, подразделяются на: «Организация использования», «Учебная деятельность», «Анализ результатов учебной деятельности», «Оценка» и «Поиск решения по оптимизации», а основными требованиями к качеству ЭОР являются успеваемость, валидность, надежность и технологичность.

Разработка комплексного критерия качества ЭОР, учитывающего указанные требования к качеству представлена в работе А. Л. Данченко [9]. Качество ЭОР в виде совокупности составляющих предоставляет информацию для принятия решения по каждому из показателей и имеет вид:

$$\bar{Q}(S_{\text{кор}}) = \langle Q_1(S_{\text{кор}}); Q_2(S_{\text{кор}}); Q_3(S_{\text{кор}}); Q_4(S_{\text{кор}}) \rangle, \quad (1)$$

где  $Q_1(S_{\text{кор}})$  – критерий успеваемости;

$Q_2(S_{\text{кор}})$  – критерий валидности;

$Q_3(S_{\text{кор}})$  – критерий технологичности;

$Q_4(S_{\text{кор}})$  – критерий надежности;

$S_{\text{кор}}$  – концептуальный граф изучения КОР.

Качество ЭОР в виде функциональной зависимости имеет вид:

$$Q(S_{\text{кор}}) = \prod_{i=1}^n (Q_i(S_{\text{кор}}))^{w_i}. \quad (2)$$

Модель базы знаний СППР по совершенствованию качества ЭОР, учитывающая комплексный критерий качества, (рис. 1) является сетью фреймов. Сеть фреймов содержит 3 иерархии фреймов-прототипов («Обучаемые», «Структура курса» и «Результаты обучения»), фрейм-прототип «Обучающий элемент» для определения обучающего контента, фрейм-прототип «Журнал» для установки связей на уровне экземпляров класса «Группа» и экземпляров класса «Версия», фреймы-прототипы «Уровень усвоения», «Обратная связь», «Дефект», «Сопровождение» для определения таких характеристик образовательных ресурсов, как: уровень усвоения, тип обратной связи, дефекты и сопровождения – возможности технической поддержки ЭОР в ходе эксплуатации.

Правила логического вывода СППР (табл. 1) обеспечивают уровень детализации мониторинга  $L_{S_{\text{кор}}}$  от 1 до 5. При  $L_{S_{\text{кор}}} = 1$ , соответствующему уровню детализации «Версия», предоставляются наиболее обобщенные рекомендации по результатам оценивания качества ЭОР, входящих в состав анализируемого курса; уровень детализации  $L_{S_{\text{кор}}} = 5$  («Шаг»), напротив, наиболее точно определяет набор рекомендаций по

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

совершенствованию качества текущего элемента ЭОР. Правила оперируют фактами, полученными в результате выполнения присоединенных процедур, и эталонными значениями уровней качества единичных показателей вектора  $\bar{\varphi}$  (табл. 1), который определяет для каждого показателя значение границы низкого качества, значение границы высокого качества и значение максимально допустимого качества для установки «зоны вето».

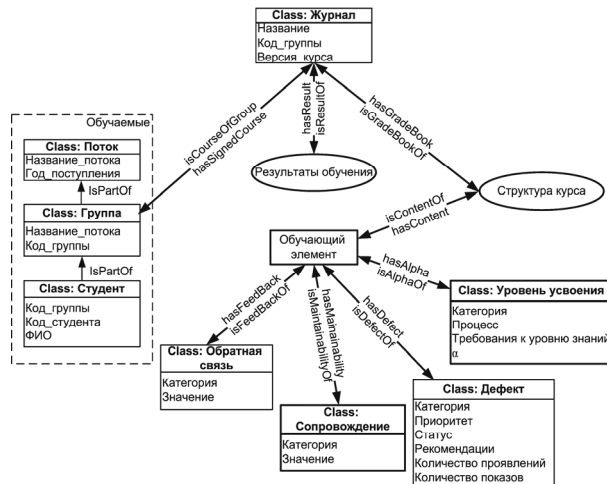


Рис. 1. Сеть фреймов базы знаний СППР

Таблица 1

Значения параметров вектора  $\bar{\varphi}$ 

| Название                     | Граница низкого качества | Граница высокого качества | Максимально допустимое |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|
| $j$                          | 1                        | 2                         | 3                      |
| Успеваемость, $\varphi_1$    | 0,4999                   | 0,7999                    | 0,9                    |
| Валидность, $\varphi_2$      | 0,4999                   | 0,7999                    | 1                      |
| Технологичность, $\varphi_3$ | 0,4999                   | 0,7999                    | 1                      |
| Надежность, $\varphi_4$      | 0,4999                   | 0,7999                    | 1                      |

Эталонное значение  $\varphi_{ij}$  сравнивается с фактическим значением показателя  $Q_i(S_{\text{кор}})$  полученным в результате вычисления соответствующей присоединенной процедуры на заданном уровне детализации  $L_{S_{\text{кор}}}$ . Приоритет правил определяется, исходя из значений функционального свойства образовательных ресурсов «Сопровождение».

Присоединенные процедуры обеспечивают такую функциональность:  $EvQ$  выполняет расчет комплексного показателя качества согласно формуле (2);  $EvQ_1$ ,  $EvQ_2$ ,  $EvQ_3$ , и  $EvQ_4$  выполняют расчет значений качества показателей успеваемости, валидности, технологичности и надежности соответственно;  $EvExtr$  предоставляет информацию о «провалах» информационной функции образовательных ресурсов;  $EvBeta$  предоставляет данные о трудности заданий  $\beta$ ;  $Evd$  вычисляет дискриминационную способность ЭОР  $\gamma$ ;  $EvkT$  возвращает значение коэффициентов технологичности  $k^T$ ,  $EvAlpha$  – значения уровней усвоения  $\alpha$ ,  $EvMaintain$  – значения сопровождения,  $EvDef$  предоставляет информацию о дефектах и рекомендации по их устранению.

При анализе фактического показателя успеваемости в процессе автоматической генерации рекомендаций, формируемых СППР, следует учитывать, что данный показатель недостаточно информативен сам по себе: наличие высоких показателей успеваемости может быть обусловлено как высоким уровнем подготовки обучаемых, так и слишком легкими заданиями; низкая успеваемость может наблюдаться как при низкой подготовке обучаемых, так и при наличии чрезмерно трудных заданий. В обоих случаях наблюдается несоответствие образовательных ресурсов целевой аудитории. Поэтому для корректировки показателя успеваемости применяется правило, формирующее общую рекомендацию для повышения успеваемости с учетом показателя валидности  $Q_2(S_{\text{кор}})$ :

ЕСЛИ  $(EvQ_1(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) < \varphi_{11})$  AND

$EvQ_2(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) < \varphi_{21}$ ,

ТО «Требуется повысить успеваемость. Рекомендуется понижение трудности заданий или разработка дополнительных упрощенных заданий».

При наличии высокого показателя успеваемости  $Q_1(S_{\text{кор}})$  и низкого показателя валидности  $Q_2(S_{\text{кор}})$  формируется общая рекомендация вида:

ЕСЛИ  $(EvQ_1(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) = \varphi_{12})$  AND

$EvQ_2(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) < \varphi_{21}$ ,

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ТО «Высокая успеваемость при низком показателе валидности. Рекомендуется повышение трудности заданий или разработка дополнительных заданий повышенной трудности».

При наличии локальных максимумов информационная функция содержит «провалы» (разработка метода поиска «провалов» информационной функции представлена в [7]), поэтому для корректировки показателя валидности ЛПР будет предоставлена соответствующая рекомендация по их устранению:

$$\text{ЕСЛИ } EvExtr(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) > 1,$$

ТО «Рекомендуется разработка дополнительных заданий с трудностью, соответствующей интервалу провала информационной функции».

Для формирования более точных рекомендаций по корректировке параметров показателя валидности требуется анализ графического образа информационной функции образовательных ресурсов, трудности  $\beta$  и дискриминационной способности  $\gamma$  ЭОР. При формировании рекомендаций по корректировке трудности  $j$ -го ЭОР целесообразно использовать общепринятые категории трудности  $\beta$  согласно [1, 11]:

- Очень легкие задания,  $\beta_j < -2,6$  логит.
- Легкие задания,  $-2,6 < \beta_j < -1,5$  логит.
- Задания средней трудности,  $-1,49 < \beta_j < 1,49$  логит.
- Трудные задания,  $1,49 < \beta_j < 2,59$  логит.
- Очень трудные задания,  $\beta_j \geq 2,6$  логит.

При этом отрицательное значение  $\gamma$  является явным признаком дефекта задания, что выражается в том, что подготовленные ученики выполняют задание образовательных ресурсов неверно, а неподготовленные дают правильный ответ. Причинами являются: некорректная постановка задачи; дистрактор помечен как правильный ответ. ЭОР с  $\gamma < 0$  подлежит обязательной модификации или удалению. Правила для формирования рекомендаций по корректировке валидности с учетом отрицательного параметра дискриминации для заданий нетестовой формы имеют вид:

$$\text{ЕСЛИ } (EvQ_2(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) < \varphi_{21} \text{ AND}$$

$$Evd(L_{S_{\text{кор}}} - 1) < 0 \text{ AND Форма} = \text{«Нетестовая»},$$

ТО «Отрицательное значение параметра дискриминации указывает на наличие ошибок в задании. Задание подлежит модификации или удалению».

Правила для формирования рекомендаций по корректировке валидности с учетом отрицательного параметра дискриминации для заданий тестовой формы и смешанной формы имеют вид:

$$\text{ЕСЛИ } (EvQ_1(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) < \varphi_{21} \text{ AND}$$

$$Evd(L_{S_{\text{кор}}} - 1) < 0 \text{ AND Форма} \neq \text{«Нетестовая»},$$

ТО «Отрицательное значение дискриминационного параметра указывает на наличие ошибок в задании. Проверьте корректность постановки задачи. Для тестовых заданий проверьте корректность дистракторов. Задание подлежит модификации или удалению».

Рекомендации для ЭОР с  $0,5 \leq \gamma \leq 0,5$ :

$$\text{ЕСЛИ } (EvQ_2(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) < \varphi_{21} \text{ AND}$$

$$0 \leq Evd(L_{S_{\text{кор}}} - 1) \leq 0,5$$

ТО «Задание не дифференцирует знания обучаемых. Задание подлежит удалению либо модификации».

Рекомендации для ЭОР с  $0,5 < \gamma < 1$ :

$$\text{ЕСЛИ } (EvQ_2(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) < \varphi_{21} \text{ AND}$$

$$(0,5 < Evd(L_{S_{\text{кор}}} - 1) < 1),$$

ТО «Задание обладает низкой дифференцирующей способностью и подлежит модификации».

Если для ЭОР наблюдается недостаточно высокий уровень показателя технологичности  $Q_3(S_{\text{кор}})$  при уровне усвоения  $\alpha$  менее 5 и коэффициенте технологичности  $k^T < 1$ , то правила формирования рекомендаций имеют вид:

ЕСЛИ

$$((EvQ_3(S_{\text{кор}}, L_{S_{\text{кор}}}) < \varphi_{31}) \text{ AND } (\alpha < 5) \text{ AND } (k^T < 1)),$$

ТО «Рекомендуется повышение технологичности путем усовершенствование способа организации обратной связи».

Если для ЭОР наблюдается недостаточно высокий уровень показателя технологичности  $Q_3(S_{\text{кор}})$  при уровне усвоения менее 5 и коэффициенте технологичности  $k^T = 1$ , то правила формирования рекомендаций имеют вид:

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ЕСЛИ

$$\left( (EvQ_3(S_{кор}, L_{S_{кор}}) < \varphi_{31}) \text{AND}(\alpha < 5) \text{AND}(k^T = 1) \right),$$

ТО «Рекомендуется повышение технологичности путем повышения уровня усвояемости заданий».

Для ЭОР с высоким уровнем усвояемости низкими значениями коэффициента технологичности  $k^T$  рекомендации формируются в зависимости от формы заданий:

$$\text{ЕСЛИ} \left( \left( EvQ_3(S_{кор}, L_{S_{кор}}) < \varphi_{31} \right) \text{AND}(\alpha \geq 5) \right), \\ \left( \text{AND}(k^T < 1) \text{AND}(\Phi_{орма} = "H\Phi") \right),$$

ТО «Рекомендуется повышение технологичности путем перевода в тестовую форму отдельных этапов задания».

$$\text{ЕСЛИ} \left( \left( EvQ_3(S_{кор}, L_{S_{кор}}) < \varphi_{31} \right) \text{AND}(\alpha \geq 5) \right), \\ \left( \text{AND}(k^T < 1) \text{AND} "T\Phi" \right),$$

ТО «Рекомендуется повышение технологичности путем автоматизации обратной связи отдельных этапов задания».

Для корректировки показателя надежности общая рекомендация имеет вид:

$$\text{ЕСЛИ} \left( EvQ_4(S_{кор}, L_{S_{кор}}) < \varphi_{41} \right),$$

ТО «Рекомендуется устранение дефектов на уровне детализации  $L_{S_{кор}} - 1$ ».

Детализированные рекомендации формируются путем анализа текущего списка зафиксированных дефектов данного ЭОР. Рекомендации формируются в соответствии с уровнем приоритета дефектов в убывающем порядке.

Наличие встроенных функциональных возможностей и визуальных средств для работы со сложными иерархическими структурами данных, свободный доступ к документации, а также возможность использования коммерческого программного обеспечения Microsoft в рамках лицензии Microsoft Academic Alliance обусловили выбор Microsoft SQL Server 2008 в качестве сервера базы данных и MS VisualStudio 2010 – в качестве среды разработки. Программная реализация СППР по совершенствованию качества ЭОР включает три подсистемы:

– OLTP-база для хранения фактов о ходе

учебного процесса и метаданных образовательных ресурсов, реализованная средствами MS SQL Server 2008.

– Хранилище данных автоматизированной системы мониторинга, выполненное средствами MS SQL Server 2008 на основе материализованных представлений и денормализованных таблиц для хранения плоских данных.

– Приложение-клиент для взаимодействия с ЛПР, OLTP-базой и хранилищем данных, выполненное средствами MS VisualStudio 2010.

Рекомендации по совершенствованию качества ЭОР предоставляются как в графической (рис. 2), так и в текстовой, и в табличной форме по каждому показателю, что обеспечивает визуализацию результатов вычислений для ЛПР.



Рис. 2. Графическое представление результатов вычислений по валидности

Пример автоматически сгенерированных рекомендаций по экспериментальному курсу ТАУ для показателя валидности представлен на рис. 3. Поиск провалов информационной функции выполнен согласно методу, представленному в [7].

Детализированные рекомендации по валидности:

**Интервалы провалов функции**

Рекомендуется разработка дополнительных заданий с трудностью, соответствующей интервалу провала информационной функции

| № п.п. | Значение экстремума | Тип экстремума       | Начальная точка провала | Конечная точка провала |
|--------|---------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|
| 1.     | 5,1564              | Локальный экстремум  | -0,5                    | 0                      |
| 2.     | 11,7972             | Глобальный экстремум | 1                       | ---                    |

На интервале подготовленности от -3 до -1,4 логит информационная функция меньше 2,35944 логит. Рекомендуется разработка дополнительных заданий данной трудности.

На интервале подготовленности от 2 до 3 логит информационная функция меньше 2,35944 логит. Рекомендуется разработка дополнительных заданий данной трудности.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Рис. 3. Рекомендации по устранению провалов информационной функции

При использовании программной реализации СППР в ходе экспериментального исследования были получены результаты по динамике показателей качества для трех курсов: «Основы дискретной математики (ОДМ)», «Проектирование технических средств систем управления» (ПТССУ) и «Теория автоматического управления» (ТАУ). При этом для всех учебных дисциплин наблюдается рост качества по комплексному критерию (рис. 4).

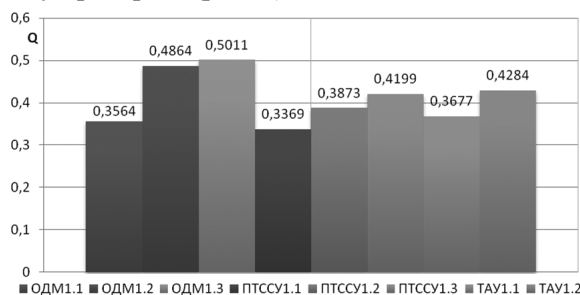


Рис. 4. Динамика показателей качества курсов

**Практическая значимость**

Применительно к задаче автоматизации информационной поддержки принятия решений по совершенствованию качества ЭОР разработана модель информационной структуры базы знаний СППР, правила логического вывода и программная реализация СППР, обеспечивающая автоматизацию процессов анализа, оценки качества, визуализации результатов вычислений и формирования рекомендаций для ЛПР.

Разработанная информационная структура базы знаний системы поддержки принятия решений и правила логического вывода могут быть использованы методистами и разработчиками контента обучающих систем.

**Выводы**

Выполнен анализ процессов жизненного цикла и требований к качеству ЭОР, установлено, что основными требованиями к качеству ЭОР являются успеваемость, валидность, надежность и технологичность. Для всех исследуемых учебных дисциплин зафиксирован рост качества по комплексному критерию.

В будущем планируются дополнительные исследования для обеспечения возможности

оценки качества КОР с учетом качества содержания учебных программ и формирования соответствующих рекомендаций СППР.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Аванесов, В. С. Основы теории педагогических заданий / В. С. Аванесов // Педагогические измерения. – 2006 – № 2. – С. 26–62.
2. Беспалько, В. П. Образование и обучение с участием компьютеров (педагогика третьего тысячелетия) / В. П. Беспалько. – М. : МПСИ, МОДЭК. – 2002. – 352 с.
3. Білик, О. О. Інформаційна технологія моніторингу якості загальноосвітніх навчальних закладів : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.13.06 / Білик Олег Олександрович; Черкаський держ. технол. ун-т. – Черкаси, 2009. – 19 с.
4. Боднар, Б. Є. Системы управления качеством по стандарту ISO 9000 в высших учебных заведениях / Б. Є. Боднар, О. О. Матусевич // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 167–172.
5. Боцула, М. П. О проблеме экспертизы качества материалов дистанционных курсов / М. П. Боцула, И. А. Моргун // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 4. – С. 1–6.
6. Воробкалов, П. Н. Оценка качества электронных обучающих систем / П. Н. Воробкалов, В. А. Камаев // Управление большими системами : сб. трудов. – М. : ИПУ РАН, 2009. – Вып. 24. – С. 99–112.
7. Данченко, А. Л. Анализ процессов совершенствования качества электронных образовательных ресурсов / А. Л. Данченко // Інженерія програмного забезпечення. – 2011. – № 2 (6). – С. 73–77.
8. Данченко, А. Л. Исследование информационной функции Бирнбаума применительно к задаче мониторинга образовательных ресурсов обучающих систем / А. Л. Данченко, В. А. Ульшин // Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та. – 2012. – № 13. – Т. 4 – С. 113–117.
9. Данченко, А. Л. Разработка комплексного критерия качества образовательных ресурсов / А. Л. Данченко, В. А. Ульшин // Вісник ЧНУ ім. В. Даля. – 2012. – № 4 (175). – С. 117–122.
10. ДСТУ ISO 9000-2007. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. – На заміну ДСТУ ISO 9000-2001 ; введ. 2008-01-01. – К : Держспоживстандарт України, 2008. – 29 с.
11. ДСТУ ISO 9004-2001. Системи управління

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

- якістю. Настанови щодо поліпшення діяльності. – На заміну ДСТУ ISO 9004-1-95 ; введ. 2001-27-06. – К : Держспоживстандарт України, 2001. – 60 с.
12. Ким, В. С. Тестирование учебных достижений : монография / В. С. Ким. – Уссурийск : Изд-во УГПИ, 2007. – 214 с.
  13. Краснюк, А. В. Модульна система як засіб підвищення якості під час вивчення нарисної геометрії студентами технічних ВНЗ / А. В. Краснюк, Т. В. Ульяченко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 36. – С. 185–188.
  14. Advanced Distributed Learning [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.adlnet.gov/Pages/Default.aspx>. – Title from the screen.
  15. ISO/IEC 19796-3:2009 (2009). Information Technology - Learning, Education, and Training – Quality Management, Assurance and Metrics – Part 3: Reference Methods and Metrics [Electronic resource] / International Organisation for Standardization (ISO). – Geneva. – 2009. – Access mode: [http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=46159](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=46159). – Title from the screen.
  16. Pawlowski, J. M. The Quality Adaptation Model: Adaptation and Adoption of the Quality Standard ISO / IEC 19796-1 for Learning, Education, and Training [Electronic resource] / J. M. Pawlowski // Educational Technology & Society. – 2010. – № 10 (2). – P. 3–16. – Access mode: [http://www.ifets.info/journals/10\\_2/2.pdf](http://www.ifets.info/journals/10_2/2.pdf). – Title from the screen.
  17. Plaza, I. Quality and innovation in Higher Education: Code of Good Practices [Electronic resource] / I. Plaza, F. Arcega, F. Ibáñez // Frontier in Education. – 2010. – Access Mode: <http://fieconference.org>. – Title from the screen.

А. Л. ДАНЧЕНКО<sup>1\*</sup>

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ВДОСКОНАЛЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ОСВІТНІХ РЕСУРСІВ

<sup>1\*</sup>Каф. «Системна інженерія», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, кв. Молодіжний, 20 а, 91034, Луганськ, Україна, тел. + 38 (0642) 47 14 44, + 38 (050) 655 07 01, ел. пошта [danalleo@gmail.com](mailto:danalleo@gmail.com).

**Мета.** В умовах активного розвитку e-learning все більшого значення набуває якість електронних освітніх ресурсів систем дистанційного навчання. Швидке старіння інформації та масовість освіти обумовлюють необхідність підвищення ефективності процесу вдосконалення якості електронних освітніх ресурсів шляхом автоматизації інформаційної підтримки прийняття рішень з вдосконалення якості електронних освітніх ресурсів. **Методика.** Задачу розв'язано методами штучного інтелекту шляхом побудови інформаційної структури бази знань системи підтримки прийняття рішень на основі фреймової моделі подавання знань та продукційних правил логічного виведення. **Результати.** За результатами аналізу процесів життєвого циклу та вимог до якості електронних освітніх ресурсів розроблено інформаційну структуру бази знань системи підтримки прийняття рішень, правила логічного виведення та програмну реалізацію системи підтримки прийняття рішень; виконано аналіз динаміки показників якості версій курсів. **Практична значимість.** Встановлено, що основними вимогами до якості електронних освітніх ресурсів є успішність навчання, валідність контенту, технологічність та надійність. Показано, що при використанні програмної реалізації системи в ході експериментального дослідження для всіх курсів, що досліджувалися, зафіксовано зростання якості за комплексним критерієм. Інформаційна структура бази знань підтримки прийняття рішень та правила логічного виведення можуть бути використані методистами та розробниками контенту систем навчання.

**Ключові слова:** якість; електронні освітні ресурси; представлення знань; правила логічного виведення; особа, що приймає рішення

A. L. DANCHENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. "Systems Engineering", East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, Molodizhnyi Quarter,  
20 a, 91034, Luhansk, Ukraine, tel. + 38 (0642) 47 14 44, + 38 (050) 655 07 01, e-mail danalleo@gmail.com.

## AUTOMATION OF INFORMATION DECISION SUPPORT TO IMPROVE E-LEARNING RESOURCES QUALITY

**Purpose.** In conditions of active development of e-learning the high quality of e-learning resources is very important. Providing the high quality of e-learning resources in situation with mass higher education and rapid obsolescence of information requires the automation of information decision support for improving the quality of e-learning resources by development of decision support system. **Methodology.** The problem is solved by methods of artificial intelligence. The knowledge base of information structure of decision support system that is based on frame model of knowledge representation and inference production rules are developed. **Findings.** According to the results of the analysis of life cycle processes and requirements to the e-learning resources quality the information model of the structure of the knowledge base of the decision support system, the inference rules for the automatically generating of recommendations and the software implementation are developed. **Practical value.** It is established that the basic requirements for quality are performance, validity, reliability and manufacturability. It is shown that the using of a software implementation of decision support system for researched courses gives a growth of the quality according to the complex quality criteria. The information structure of a knowledge base system to support decision-making and rules of inference can be used by methodologists and content developers of learning systems.

**Keywords:** quality; e-learning resources; knowledge representation; the inference rules; decision-maker

### REFERENCES

1. Avanesov V.S. Osnovy teorii pedagogicheskikh zadaniy [Fundamentals of the training task theory] *Pedagogicheskie izmereniya – Pedagogical dimensions*, 2006, no. 2, pp. 26-62.
2. Bospalko V.P. *Obrazovaniye i obucheniye s uchastiyem kompyuterov (pedagogika tretyego tysyacheletiya)* [Education and training with computers (the pedagogy of the third millennium)]. Moscow, MPSI, MODJeK Publ., 2002. 352 p.
3. Bilyk O.O. *Informatsiina tekhnolohiia monitorynhu yakosti zahalnoosvitnikh navchalnykh zakladiv* [Information technology for monitoring of schools quality]. Avtoreferat Diss. [Information technology for monitoring of the schools quality. Author's abstract.]. Cherkasy, 2009. p. 19.
4. Bodnar B.Ye., Matusevich O.O. Sistemy upravleniya kachestvom po standartu ISO 9000 v vysshikh uchebnykh zavedeniyakh [Systems for quality management according to the standard ISO 9000 in high school]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 40, pp. 167-172.
5. Botsula M.P., Morgun I.A. O probleme ekspertizy kachestva materialov distantsionnykh kursov [About the problem of quality assessment materials online courses]. *Naukovi praci VNTU – Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2008, vol. 4, pp. 1-6.
6. Vorobkalov P.N., Kamayev V.A. Otsenka kachestva elektronnykh obuchayushchikh sistem [Assessment of quality of e-learning systems]. *Upravleniye bolshimi sistemami* [Management of large systems], 2009, vol. 24, pp. 99-112.
7. Danchenko A.L. Analiz protsessov sovershenstvovaniya kachestva elektronnykh obrazovatelnykh resursov [Analysis of the process of improving the quality of e-learning resources]. *Inzheneriia prohramnoho zabezpechennia – Software engineering*, 2011, no. 2 (6), pp. 73-77.
8. Danchenko A.L., Ulshin V.A. Issledovaniye informatsionnoy funktsii Birnbauma primenitelno k zadache monitoringa obrazovatelnykh resursov obuchayushchikh sistem [The study of the information function of Birnbaum referenced to the problem of monitoring e-learning resources]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – News of Volgograd State Technical University*, 2012, no 13, vol. 4, pp. 113-117.
9. Danchenko A.L., Ulshin V. A. Razrabotka kompleksnogo kriteriya kachestva obrazovatelnykh resursov [Development of a comprehensive quality criterion of educational resources]. *Visnyk Shkhydnoукраїнського національного університету залізничного транспорту*, 2013, вип. 3 (45), pp. 113-117.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

- alnoho universytetu imeni V. Dalia* [Bulletin of East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl], 2012. no. 4 (175). pp. 117-122.
10. DSTU ISO 9000-2007. Systemy upravlinnia yakistiu. Osnovni polozhennia ta slovnyk terminiv (Vymogy ISO 9000:2007, IDT) [Quality management systems. Key terms and glossary]. Kyiv, Derzhspozhivstandart Publ., 2008, 29 p.
  11. DSTU ISO 9004-2001. Systemy upravlinnia yakistiu. Nastanovy shchodo polipshennia diialnosti. (Vymogy ISO 9000:2007, IDT) [Quality management systems. Guidelines for the improvement]. Kyiv, Derzhspozhivstandart Publ., 2001. 60 p.
  12. Kim V.S. Testirovaniye uchebnykh dostizheniy [Testing educational achievements]. Ussuriysk, UGPI Publ., 2007. pp. 214.
  13. Krasnyuk A.V., Ulchenko T.V. Modulna systema yak zasib pidvyshchennia yakosti pid chas vyvchennia narysnoi heometrii studentamy tekhnichnykh VNZ [Modular system as a means of improving during the study descriptive geometry students of technical universities]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 185-188.
  14. Advanced Distributed Learning, 2010. Available at: <http://www.adlnet.gov/Pages/Default.aspx>. (Accessed 11 June 2013).
  15. ISO/IEC 19796-3:2009 (2009). Information Technology - Learning, Education, and Training – Quality Management, Assurance and Metrics – Part 3: Reference Methods and Metrics. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, 2009. Available at: [standards.iso.org](http://standards.iso.org). (Accessed 11 June 2013).
  16. Pawlowski J.M. The Quality Adaptation Model: Adaptation and Adoption of the Quality Standard ISO/IEC 19796-1 for Learning, Education, and Training. *Educational Technology & Society*, 2010. no. 10 (2). pp. 3-16. Available at: [http://www.ifets.info/journals/10\\_2/2.pdf](http://www.ifets.info/journals/10_2/2.pdf). (Accessed 11 June 2013).
  17. Plaza I., Arcega F., Ibáñez F. Quality and innovation in Higher Education: Code of Good Practices *Frontier in Education*, 2010. Available at: <http://fie-conference.org>. (Accessed 11 June 2013).

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. А. Ульиным (Украина); д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Украина)

Поступила в редколлегию 28.03.2013

Принята к печати 18.06.2013

УДК 004.7-047.58

В. М. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>

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

## МЕТОДИКА ПОБУДОВИ РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ

**Мета.** Пошук нових варіантів для переходу від технології Ethernet. **Методика.** Фізична структуризація мережі Fast Ethernet на основі хабів і логічне структурування мережі Fast Ethernet за допомогою комутаторів. Організація VLAN на основі групування мережі портів і відповідно до стандарту IEEE 802.1Q. **Результати.** Запропоновано можливі варіанти удосконалення мережі Ethernet: згідно з технологіями Fast Ethernet і VLAN на імітаційних моделях у пакетах NetCraker і Cisco Packet Tracer відповідно. **Наукова новизна.** Запропоновано методику проектування локальної мережі за допомогою технології VLAN. **Практична значимість.** Кожний з варіантів удосконалення мережі «Дніпрозалізничпроект» має свої переваги. Перехід від технології Ethernet до технології Fast Ethernet простий і економічний, потребує одного комутатора, а при організації VLAN – не менше двох. Однак технологія VLAN має такі переваги: зменшення навантаження на мережу, ізолювання широкомовного трафіка, зміна логічної структури мережі без зміни фізичної структури, збільшення безпеки мережі. Перехід від технології Ethernet до технології VLAN дозволяє відділити фізичну топологію від логічної, а формат кадрів за стандартом IEEE 802.1Q дає можливість спростити сам процес впровадження віртуальних мереж у підприємства.

**Ключові слова:** фізична та логічна структуризація мережі Fast Ethernet; віртуальна локальна мережа; групування портів; кадр стандарту IEEE 802.1Q

### Вступ

У деяких випадках при проектуванні локальних мереж із збільшенням кількості вузлів та інтенсивності трафіка перехід з Ethernet на Fast Ethernet здійснюється заміною відповідного комунікаційного обладнання та мережних карт, що значно простіше. Однак слід урахувати й альтернативний варіант переходу, зокрема організацію віртуальних локальних мереж (Virtual Local Area network, VLAN). Порівняємо можливі варіанти переходу на прикладі проектування локальної мережі «Дніпрозалізничпроект» для будівлі Управління Придніпровської залізниці.

### Мета

Відповідно до варіанта переходу від технології Ethernet до технології Fast Ethernet вирішити задачі фізичної та логічної структуризації мережі Fast Ethernet. Згідно з основними вимогами оцінити роботу мереж Fast Ethernet та Switched Fast Ethernet на відповідних імітаційних моделях в пакеті NetCraker. У відповідності до переходу від технології Ethernet до техноло-

гії VLAN запропонувати варіанти організації віртуальних локальних мереж: за групування портів та з використанням стандарту IEEE 802.1Q. Розглянути технологію перетворення стандартного Ethernet-кадру в кадр за стандартом IEEE 802.1Q та навпаки на розробленій імітаційній моделі VLAN в Cisco Packet Tracer.

### Методика

Потреба у високошвидкісній та недорогій технології для підключення до мережі потужних робочих станцій привела до пошуку нового Ethernet. Саме такою виявилась технологія Fast Ethernet [4], котра зберегла метод доступу CSMA/CD, часові параметри в бітових інтервалах (сам бітовий інтервал зменшився в 10 раз) і формат кадру [1–3, 13–15, 17]. Однак використання загального поділюваного середовища можливо тільки для мережі невеликого розміру [9–10], тому застосування технології Switched Fast Ethernet підвищує продуктивність, надійність, гнучкість побудови мережі та керування нею [5–8, 16]. VLAN має ті ж властивості, що й фізична локальна мережа, але дозволяє кінцевим станціям групуватися разом, навіть якщо

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

вони не знаходяться в одній фізичній мережі [11–12]. Створення віртуальних мереж за стандартом IEEE 802.1Q передбачає введення мітки до звичайного Ethernet-кадру: двобайтове поле TPID (Tag Protocol Identifier) і двобайтове поле TCI (Tag Control Information), яке складається з полів Priority (3 біта), CFI (Canonical Format Indicator, 1 біт) і VID (VLAN ID, 12 біт).

**Результат**

**Варіант 1: перехід з Ethernet на Fast Ethernet.** На першому етапі вирішена задача

фізичної структуризації мережі на основі двох концентраторів II класу з портами TX/FX, як фізичне середовище передачі даних – UTP категорії 5. Відповідну структуру мережі Fast Ethernet відображено на рис. 1, вказано довжини кожного кабелю та номер кімнати, до якої відноситься та чи інша робоча станція. Оцінка конфігурації мережі проводиться за моделлю, що базується на обчисленні сумарного подвійного часу проходження сигналу мережею (PDV), який склав 340,72 *bt*; отже конфігурація мережі Fast Ethernet коректна.

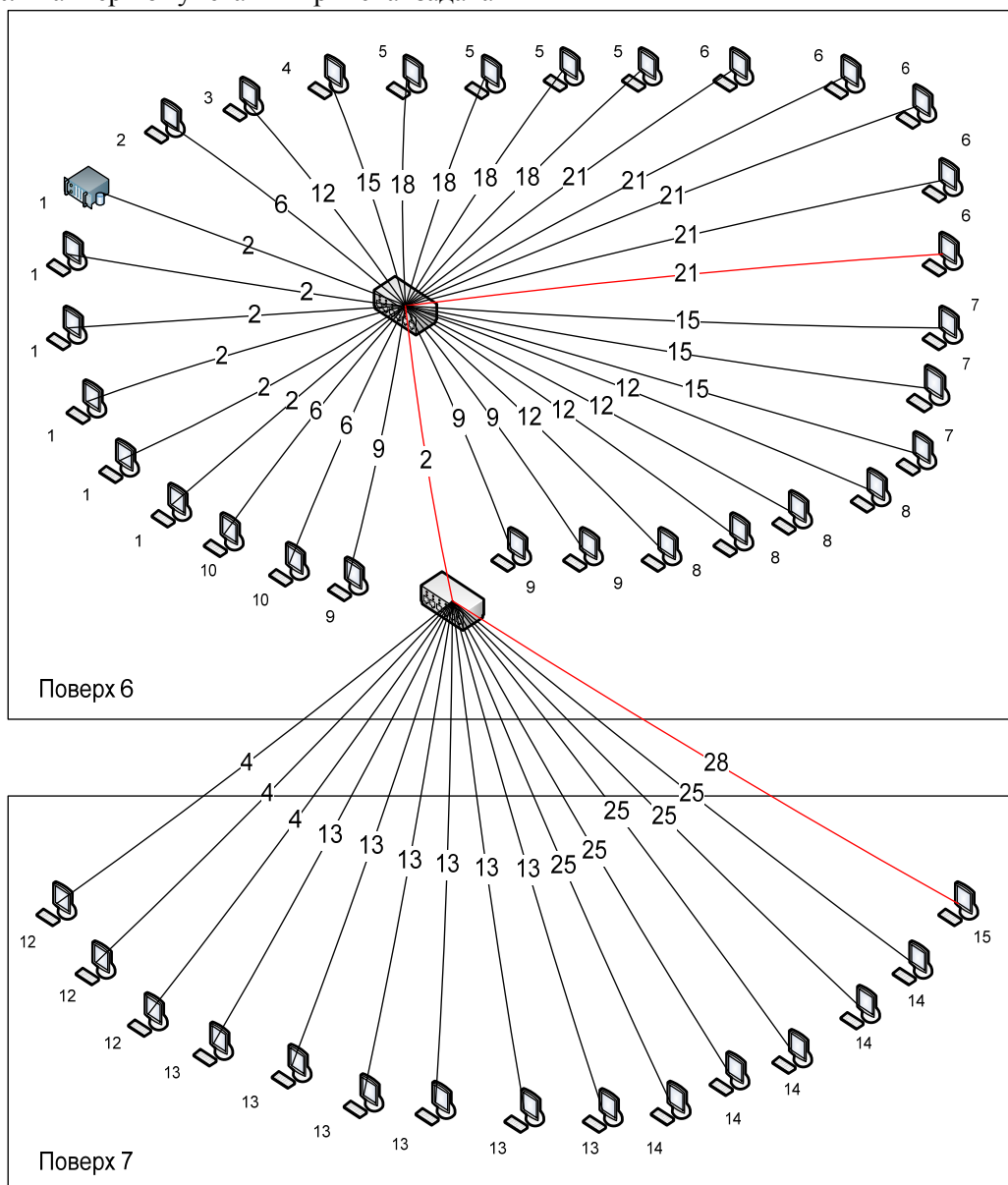


Рис. 1. Фізична структуризація мережі Fast Ethernet

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

На імітаційній моделі мережі Fast Ethernet (пакет NetCraker) знайдений поріг її працездатності: 45 робочих станцій. Завантаження одного з концентраторів (FastHub316T) у цій мережі склало 76,7 %, тому на другому етапі вирішена задача логічної структуризації мережі Fast Ethernet для локалізації мережного трафіку заміною двох концентраторів на один комутатор. Відповідну структуру мережі Fast Ethernet відображено на рис. 2, навантаження на комутатор складає лише 5,8 %.

**Варіант 2: організація VLAN.** У зв'язку з структурою об'єкта в розгляд введені п'ять віртуальних мереж: VLAN1 – мережа архітектур-

но-будівельного відділу, до якої входить головний інженер та відділ досліджень (один сервер, 15 комп'ютерів); VLAN2 – мережа бухгалтерії (один сервер, 3 комп'ютери); VLAN3 – відділ управління залізниці та електрифікації (один сервер, 8 комп'ютерів); VLAN4 – мережа загального призначення (5 комп'ютерів); VLAN5 – відділ кадрів (3 комп'ютери). Основною перевагою технології віртуальних локальних мереж є створення повністю ізольованих сегментів мережі шляхом логічного конфігурування комутаторів, не вдаючись до зміни фізичної структури.

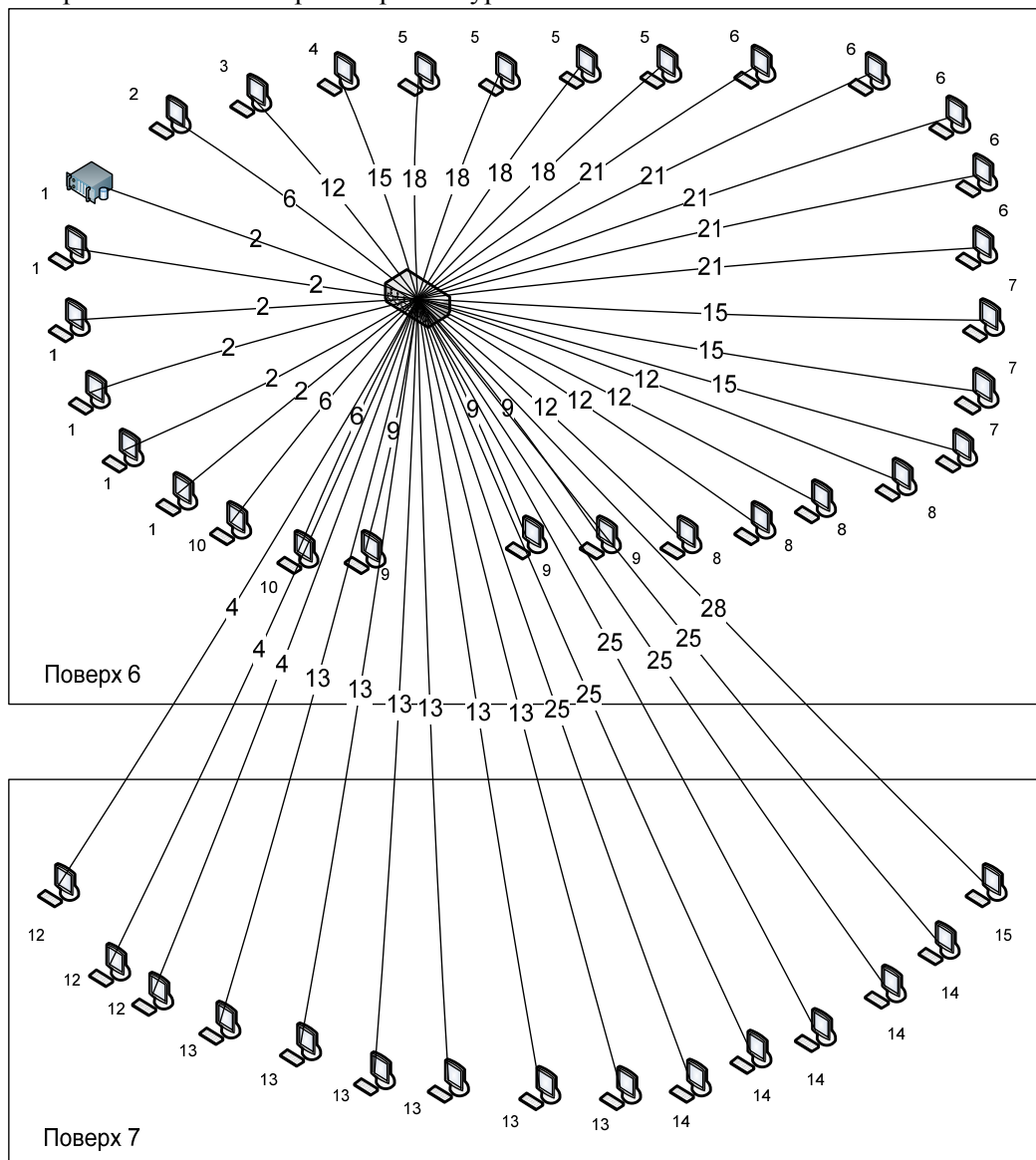


Рис. 2. Логічна структуризація мережі Fast Ethernet

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Розробка імітаційних моделей VLAN «Дніпрозалізничпроект» велась у Cisco Packet Tracer, який дозволяє найбільш широко і детально представити структуру локальних мереж, у тому числі й віртуальних, з можливістю тонкого налаштування моделей реального мережного обладнання Cisco.

На третьому етапі, згідно з механізмом групування портів, на об'єкті встановлено два комутатори Cisco2950-24, до одного з яких підключено всі п'ять віртуальних локальних мереж, до другого – три (VLAN1, VLAN3, VLAN5). Оскільки механізм групування портів

передбачає з'єднання комутаторів за принципом «одна підмережа – одне з'єднання», то між комутаторами встановлено три зв'язки для кожної VLAN1-VLAN3 (рис. 3).

На четвертому етапі розглянута організація VLAN «Дніпрозалізничпроект» за стандартом IEEE 802.1Q. На відміну від попереднього механізму, використання цього стандарту скорочує час налаштування мережі, а також полегшує її адміністрування, але потребує наявності обладнання підтримуючого формат кадру за даним стандартом/

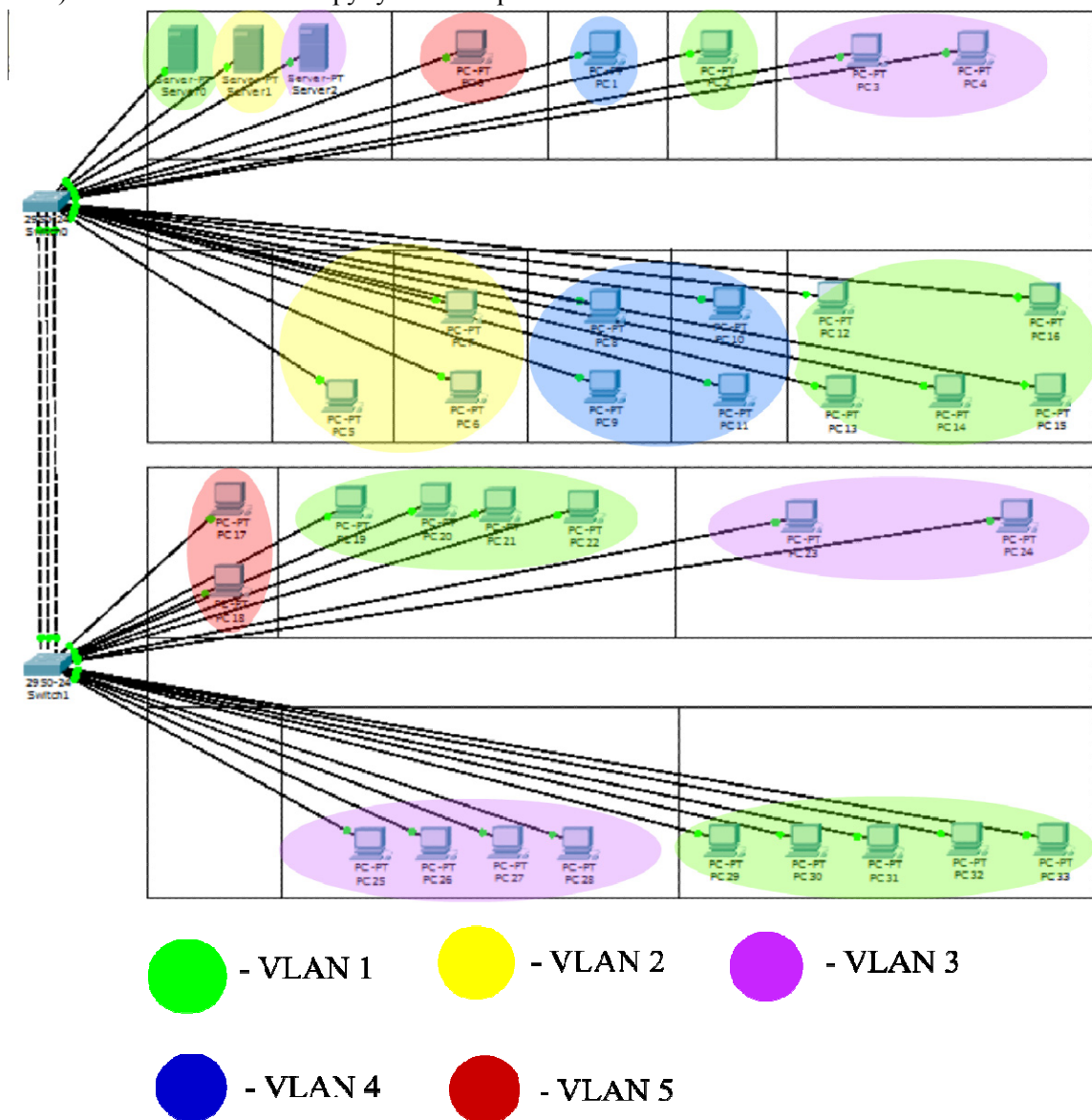


Рис. 3. Організація VLAN за механізмом групування портів

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Робоча станція генерує стандартний Ethernet-кадр (рис. 4 *a*), при надходженні до комутатора кадр перетворюється в кадр формату IEEE 802.1Q (рис. 4 *b*) і посиляється на інші комутатори. На інших комутаторах цей кадр розбирається, знову перетворюється в оригінальний Ethernet-кадр та посиляється тим станціям, які належать до тієї ж VLAN, що й відправник. Даний механізм дозволяє зменшити кількість ліній між комутаторами з трьох до однієї, тому що спостерігається відповідність MAC-адреси станції-приймальника з VLAN, а не номера порту з VLAN.

### Наукова новизна та практична значимість

Запропонована методика проектування ло-

кальних мереж за технологією VLAN, яка має вагомими переваги. Перехід від технології Ethernet до технології VLAN дозволяє відділити фізичну топологію від логічної, а формат кадрів за стандартом IEEE 802.1Q дає можливість спростити сам процес впровадження віртуальних мереж в організації. Мережа «Дніпрозалізничпроект» будівлі Управління Придніпровської залізниці, що побудована за технологією Ethernet, може бути удосконалена як за технологією Fast Ethernet, так і за технологією VLAN. При цьому активне обладнання мережі має бути завантажено не більш ніж на 50 % для подальшого розвитку мережі; основні вимоги до трафіку: розмір транзакції сягає від 800 до 1400 байт, час між транзакціями від 0,05 до 1 с.

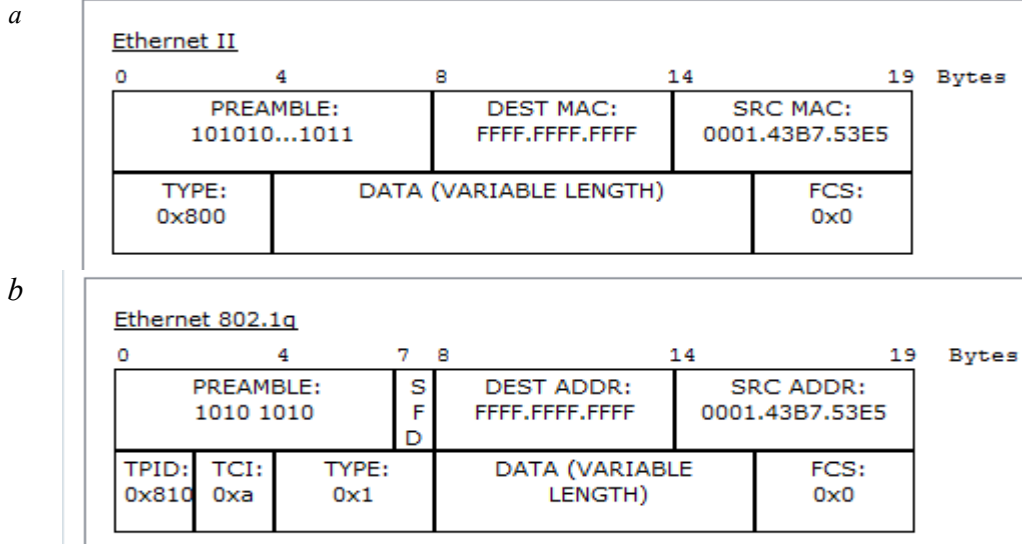


Рис. 4. Формат кадру: *a* – стандартного Ethernet; *b* – стандарту IEEE 802.1Q

### Висновки

1. При переході з технології Ethernet на технологію Fast Ethernet в мережі «Дніпрозалізничпроект» недостатньо вирішення задачі її фізичної структуризації (конфігурація мережі визначена коректною, знайдений поріг мережі), необхідно також виконати рішення задачі її логічної структуризації (заміна двох концентраторів на один комутатор). Моделювання на відповідних імітаційних моделях Fast Ethernet та Switched Fast Ethernet, які розроблені в пакеті NetCraker, відповідає основним вимогам.

2. При організації VLAN «Дніпрозалізничпроект» використання стандарту IEEE 802.1Q,

на відміну від механізму групування портів: скорочує час налаштування мережі, полегшує її адміністрування, дозволяє зменшити кількість ліній між комутаторами з трьох до однієї, але вимагає наявності обладнання підтримуючого формату кадру за даним стандартом. Крім того, віртуальні мережі можуть перехреснуватися, що дозволяє створювати поділювані мережні ресурси. Організація VLAN за різними механізмами представлена на відповідних імітаційних моделях в Cisco Packet Tracer.

3. Кожен з варіантів удосконалення мережі «Дніпрозалізничпроект» має свої переваги. Так перехід з технології Ethernet на технологію Fast Ethernet простий та найбільш економічний, по-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

требує одного комутатора для забезпечення основних вимог (при організації VLAN не менше двох комутаторів). Але технологія VLAN дає такі переваги: групування вузлів в окремі віртуальні мережі з можливістю створення правил для цих груп, зниження навантаження на мережу, ізолювання ширококомовного трафіку, зміна логічної структури мережі, не вдаючись до зміни фізичної структури, а також підвищення безпеки мережі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андерсон, К. Локальные сети. Полное руководство / К. Андерсон, М. Минаси. – СПб. : КОРОНА принт, 1999. – 626 с.
2. Берри, Н. Компьютерные сети / Н. Берри. – М. : БИНОМ, 1996. – 400 с.
3. Бутаев, М. М. Моделирование сетей ЭВМ / М. М. Бутаев, Н. Н. Коннов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. – 56 с.
4. Куил, Л. Fast Ethernet Компьютерные сети / Л. Куил, Р. Рассел. – К. : BHV, 1998. – 448 с.
5. Кулаков, Ю. А. Компьютерные сети / Ю. А. Кулаков, С. В. Омельянский. – К. : Юниор, 1999. – 544 с.
6. Марк, А. Высокопроизводительные сети. Энциклопедия пользователя / А. Марк. – К. : ДиаСофт, 1998. – 432 с.
7. Новиков, Ю. В. Локальные сети: архитектура, алгоритмы, проектирование / Ю. В. Новиков, С. В. Кондратенко. – М. : ЭКОМ, 2000. – 312 с.
8. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : Питер, 2001. – 672 с.
9. Пахомова, В. Н. Анализ локальных вычислительных сетей сортировочных станций на основе имитационной модели TOKEN RING / В. Н. Пахомова, А. А. Прудко // 3б. наук. пр. Дніпропетр. держ. техн. ун-ту залізн. трансп. «Транспорт». – Д., 2002. – Вип. 12. – С. 131–136.
10. Пахомова, В. М. Возможности использования технологий 100VG-AnyLAN в информационных системах железнодорожного транспорта / В. М. Пахомова, Т. І. Скабалланович, Д. А. Ляхов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 41. – С. 199–204.
11. Пахомова, В. М. Демонстрация организации виртуальных локальных сетей на программной модели / В. М. Пахомова, В. В. Заханевич // 3б. наук. пр. Донецького ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2012. – Вип. 31. – С. 85–94.
12. Пахомов, С. Возможности современных коммутаторов по организации виртуальных сетей [Электронный ресурс] / С. Пахомов // М. : КомпьютерПресс. – 2005. – № 4. – Режим доступа: <http://www.compress.ru/article.aspx?id=10522&iid=430>. – Загл. с экрана.
13. Семенов, А. Б. Проектирование и расчет структурированных кабельных систем и их компонентов / А. Б. Семенов. – М. : ДМК Пресс, 2003. – 416 с.
14. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум. – СПб. : Питер, 2007. – 992 с.
15. Metcalfe, R. M. Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks / R. M. Metcalfe, D. R. Boggs // Communications of the ACM. – 1976. – Vol. 19. – P. 395–404.
16. Nagle, J. On Packet Switches with Infinite Storage / J. Nagle // IEEE Transactions on Communications. – 1987. – Vol. COM-35. – P. 435–438.
17. Sari, H. Extending the Capacity of Multiple Access Channels / H. Sari, F. Vanhaverbeke, M. Moeneclaey. – IEEE Communications Magazine. – 2000. – Vol. 38. – P. 74–82.

В. Н. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373 15 89, эл. почта [viknik.p1988@mail.ru](mailto:viknik.p1988@mail.ru)

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

**Цель.** Поиск новых вариантов перехода от технологии Ethernet. **Методика.** Физическая структуризация сети Fast Ethernet на основе хабов и логическая структуризация сети Fast Ethernet с использованием коммутаторов. Организация VLAN на основе группировки сети портов и в соответствии со стандартом IEEE 802.1Q. **Результаты.** Предложены возможные варианты усовершенствования сети Ethernet: в соответствии с технологиями Fast Ethernet и VLAN на имитационных моделях в пакетах NetCraker и Cisco Packet Tracer соответственно. **Научная новизна.** Предложена методика проектирования локальной сети с использованием

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

технології VLAN. **Практическая значимость.** Каждый из вариантов усовершенствования сети «Днепро-железнодорожный» имеет свои преимущества. Переход от технологии Ethernet на технологию Fast Ethernet простой и экономный, требует одного коммутатора, а при организации VLAN – не менее двух. Однако технология VLAN обладает следующими преимуществами: снижение нагрузки на сеть, изолирование широковещательного трафика, изменение логической структуры сети без изменения физической структуры, повышение безопасности сети. Переход от технологии Ethernet к технологии VLAN позволяет отделить физическую топологию от логической, а формат кадров стандарта IEEE 802.1Q дает возможность упростить сам процесс внедрения виртуальных сетей в предприятия.

**Ключевые слова:** физическая и логическая структуризация сети Fast Ethernet; виртуальная локальная сеть; группировка портов; кадр стандарта IEEE 802.1Q

V. N. PAKHOMOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electronic computers», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str. 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail viknik.p1988@mail.ru

## METHOD OF CONSTRUCTION OF RATIONAL CORPORATE NETWORK USING THE SIMULATION MODEL

**Purpose.** Search for new options of the transition from Ethernet technology. **Methodology.** Physical structuring of the Fast Ethernet network based on hubs and logical structuring of Fast Ethernet network using commutators. Organization of VLAN based on ports grouping and in accordance with the standard IEEE 802.1Q. **Findings.** The options for improving of the Ethernet network are proposed. According to the Fast Ethernet and VLAN technologies on the simulation models in packages NetCraker and Cisco Packet Tracer respectively. **Originality.** The technique of designing of local area network using the VLAN technology is proposed. **Practical value.** Each of the options of "Dniprozaliznychproekt" network improving has its advantages. Transition from the Ethernet to Fast Ethernet technology is simple and economical, it requires only one commutator, when the VLAN organization requires at least two. VLAN technology, however, has the following advantages: reducing the load on the network, isolation of the broadcast traffic, change of the logical network structure without changing its physical structure, improving the network security. The transition from Ethernet to the VLAN technology allows you to separate the physical topology from the logical one, and the format of the IEEE 802.1Q standard frames allows you to simplify the process of virtual networks implementation to enterprises.

**Keywords:** physical and logical structuring of the network Fast Ethernet; virtual local area network; port grouping; IEEE 802.1Q standard frame

### REFERENCES

1. Anderson K., Minasi M. *Lokalnyye seti. Polnoye rukovodstvo* [Local area networks. Complete direction]. Saint Petersburg, KORONA print Publ., 1999. 626 p.
2. Berri N. *Kompyuternyye seti* [Computer networks]. Moscow, BINOM Publ., 1996. 400 p.
3. Butayev M.M., Konnov N.N. *Modelirovaniye setey EVM* [Modeling of the electronic computer networks]. Penza, Izd-vo Penz. gos. un-ta Publ., 2007. 56 p.
4. Kuil L., Rassel R. *Fast Ethernet Kompyuternyye seti* [Fast Ethernet Computer systems]. Kyiv, BHV Publ., 1998. 448 p.
5. Kulakov Yu.A., Omelyanskiy S.V. *Kompyuternyye seti* [Computer networks]. Kyiv, Yuniur Publ., 1999. 544 p.
6. Mark A. *Vysokoproizvoditelnyye seti. Entsiklopediya polzovatelya* [High efficiency networks. User's guideline]. Kiv, DiaSoft Publ., 1998. 432 p.
7. Novikov Yu.V., Kondratenko S.V. *Lokalnyye seti: arkhitektura, algoritmy, proektirovaniye* [Local area networks: architecture, algorithms, design]. Moscow, EKOM Publ., 2000. 312 p.
8. Olifer V.G., Olifer N.A. *Kompyuternyye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2001. 672 p.
9. Pakhomova V.N., Prudko A.A. Analiz lokalnykh vychislitelnykh setey sortirovochnykh stantsiy na osnove imitatsionnoy modeli TOKEN RING [Analysis of the local computer networks of the railway yard on the basis of simulation model TOKEN RING]. *Transport* [Transport], 2002, issue 12, pp. 131-136.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

10. Pakhomova V.M., Skaballanovych T.I., Liakhov D.A. *Mozhlyvist vykorystannia tekhnolohii 100VG-AnyLAN v informatsiinykh systemakh zaliznychnoho transportu* [The ability to use the technologies 100VG-AnyLAN in information systems of railway transport]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 41. pp. 199-204.
11. Pakhomova V.M., Zakhanevych V.V. *Demonstratsiia orhanizatsii virtualnykh lokalnykh merezh na prohramnii modeli* [Demonstration of the virtual local area networks organization on the program model]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho instytutu zaliznychnoho transportu* [Proceedings of the Donetsk Railway Transport Institute], 2012, issue 31, pp. 85-94.
12. Pakhomov S. *Vozmozhnosti sovremennykh kommutatorov po organizatsii virtualnykh setey* (Possibilities of the modern commutators in modern networks organization). *KompyuterPress – ComputerPress*, 2005, no. 4. Available at: <http://www.compress.ru/article.aspx?id=10522&iid=430> (Accessed 6 June 2013).
13. Semenov A.B. *Proyektirovaniye i raschet strukturirovannykh kabelnykh sistem i ikh komponentov* [Engineering and design of structured cable systems and their components]. Moscow, DMK Press Publ., 2003. 416 p.
14. Tanenbaum E. *Kompyuternyye seti* [Computer networks]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2007. 992 p.
15. Metcalfe R.M., Boggs D.R. Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks. *Communications of the ACM*, 1976, vol. 19, pp. 395-404.
16. Nagle J. On Packet Switches with Infinite Storage. *IEEE Transactions on Communications*, 1987, vol. COM-35, pp. 435-438.
17. Sari H., Vanhaverbeke F., Moeneclaey M. Extending the Capacity of Multiple Access Channels. *IEEE Communications Magazine*, 2000, vol. 38, pp. 74-82.

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

Надійшла до редколегії 08.04.2013

Прийнята до друку 21.06.2013

УДК 004.942:544.77.052.22

А. В. ПИСЬМЕНСКИЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Системная инженерия», Восточноукраинский национальный университет имени В. Даля, кв. Молодежный, 20 а, 91034, Луганск, Украина, тел. +38 (0642) 41 22 25, e-mail uni@snu.edu.ua

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДОЗИРОВАНИЯ ФЛОКУЛЯНТА

**Цель.** Задачей автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации является стабилизация плотности сгущенного продукта в заданном диапазоне и поддержание содержания твердой фазы в сливе не выше допустимого уровня при минимальном расходе флокулянта. В существующих системах автоматического управления дозирование флокулянта осуществляется по содержанию твердой фазы в питании аппарата (принцип разомкнутого управления). Это ведет к его перерасходу и увеличению дисперсии плотности слива. Для минимизации отклонений от задающего воздействия и обеспечения заданного качества переходного процесса необходимо выполнить синтез оптимального цифрового регулятора. Величина перерегулирования не должна превышать 5 %. Выполнить моделирование работы системы для определения качества переходных процессов. **Методика.** Синтез оптимального цифрового регулятора выполнен на основе метода динамического программирования. **Результаты.** Математическая модель объекта управления представлена в нормальной форме Коши и далее в виде разностных уравнений. Рассчитан оптимальный период квантования как функция от заданной погрешности регулирования и скорости изменения выходной координаты. Получено дифференциальное уравнение Беллмана и определено условие достижения минимума функционала качества. Функция Беллмана представлена в виде квадратичной формы от переменных состояния системы. Для ограничения возможного управления рассчитаны весовые коэффициенты функционала, исходя из максимально допустимых значений переменных состояния системы и управляющих воздействий во время переходного процесса. **Практическая значимость.** Моделированием работы САУ дозирования флокулянта установлено, что величина перерегулирования составляет 3,5 %, время переходного процесса 5,6 с, переходный процесс апериодический, регулирование астатическое, что отвечает требованиям, предъявленным к САУ.

**Ключевые слова:** флокулянт; оптимальный цифровой регулятор; период квантования; динамическое программирование; дифференциальное уравнение Беллмана; алгебраическое уравнение Риккати; нормальная форма Коши

### Введение

Задачей автоматического управления процессами сгущения шламовых вод и осветления отходов флотации является стабилизация плотности сгущенного продукта в заданном диапазоне и поддержание содержания твердой фазы в сливе (не выше допустимого уровня) при минимальном расходе флокулянта [12]. Одним из важных требований, предъявляемых к системе управления, является снижение расхода дорогостоящего флокулянта, эффективность действия которого может изменяться в пределах 15–20 % [7]. В существующих системах автоматического управления дозирование флокулянта осуществляется по содержанию твердой фазы в питании аппарата (принцип разомкнутого управления), что ведет к его перерасходу и уве-

личению дисперсии плотности слива [1]. Введение обратной связи по плотности слива позволяет поддерживать слив с большей точностью и снизить расход реагента.

### Цель

Для минимизации отклонений от задающего воздействия и обеспечения заданного качества переходного процесса выполнить синтез оптимального цифрового регулятора. Величина перерегулирования не должна превышать 5 %. Выполнить моделирование работы системы для определения качества переходных процессов.

### Методика

Синтез оптимального цифрового регулятора выполнен на основе метода динамического

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

программирования с квадратичным критерием качества.

## Результаты

Выполнен синтез оптимального регулятора для систем, описываемых в цифровом виде. Для этого был использован метод динамического программирования.

Пусть объект управления описывается системой разностных уравнений:

$$\Delta x_i[n] = \sum_{j=1}^k a_{ij} x_j[n] + b_i u[n] = f_i(x[n], u[n]), \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (1)$$

$$\min_u \left\{ f_0(x[n], u[n]) + \sum_{i=1}^k \frac{\partial S(x)}{\partial x_i} f_i(x[n], u[n]) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_i \partial x_j} f_i(x[n], u[n]) f_j(x[n], u[n]) \right\} = 0. \quad (3)$$

Если принять, что управление  $u[n]$  не имеет ограничений, то выражение (3) приобретает минимум в точке, где производная равняется нулю, то есть

$$2c_0 u[n] + \sum_{i=1}^k \frac{\partial S(x)}{\partial x_i} \frac{\partial f_i(x[n], u[n])}{\partial u} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_i \partial x_j} \frac{\partial [f_i(x[n], u[n]) f_j(x[n], u[n])]}{\partial u} = 0. \quad (4)$$

Если оптимальное управление принадлежит множеству  $U$  или ограничения вообще отсутствуют, то уравнение (3) можно представить как совокупность уравнений в частных производных

$$\begin{cases} f_0(x[n], u[n]) + \sum_{i=1}^k \frac{\partial S(x)}{\partial x_i} f_i(x[n], u[n]) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_i \partial x_j} f_i(x[n], u[n]) f_j(x[n], u[n]) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial u_k} \left[ f_0(x[n], u[n]) + \sum_{i=1}^k \frac{\partial S(x)}{\partial x_i} f_i(x[n], u[n]) + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_i \partial x_j} f_i(x[n], u[n]) f_j(x[n], u[n]) \right] = 0. \end{cases} \quad (5)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $k = 1, 2, \dots, m$ .

Для решения задачи оптимального управления, необходимо решить систему (5) с  $(m+1)$  уравнением в частных производных [4].

Передающая функция объекта управления имеет вид:

$$W(p) = \frac{K}{p(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)} = \frac{\rho_{\text{сн}}(t)}{Q_{\text{фл}}(t)} = \frac{y}{u}, \quad (6)$$

где  $\rho_{\text{сн}}(t)$  – содержание твердой фазы в сливе (выход  $y$ );  $Q_{\text{фл}}(t)$  – расход флюкуланта (вход  $u$ );  $p$  – оператор дифференцирования.

Параметры передаточной функции:

- $K$  – коэффициент передачи = 0,35;
- $T_1$  – постоянная времени = 0,4;
- $\xi$  – коэффициент колебаний = 1,625.

Уравнение динамики объекта:

Синтез оптимального цифрового регулятора для объекта, описываемого уравнениями (1) выполнен согласно методике, приведенной у В. Г. Шаруды [10], при квадратичном критерии оптимальности:

$$J = \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \sum_{i=1}^k c_i x_i^2[n] + c_0 u^2[n] \right], \quad (2)$$

где  $\sum_{i=1}^k c_i x_i^2[n] + c_0 u^2[n] = f_0(x[n], u[n])$ ;

$c_0, c_i$  – весовые коэффициенты.

Дифференциальное уравнение Беллмана:

$$T_1^2 \frac{d^3 y}{dt^3} + 2\xi T_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = Ku \quad (7)$$

запишем в форме Коши, приняв  $x_1 = y$ ;  $x_2 = dx/dt$ ;  $x_3 = d^2 x/dt^2$  [5].

В нашем случае:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = x_3; \\ \frac{dx_3}{dt} = -\frac{1}{T_1^2} x_2 - \frac{2\xi}{T_1} x_3 + \frac{K}{T_1^2} u. \end{cases} \quad (8)$$

Представим математическую модель в виде разностных уравнений [9]. Введем в (8) замену:

$$\frac{d}{dt} x_i \cong \frac{\Delta x_i}{\Delta t} = \frac{x_i(n+1) - x_i(n)}{\Delta t}, \quad (9)$$

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

где  $\Delta t = T_0$  – период квантования.

Данная замена свидетельствует о том, что все переменные  $x_1, \dots, x_n$  в уравнениях (8) мы будем определять только в дискретные моменты времени  $x(nT_0)$  (для компактности будем записывать  $x(n)$ ).

С учетом того, что  $\Delta x_i = x_i(n+1) - x_i(n)$  (9) уравнения (8) в виде разностных уравнений будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} x_1(n+1) = x_2(n); \\ x_2(n+1) = x_3(n); \\ x_3(n+1) = -\frac{1}{T_1^2}x_2(n) - \frac{2\xi}{T_1}x_3(n) + \frac{K}{T_1^2}u(n). \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \min_u \left\{ c_1x_1^2 + c_2x_2^2 + c_3x_3^2 + c_0u^2 + \frac{\partial S(x)}{\partial x_1}(x_2 - x_1) + \frac{\partial S(x)}{\partial x_2}(x_3 - x_2) + \right. \\ \left. + \frac{\partial S(x)}{\partial x_3} \left( -\frac{1}{T_1^2}x_2 - \frac{2\xi}{T_1}x_3 + \frac{K}{T_1^2}u - x_3 + \frac{1}{2} \right) + \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_1^2}(x_2 - x_1)^2 + \frac{\partial S(x)}{\partial x_1 \partial x_2} \cdot (x_2 - x_1)(x_3 - x_2) + \right. \\ \left. + \frac{\partial S(x)}{\partial x_1 \partial x_3} (x_2 - x_1) \cdot \left( -\frac{1}{T_1^2}x_2 - \frac{2\xi}{T_1}x_3 + \frac{K}{T_1^2}u - x_3 \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_2^2} \cdot (x_3 - x_2)^2 + \right. \\ \left. + \frac{\partial S(x)}{\partial x_2 \partial x_3} (x_3 - x_2) \left( -\frac{1}{T_1^2}x_2 - \frac{2\xi}{T_1}x_3 + \frac{K}{T_1^2}u - x_3 \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_3^2} \left( -\frac{1}{T_1^2}x_2 - \frac{2\xi}{T_1}x_3 + \frac{K}{T_1^2}u - x_3 \right)^2 \right\} = 0. \quad (12) \end{aligned}$$

Определим условия минимума для выражения (12), т. е. приравняем производную по  $u$  к нулю:

$$2c_0u + \left[ \frac{\partial S(x)}{\partial x_3} + \frac{\partial S(x)}{\partial x_1 \partial x_3}(x_2 - x_1) + \frac{\partial S(x)}{\partial x_2 \partial x_3}(x_3 - x_2) + \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_3^2} \left( -\frac{1}{T_1^2}x_2 - \frac{2\xi}{T_1}x_3 + \frac{K}{T_1^2}u - x_3 \right) \right] \frac{K}{T_1^2} = 0. \quad (13)$$

Откуда

$$u = - \left[ \frac{\partial S(x)}{\partial x_3} + \frac{\partial S(x)}{\partial x_1 \partial x_3}(x_2 - x_1) + \frac{\partial S(x)}{\partial x_2 \partial x_3}(x_3 - x_2) + \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_3^2} \left( -\frac{1}{T_1^2}x_2 - \frac{2\xi}{T_1}x_3 - x_3 \right) \right] \cdot \frac{\frac{K}{T_1^2}}{2c_0 + \frac{K}{T_1^4} \frac{\partial^2 S(x)}{\partial x_3^2}}. \quad (14)$$

Подставив найденное значение (14) в (12), получаем уравнение для определения оптимального управления, решение которого находят в виде квадратичной формы от переменных состояния системы:

$$S = \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^n m_{kr} x_k x_r. \quad (15)$$

Запишем функцию  $S$  при  $m_{kr} = m_{rk}$  в квадратичной форме

Используем квадратичную форму функционала качества [8]

$$J = \sum_{n=0}^{\infty} c_1x_1^2(n) + c_2x_2^2(n) + c_3x_3^2(n) + c_0u^2(n). \quad (11)$$

Весовые коэффициенты  $c_0, c_i$  функционала (11) определяем, исходя из максимально допустимых значений переменных состояния системы и управляющих воздействий во время переходного процесса [1]:

$$c_i = \left( \frac{1}{x_{i\max}} \right)^2, c_0 = \left( \frac{1}{u_{\max}} \right)^2.$$

Таким образом, для нашего случая дифференциальное уравнение Беллмана (3) будет иметь вид:

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

$$S(x_1, x_2, x_3) = m_{11}x_1^2 + m_{21}x_1x_2 + m_{31}x_1x_3 + m_{12}x_1x_2 + m_{22}x_2^2 + m_{32}x_2x_3 + m_{13}x_1x_3 + \\ + m_{23}x_2x_3 + m_{33}x_3^2 = m_{11}x_1^2 + m_{22}x_2^2 + m_{33}x_3^2 + 2(m_{12}x_1x_2 + m_{13}x_1x_3 + m_{23}x_2x_3). \quad (16)$$

Частные производные функции  $S$  имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial S}{\partial x_1} = 2(m_{11}x_1 + m_{12}x_2 + m_{13}x_3); \\ \frac{\partial S}{\partial x_2} = 2(m_{12}x_1 + m_{22}x_2 + m_{23}x_3); \\ \frac{\partial S}{\partial x_3} = 2(m_{13}x_1 + m_{23}x_2 + m_{33}x_3); \\ \frac{\partial S}{\partial x_1x_2} = 2m_{12}; \\ \frac{\partial S}{\partial x_1x_3} = 2m_{13}; \\ \frac{\partial S}{\partial x_2x_3} = 2m_{23}; \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x_1^2} = 2m_{11}; \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x_2^2} = 2m_{22}; \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x_3^2} = 2m_{33}. \end{array} \right. \quad (17)$$

Подставив частные производные (17) в (3), получим квадратичную форму переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Выражение (3) будет тождественно равняться нулю при условии, что все его коэффициенты равны нулю. Поэтому, приравняв нулю совокупность коэффициентов при произведениях  $x_k x_i$  и учтя, что  $x_k x_i = x_i x_k$ , получим систему из  $n(n+1)/2$  алгебраических уравнений для определения коэффициентов  $m_{ik}$  (алгебраические уравнения *Риккати*):

- для  $x_1^2$

$$\frac{[-K^2 m_{11} + c_1 K^2] m_{33} + c_0 T_1^4 c_1 - c_0 T_1^4 m_{11}}{c_0 T_1^4 + K^2 m_{33}} = 0;$$

- для  $x_2^2$

$$\frac{[-K^2 m_{22} + K^2 m_{11} + c_2 K^2 + c_0] m_{33} - c_0 T_1^4 m_{22} - 2c_0 T_1^2 m_{13} + c_0 T_1^4 c_2 + c_0 T_1^4 m_{11} - K^2 m_{13}^2 -}{c_0 T_1^4 + K^2 m_{33}} \frac{-2c_0 T_1^2 m_{13} + c_0 T_1^4 c_2 + c_0 T_1^4 m_{11} - K^2 m_{13}^2}{c_0 T_1^4 + K^2 m_{33}} = 0;$$

- для  $x_3^2$

$$\frac{[-K^2 m_{33} + c_3 K^2 + 4c_0 T_1^2 \xi^2 + K^2 m_{22} - c_0 T_1^4] m_{33} - K^2 m_{23}^2 - 4c_0 T_1^3 \xi m_{23} + c_0 c_3 T_1^4 + c_0 T_1^4 m_{22}}{c_0 T_1^4 + K^2 m_{33}} = 0;$$

- для  $x_1 x_2$

$$\frac{-2m_{12}(K^2 m_{33} + c_0 T_1^4)}{c_0 T_1^4 + K^2 m_{33}} = 0;$$

- для  $x_1 x_3$

$$\frac{-2m_{13}(K^2 m_{33} + c_0 T_1^4)}{c_0 T_1^4 + K^2 m_{33}} = 0;$$

- для  $x_2 x_3$

$$\frac{2[m_{33}(K^2 m_{12} - K^2 m_{23} + 2c_0 T_1 \xi) - m_{23}(c_0 T_1^2 + c_0 T_1^4 + K^2 m_{13}) + c_0 T_1^4 m_{12} - 2c_0 T_1^3 \xi m_{13}]}{c_0 T_1^4 + K^2 m_{33}} = 0.$$

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Решив данную систему, получим следующие значения для  $m_{ik}$ :

$$\begin{cases} m_{11} = 1; \\ m_{12} = 0; \\ m_{13} = 0; \\ m_{22} = 0,762; \\ m_{23} = -0,196; \\ m_{33} = -0,028. \end{cases}$$

Одной из задач при составлении дискретной модели объекта управления заключается в выборе оптимального периода квантования  $T_0$  [12]. Необоснованное уменьшение периода квантования при управлении процессом приводит к неэффективному использованию машинного времени, что сказывается на быстродействии [11]. Увеличение приводит к снижению точности регулирования в виду неполной информации о процессе.

Выбор допустимого периода дискретизации выполнен по критерию обеспечения требуемой точности управления [6]. Величина неопределенности выходной координаты объекта ( $\rho_{cl}(t) = y(t)$ ) в момент  $nT_0$  определяется разностью  $\psi(t)$ :

$$\psi(t) = y(t) - y[nT_0], \quad nT_0 < t < (n+1)T_0.$$

Область неопределенности ограничивается постоянной величиной  $\varepsilon$ , которая определяет точность регулирования  $|\psi(t)| \leq \varepsilon$ . Для вычисления допустимого периода дискретизации воспользуемся ограничением, согласно которому:

$$T_0 \leq \frac{\varepsilon}{B_{\max}}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon$  – абсолютная погрешность выходной координаты  $y(t)$  (0,01–0,05);  $B_{\max}$  – максимальное значение В-характеристики.

При подаче на вход системы гармонического сигнала  $u(t) = \sin(\omega t)$  на выходе системы получим:

$$y(t) = A(\omega) \sin(\omega t + \phi),$$

где  $A(\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика объекта.

Продифференцировав  $y(t)$ , получим скорость изменения его во времени:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \omega A(\omega) \cos(\omega t + \phi).$$

Амплитуда скорости выходного сигнала равна:

$$\left| \frac{dy(t)}{dt} \right|_{\max} = \omega A(\omega) = B(\omega). \quad (19)$$

Для объекта управления АФЧХ имеет вид:

$$A(\omega) = \frac{K}{\omega \sqrt{(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + (2\xi T_1 \omega)^2}}.$$

В соответствии с (19) получим:

$$B(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + (2\xi T_1 \omega)^2}}.$$

Определим максимальное значение В-характеристики, приравняв производную функции  $B(\omega)$  к нулю:

$$B_{\max} = K.$$

Изменение во времени скорости  $\frac{dy(t)}{dt}$  и значение амплитуды скорости  $B(\omega)$  выходного сигнала ( $\omega = 2$ ,  $\phi = 0$ ), при входном воздействии  $u(t) = \sin(\omega t)$ , показано на рис. 1.

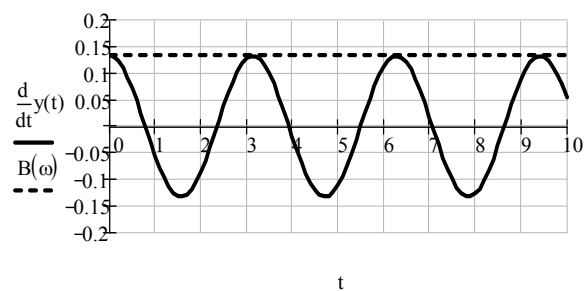


Рис. 1. Изменения выходного сигнала при гармоническом воздействии на входе

Таким образом, если изменять входную частоту  $\omega$ , можно построить зависимость максимальных скоростей выходной переменной от  $\omega$ . В результате на графике ( $B$ -характеристике) можно определить верхнюю границу возможных или ожидаемых скоростей на выходе объекта (рис. 2).

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

Допустимое значение периода квантования (при  $\varepsilon = 0,04$ )  $T_0 \leq 0,114$ . Согласно расчетам принимаем период квантования  $T_0 = 0,1$  с.

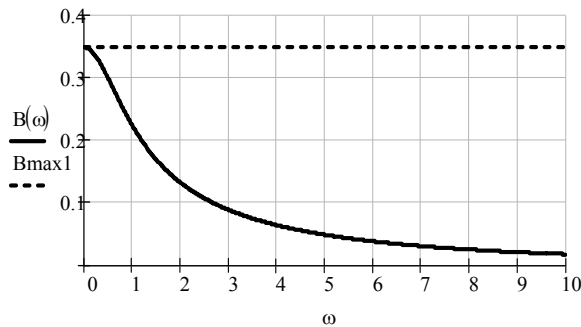


Рис. 2. График изменения В-характеристики от частоты

Результат моделирования работы САУ дозирования флокулянта приведен на рис. 3 [3].

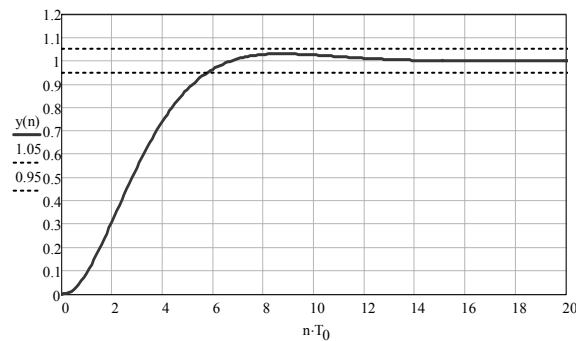


Рис. 3. Переходная функция САУ дозированием флокулянта:  $y(n)$  – содержание твердой фазы в сливе

### Практическая значимость

Выполнен синтез оптимального цифрового регулятора с квадратичным критерием качества, который, в отличие от существующих систем, обеспечивает минимизацию отклонения дозирования флокулянта за счет введения обратной связи. Это позволяет получить требуемое качество переходного процесса с характеристиками: величина перерегулирования составляет  $\sigma = 3,5$  %, время переходного процесса  $t_p = 5,6$  с, переходный процесс аperiodический, регулирование астатическое.

### Выводы

Использование принципов оптимального управления обеспечивает наилучшее качество регулирования при учете всех ограничений. Рассчитанный оптимальный период дискретизации

позволяет добиться требуемой точности регулирования без потери информации о процессе.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зубов, Д. А. Автоматичне керування технологічними процесами вуглебагачувальної фабрики : монографія / Д. А. Зубов. – Луганськ : Вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля, 2003. – 172 с.
2. Макаров, Е. Г. Инженерные расчеты в MftHcad / Е. Г. Макаров. – СПб. : Питер, 2010. – 448 с.
3. Олссон, Густав. Цифровые системы автоматизации и управления / Густав Олссон, Джангуидо Пиани. – СПб. : Невский диалект, 2001. – 557 с.
4. Пелех, Р. Я. Двосторонні обчислювальні схеми розв'язування нелінійних диференціальних рівнянь з оцінкою головного члена похибки / Р. Я. Пелех, Й. Й. Лучко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39. – С. 123–125.
5. Пелех, Я. М. Методи високого порядку точності розв'язування задачі Коші для нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь Вольтера / Я. М. Пелех // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 39. – С. 126–130.
6. Письменский, А. В. Определение допустимого периода дискретизации для представления параметрической модели радиального сгустителя шламовых вод в пространстве состояний / А. В. Письменский, В. А. Ульшин // Пр. Луган. від-ня Міжнар. Акад. інформатизації. – 2002. – № 1 – С. 41–45.
7. Полулях, О. Д. Технологічні регламенти вуглебагачувальних фабрик : [довідково-інформаційний посібник] / О. Д. Полулях. – Д. : Нац. гірничий ун-т, 2002. – 856 с.
8. Поляков, К. Ю. Основы теории цифровых систем управления / К. Ю. Поляков. – СПб. : Питер, 2006. – 161 с.
9. Романенко, В. Д. Методи автоматизації прогресивних технологій / В. Д. Романенко. – К. : Вища шк., 1995. – 519 с.
10. Шаруда, В. Г. Практикум з теорії автоматичного управління : [навчальний посібник] / В. Г. Шаруда. – Д. : Нац. гірн. акад. України, 2002. – 414 с.
11. Famularo, D. A global optimization technique for fixed-order control design / D. Famularo, P. Pugliese, Ya. D. Sergeyev // International Journal of Systems Science. – 2004. – Vol. 35 (7) – P. 425–434.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

12. Grachov, O. Enrichability curves analysis of several coals mixture / O. Grachov // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lugansk, 2012. – Vol. 12. – № 4. – P. 64–70.
13. Seborg, Dale E. Process Dynamics and Control / Dale E. Seborg, Duncan A. Mellichamp, Thomas F. Edgar, Francis J. Doyle. – 3<sup>rd</sup> Edition. – New York : John Wiley & Sons, 2010. – 528 p.

О. В. ПИСЬМЕНСЬКИЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Системна інженерія», Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, кв. Молодіжний, 20 а, 91034, Луганськ, Україна, тел. +38 (0642) 47 14 44, e-mail uni@snu.edu.ua

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДОЗУВАННЯ ФЛОКУЛЯНТІВ

**Мета.** Завданням автоматичного управління процесами згущення шламових вод і освітлення відходів флотатії є стабілізація щільності згущеного продукту в заданому діапазоні і підтримка змісту твердої фази в зливі не вище допустимого рівня при мінімальній витраті флокулянту. В існуючих системах автоматичного управління дозування флокулянту здійснюється за змістом твердої фази на вході апарату (принцип розімкнутого управління). Це веде до його перевитрати і до збільшення дисперсії щільності зливу. Для мінімізації відхилень від заданого значення і забезпечення заданої якості перехідного процесу потрібно виконати синтез оптимального цифрового регулятора. Величина перерегулювання не повинна перевищувати 5 %. Виконати моделювання роботи системи для визначення якості перехідних процесів. **Методика.** Синтез оптимального цифрового регулятора виконаний на основі методу динамічного програмування. **Результати.** Математична модель об'єкта управління представлена в нормальній формі Коші і далі у вигляді різницьових рівнянь. Розраховано оптимальний період квантування як функція від заданої похибки регулювання та швидкості зміни вихідної координати. Отримано диференціальне рівняння Беллмана і визначено умову досягнення мінімуму функціонала якості. Функція Беллмана представлена у вигляді квадратичної форми від змінних стану системи. Для обмеження можливого управління розраховані вагові коефіцієнти функціонала виходячи з максимально допустимих значень змінних стану системи і керуючих впливів під час перехідного процесу. **Практична значимість.** Модулюванням роботи САУ дозування флокулянта встановлено, що величина перерегулювання складає 3,5 %, час перехідного процесу 5,6 с, перехідний процес аперіодичний, регулювання астатичне, що відповідає вимогам, що до САУ.

**Ключові слова:** флокулянт; оптимальний цифровий регулятор; період квантування; динамічне програмування; диференціальне рівняння Беллмана; алгебраїчне рівняння Ріккати; нормальна форма Коші

A. V. PISMENSKIY<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Systems Engineering», East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl, Molodizhnyi Quarter, 20 a, 91034, Luhansk, Ukraine, tel. +38 (0642) 47 14 44, e-mail uni@snu.edu.ua

## SYNTHESIS OF OPTIMAL DIGITAL CONTROLLER OF FLOCCULANT DOSING

**Purpose.** The task of automatic process control of the slime water thickening and flotation tailings clarification is the stabilization of thicken product density within the given range and keeping up the solids content in the overflow not above the permissible level with minimum use of the flocculants. In existing systems for automatic control the flocculant dosing is carried out according to the solids content in the device input (the principle of open-loop control). This leads to the excess consumption of the flocculants and increase the dispersion density of the overflow. To perform the synthesis of the optimal digital controller in order to minimize the deviations from the master control and ensure the specified quality of the transition process. Over controlling value should not exceed 5 %. To perform the system operation modeling in order to determine the quality of transient processes. **Methodology.** Synthesis of the optimal digital controller is based on the method of dynamic programming. **Findings.** A mathematical model of the object control is represented in the normal form of Cauchy and further in the form of differential equations. The optimum period of quantization as the function from specified error of control and the output coordinate change is

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

calculated. The differential equation of Bellman is obtained and the condition for minimization of the quality functional. Bellman function is represented as a quadratic form from the variables of the system condition. In order to limit possible control, the weight coefficients of the functional are calculated based on maximum permitted values of the system condition variables and the control actions during the transient process. **Practical value.** Using the modeling of ACS of the flocculant dosing it was established that the over controlling amount is 3.5 %, the transient process life 5.6 sec, the transient process is aperiodical, non-static control, which meets the requirements imposed on the ACS.

**Keywords:** flocculant; the optimal digital controller; the quantization period; dynamic programming; Bellman differential equation; the algebraic Riccati equation; the normal form of Cauchy

## REFERENCES

1. Zubov D.A. *Avtomatychne keruvannia tekhnolohichnymi protsesamy vuhlezbahachuvalnoi fabryky* [Automatic control by the process of coal preparation plants]. Luhansk, Vyd-vo Skhidnoukr. nats. un-tu im. V. Dalia Publ., 2003. 172 p.
2. Makarov Ye.G. *Inzhenernyye raschety v Mfthcad* [Engineering calculations in Mfthcad]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2010. 448 p.
3. Olsson Gustav, Piani Dzhanguido. *Tsifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya* [Digital automation and control systems]. Saint Petersburg, Nevskiy dialect Publ., 2001. 557 p.
4. Pelekh R.Ya., Luchko Y.Y. Dvostoronni obchysliuvalni skhemy rozviazuvannia neliniinykh dyferentsialnykh rivnians z otsinkoiu holovnoho chlena pokhybky [Bilateral computational schemes for solving nonlinear differential equations with principal term evaluation of error]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 39, pp. 123-125.
5. Pelekh Ya.M. Metody vysokoho poriadku tochnosti rozviazuvannia zadachi Koshi dlia neliniinykh intehro-dyferentsialnykh rivnians Voltera [The methods of high order of accuracy for solving the Cauchy problem for nonlinear integro-differential equations Voltaire]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 39, pp. 126-130.
6. Pismenskiy A.V., Ulshin V.A. Opredeleniye dopustimogo perioda diskretizatsii dlya predstavleniya parametricheskoy modeli radialnogo sgustitelya shlamovykh vod v prostranstve sostoyaniy [Permissible period determination of discretization for the presentation of parametric model of radial thickener of slime water states space]. *Pratsi Luhanskoho viddilennia Mizhnarodnoi Akademii informatyzatsii – Proceedings of Lugansk Department of International Academy of Informatization*, 2002, no. 1, pp. 41-45.
7. Poluliakh O.D. Tekhnolohichni rehlementy vuhlezbahachuvalnykh fabryk [Process regulations of the coal preparation plants]. Dnipropetrovsk, Natsionalnyi hirnychiy universytet Publ., 2002. 856 p.
8. Polyakov K.Yu. *Osnovy teorii tsifrovyykh sistem upravleniya* [The basic theory of digital control systems]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2006. 161 p.
9. Romanenko V.D. *Metody avtomatyzatsii prohresyvnnykh tekhnolohii* [Methods of automatization of advanced technologies]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 1995. 519 p.
10. Sharuda V.H. *Praktykum z teorii avtomatychnoho upravlinnia* [Practical on automatic control theory]. Dnipropetrovsk, Natsionalna hirnycha akademiia Ukrainy Publ., 2002. 414 p.
11. Famularo D., Pugliese P., Sergeyev Ya.D. A global optimization technique for fixed-order control design. *International Journal of Systems Science*, 2004, vol. 35 (7), pp. 425-434.
12. Grachov O. Enrichability curves analysis of several coals mixture. TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture, 2012, vol. 12, no. 4, pp. 64-70.
13. Dale E. Seborg., Duncan A. Mellichamp, Thomas F. Edgar, Francis J. Doyle. *Process Dynamics and Control*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2010. 528 p.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. А. Ульшиным (Украина); д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Украина)

Поступила в редколлегию 28.03.2013

Принята к печати 14.06.2013

UDC [629.46.027.5:625.1.033.373]:519.87

L. A. MANASHKIN<sup>2</sup>, S. V. MYAMLIN<sup>1\*</sup><sup>2</sup>Faculty “Mechanical Engineering”, New Jersey University of Technology, New Jersey, USA<sup>1\*</sup>Vice-rector, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (056) 776 84 98, e-mail sergeymyamin@gmail.com

## TO THE QUESTION OF MODELING OF WHEELS AND RAILS WEAR PROCESSES

**Purpose.** There is a need of wear process modeling in the wheel-rail system. This is related to the fact that the wear processes in this system are absolutely different in the initial and final stages. The profile change of rail and, especially, of the wheels caused by the wear significantly affects the rolling stock dynamics, traffic safety and the resource of the wheels and rails. Wear modeling and the traffic safety evaluation requires the accounting of the low frequency component forces (including the modeling of transitional areas) affecting the wheel on the side of the rail and carriage in motion of rolling stock, so the statistical analysis is not possible. **Methodology.** The method of mathematical modeling of the wheel set and the rail interaction was used during the research conducting. **Findings.** As a result of the modeling of the wheel set motion on the rail track, the mathematic model with 19 freedom degrees was obtained. This model takes into account the axle torque and studies wheels constructions as the components of the mechanical systems, consisting of a hub and tire. **Originality.** The mathematic model allows evaluating the wear degree of the wheels and rails when using on the rolling stock not only all-metal wheel sets, but also compound ones with the use of spring wheels and independent rotation of semi-axes with the wheels. **Practical value.** The development of the improved mathematical model of freight car wheel set motion with differential rotation of the wheels and compound axles allows studying the wear processes of wheels and rails.

*Keywords:* wear; modeling; traffic safety; wheel set oscillations; rolling stock dynamics

### Introduction

The most common existing models of railway vehicle oscillations are maladapted to solving the problems related to the wear of railway wheels and tracks and to the forming of traction and braking forces. These models describe in detail the movement of vehicle body and bogies, perturbed by kinematic assignment of the wheels and rails irregularities or by wheel center accelerations [1, 12, 15]. Such models allow considering the low-frequency region of the oscillation spectrum on the sufficiently long track section and the influence of the bogie constructive parameters on the car body oscillations. In this case the high-frequency components of the wheels and rails oscillation spectrum are out of consideration. One should pay a tribute that these problems are reflected in investigation of the noises occurring in the motion of vehicle [13], but not in investigation of the wear of these important system elements. In these cases, we think it would be correct to describe in detail oscillations in the system "wheel set-rails" (hereinafter referred to as – ws-r) caused by their irregularities at the given comparatively low frequency dynamic forces into the points of the wheel centers. These forces

affect the ws-r on the side of the bogie elements due to the oscillations of the bogie and body of the vehicle. Previously various authors studied the mathematical model of oscillations of both the rail vehicle in general and its separate elements [2, 6, 7, 8, 9]. However, Professor De Pater [5] analyzed the wheel set movement including and excluding the rail tracks irregularities, although in simplified form.

### Purpose

Thus, nowadays, there is a need of wear process modeling in the wheel-rail system. This is related to the fact that the wear processes in this system are absolutely different in the initial and final stages. The profile change of rail and, especially, of the wheels caused by the wear significantly affects the rolling stock dynamics, traffic safety and the resource of the wheels and rails. Wear modeling and the traffic safety evaluation requires the accounting of the low frequency component forces (including the modeling of transitional areas) affecting the wheel on the side of the rail and carriage in motion of rolling stock, so the statistical analysis is not possible.

### Methodology

During research the method of mathematical modeling of the wheel set and the track interaction was used. A simple analysis shows that in the case of the wheel motion with a real flat spot of the 20 mm length and the "depth" relative to the thread surface 0.1 mm the duration of the rolling wheel is 1 ms at a speed of 20 m/sec. It corresponds to the move frequency of the contact on the vertical of 0.5 kHz (assuming that the impact duration corresponds to half of the period of sinusoidal oscillation). Acceleration of the contact point in conditions of above mentioned impact interaction equals  $1000 \text{ m/s}^2$ . If the rim, approximate weight of which is 0.21 t. will move with such vertical acceleration, then inertial force of the rim only will equal 210 kN (taking into account that the static loading on the rail is 108 kN).

At the same time, according to the paper [10] natural frequency of the wheel rim rotation "relative to the axle, which is perpendicular to the center line of the wheel" is only 187 Hz, the natural frequency of central displacement of the rim is 340 Hz and the lowest forms of the rim bending – are 366 and 947 Hz. The natural frequencies of the wheel set torsional oscillations with drive elements of electric locomotive of the type E120 equal 16 and 50 Hz [3, 7]. On the other hand, for example, in case of the wheel-rail adhesion break or in case of wheel sliding there appear torsional oscillations of the wheel set with relatively high frequency and the bearing point vibration of the wheel relative to the rail in the longitudinal direction. Considering that on these vibrations can be imposed the vertical forces, which can both unload the contact or load it, then these movements of the wheel and contact can have a substantial role on the movement resistance of the certain wheel set, on the level of traction force being realized by the wheel and on the erosion and wear, including the corrugations of the rails. In the case of excitation of torsional oscillations of wheel set or rims, the frictional force occurring in motion will have the wearing influence on the rail at a frequency twice as much as the frequency of the natural torsional oscillations. Fluctuations of the vertical force will modulate the friction force of the friction oscillations. Owing to this modulation in the friction force spectrum wearing the rail will be the components of a double frequency of wheel set torsional oscillations and of

frequencies, which are equal in the sum and difference of the doubled frequencies of torsional oscillations and the frequencies of vertical force changes of the interaction between wheel and rail. Oscillations with the smallest differences  $\Omega_{min}$  (in Hz) of these frequencies determine maximum length  $\lambda_{max}$  of corrugations in the track section with the given average velocity  $\bar{v}$  of car movement. The wavelength  $\lambda_{max}$  is calculated by the ratio  $\lambda_{max} = \bar{v} / \Omega_{min}$ . Certain rail defects run the mechanism of the wearing oscillations at the given track section, which causes the wearing of rails and all the wheels of train.

On the other hand, during the wheel motion on the tracks occur the surface waves of sufficiently high frequency. These waves occur as a result of unavoidable sliding of the contact patch relative to the rail and vertical interaction forces. The most interesting waves among them are probably the Rayleigh and Love waves [11]. The Rayleigh wave causes the displacement of the rail surface points in horizontal (along the rail) and vertical direction. If the vertical displacement of the rail surface can be neglected because of its smallness, the horizontal displacement, despite of its smallness, has a significant velocity of displacement due to the high frequency of oscillations. This will certainly have an impact on the relative sliding velocity of the wheel contact point relative to the rail, so it will have an impact on the wear of the wheel and the rail surface. If the Rayleigh surface waves occur in the isotropic body, the surface Love waves causing the horizontal displacement of the surface points perpendicular to the direction of motion, occur in bodies with the blanket. This blanket is formed in the rails and on the wheel thread during processing treatment. Oscillations corresponding to the Love waves are also high frequency. They can lead to significant velocity of points displacement in the transverse direction and hence to the wear. Furthermore, in this case the surface curvature of rail bearing and wheel thread can somehow influence integrally the lateral forces and motion resistance, which is an independent task and requires a special consideration.

### Findings

Excitation of the surface waves during the rolling stock motion results in the formation of standing waves in certain track sections, which are lim-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

ited by the clinches or surface defects. In the anti-nodes of displacement velocities the high frequency wheel slides relative to the rails occur. They provoke rapidly changing friction forces and intense wear relative to the other sections of the rails, which in turn leads to the wavelike shortwave rail wear. At this wavelike wear the wavelength should be twice shorter than the length of the standing wave.

Thus, the above-described cases of the wheel set dynamic loading lead to the need of more detailed study of the formation of wheel set fluctuations in the interaction with the rails.

In this paper the movement of the wheel set is generally presented (Figure 1) as a spatial motion in the following manner:

1. The translational motion of the wheel rims relative to the wheel hub.
2. Spatial translational movement of the wheel set axle with the hubs of the wheels and axle boxes.
3. Rotational movement of the wheel set relative to the vertical and longitudinal axes.
4. Rotational (including torsion) motions of the wheels, combined with the half of the axle of the wheel set relative to its axis.
5. Reduced masses of the track defining starting resistance of the track during its high frequency interaction with the wheels.

As a result of modeling of the road wheel pair motion on the track the mathematical model with 19 freedom degrees is obtained. This model allows accounting the axle torsion, as well as studying the wheel design as a complex mechanical systems consisting of a hub and tread.

### Originality and practical value

Parameters of connection of two parts of the wheel set during its rotation around its axle can be defined as the parameters of the wheel set axle torsion. These parameters can be changed with time depending on the boundary conditions of the torsion. The conditions are defined by the wheel slide relative to the track. In case only one wheel is in adhesion with the rail, the parameters correspond to the torsion form of the wheel set with a choked right or left wheel and free opposite wheel. In case both wheels slide, the parameters are chosen on the basis of the torsion form with two free wheels. If there is no sliding on both wheels, the parameters

are chosen on the basis of the torsion form with two choked wheels.

In order to exclude the value gaps of the generalized forces in the moments of changing of the wheel set torsion parameters during the integration of the motion differential equations, the generalized forces are calculated at the each time stage of numerical integration by adding of their change at the stage to the strength value at the previous stage.

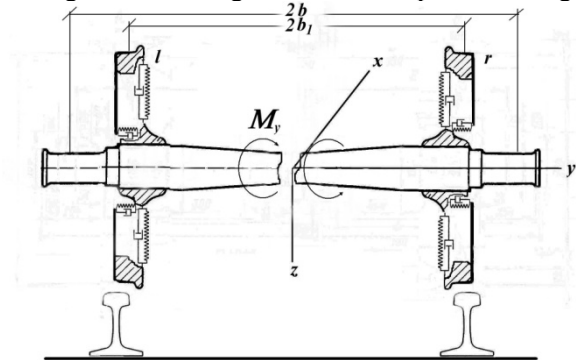


Fig. 1.

It should be noted that the separation of the wheel rims into separate solids in the design scheme of wheel set is described in [1] and in [14] in relation to the locomotives with rubberized wheels. Thus, the presented mathematical model allows evaluating the wear degree of the wheels and rails when using on the rolling stock not only all-metal wheel sets, but also the compound ones with the use of spring wheels and independent rotation of semi-axes with the wheels.

### Conclusions

The feature of the work is research of the similar model in relation to the wheel sets with steel wheels. In the paper [4] the wheel rim displacement relative to their hubs is partially studied. In general, the wheel set movement of the freight car is described by the 19 freedom degrees.

Thus, an improved mathematical model of the freight car wheel set motion is presented. The model allows one to research the wear processes of the wheels and rails.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Автоколебания и устойчивость движения рельсовых экипажей / Ю. В. Дёмин, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко, О. М. Маркова. – К. : Наукова думка, 1984. – 160 с.
2. Бороненко, Ю. П. Разработка тележек грузовых

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

- вагонов с осевой нагрузкой 30 т / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова // Подвижной состав XXI: идеи, требования, проекты. – СПб., 2007. – С. 5–12.
3. Виктор, И. А. Звуковые поверхностные волны в твёрдых телах / И. А. Виктор. – М. : Наука, 1981. – 287 с.
  4. Голубенко, А. Л. Сцепление колеса с рельсом / А. Л. Голубенко. – Киев : ВПОЛ, 1993. – 448 с.
  5. Де Патер, А. Д. Колебания нелинейных механических систем с жесткими ограничителями / А. Д. Де Патер // Тр. междунар. симп. по нелинейным колебаниям. – Т. 3. – К. : АН УССР. – 1963. – С. 326–346.
  6. К вопросу о представлении движения колесной пары в задачах динамики вагонов / Л. А. Манашкин, С. В. Мямлин, В. И. Приходько, В. В. Жижко // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты. – СПб., 2011. – Вып. 6. – С. 45–52.
  7. Мямлин, С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей / С. В. Мямлин. – Д. : Новая идеология, 2002. – 240 с.
  8. Пути совершенствования конструкции тележки грузового вагона / А. А. Босов, С. В. Мямлин, В. Я. Панасенко, И. В. Клименко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 27–32.
  9. Орлова, А. М. Исследование влияния состояния тележек грузовых вагонов на боковой износ гребней колес по результатам математического моделирования и обследования вагонов в эксплуатации / А. М. Орлова, В. С. Лесничий, Е. И. Артамонов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2008. – Вип. 28. – С. 69–75.
  10. Рукавичников, В. А. Исследование собственных частот колебаний железнодорожных колес / В. А. Рукавичников, В. И. Сакало // Динамика, прочность и надежность трансп. машин : сборник науч. тр. – Брянск, 1997. – С. 85–92.
  11. Ушкалов, В. Ф. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В. Ф. Ушкалов. – К. : Наукова думка, 1989. – 240 с.
  12. Beck, H.-P. Aktive Schwingungsdämpfung in Triebachsen mittels selbststellender Zustandsregelung / H.-P. Beck // Elektrische Bahnen. – 1999. – № 12. – P. 393–401.
  13. Claus, H. System Dynamics of Railcars with Radial- and Lateral Elastic Wheels / H. Claus, W. Schiehlen // System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade. – Berlin, 2003. – P. 64–83.
  14. Claus, H. Dynamic Stability and Random Vibrations of Rigid and Elastic Wheelsets / H. Claus, W. Schiehlen // Nonlinear Dynamics. – 2004. – № 36. – P. 299–311.
  15. Engel, B. Verschleißreduzierende Rad-schlupfregelung mit hoher Kraftschlussausnutzung / B. Engel, H. P. Beck, J. Alders // Elektrische Bahnen. – 1998. – № 6. – P. 201–209.
  16. Bahnen. – 1998. – № 6. – P. 201–209.

Л. А. МАНАШКІН<sup>1</sup>, С. В. МЯМЛІН<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Факультет «Машинобудування», Технологічний університет Нью-Джерсі, Нью-Джерсі, США

<sup>2\*</sup>Проректор з наукової роботи, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 776 84 98, ел. пошта sergeymyamin@gmail.com

## ЩОДО ПИТАННЯ ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОСУ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС І РЕЙОК

**Мета.** Існує необхідність моделювання процесу зношування в системі колесо-рейка. Це пов'язано з тим, що процеси зношування в цій системі на початковій та кінцевій стадіях протікають істотно по-різному. Причому зміна профілів рейок і, особливо, коліс, викликана зношуванням, суттєво позначається на динаміці рухомого складу, безпеці руху, ресурсі коліс і рейок. Моделювання зношування і оцінка безпеки руху екіпажу вимагає врахування низькочастотних складових сил (у тому числі при моделюванні перехідних ділянок), що діють на колесо з боку рейки і екіпажу при русі рухомого складу, тому статистичний аналіз неможливий. **Методика.** При виконанні досліджень застосовується метод математичного моделювання взаємодії залізничної колісної пари і рейкового шляху. **Результати.** У результаті виконаного моделювання руху дорожньої колісної пари по рейковому шляху отримано математичну модель з 19-тма ступенями свободи, що дозволяє враховувати кручення осі, а також розглядати конструкції коліс як складових механічних систем, що складаються з ступиці і бандажа. **Наукова новизна.** Представлена математична модель дозволяє оцінювати ступінь зношування коліс і рейок при використанні на рухомому складі не тільки суцільнометалевих колісних пар, а й складових, з використанням підпружинених коліс і незалежним

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

обертанням піввісей з колесами. **Практична значимість.** Створення вдосконаленої математичної моделі руху колісної пари вантажного вагона з диференційованим обертанням коліс і складовими осями дозволяє досліджувати процеси зносу коліс і рейок.

*Ключові слова:* знос; моделювання; безпеку руху; коливання колісної пари; динаміка рухомого складу

Л. А. МАНАШКИН<sup>1</sup>, С. В. МЯМЛИН<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Факультет «Машиностроение», Технологический университет Нью-Джерси, Нью-Джерси, США

<sup>2\*</sup>Проректор по научной работе, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 776 84 98, эл. почта sergeymyamin@gmail.com

## К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС И РЕЛЬСОВ

**Цель.** Существует необходимость моделирования процесса износа в системе колесо-рельс. Это связано с тем, что процессы изнашивания в этой системе на начальной и конечной стадиях протекают существенно по-разному. Причём изменение профилей рельсов и, особенно, колёс, вызванное изнашиванием, существенно сказывается на динамике подвижного состава, безопасности движения, ресурсе колёс и рельсов. Моделирование износа и оценка безопасности движения экипажа требует учёта низкочастотных составляющих сил (в том числе при моделировании переходных участков), действующих на колесо со стороны рельса и экипажа при движении подвижного состава, поэтому статистический анализ невозможен.

**Методика.** При выполнении исследований применяется метод математического моделирования взаимодействия железнодорожной колесной пары и рельсового пути. **Результаты.** В результате выполненного моделирования движения дорожной колесной пары по рельсовому пути получена математическая модель с 19-тью степенями свободы, позволяющая учитывать кручение оси, а также рассматривать конструкции колес, как составных механических систем, состоящих из ступицы и бандажа.

**Научная новизна.** Представленная математическая модель позволяет оценивать степень износа колес и рельсов при использовании на подвижном составе не только цельнометаллических колесных пар, а и составных, с использованием подпружиненных колес и независимым вращением полуосей с колесами.

**Практическая значимость.** Создание усовершенствованной математической модели движения колесной пары грузового вагона с дифференцированным вращением колес и составными осями позволяет исследовать процессы износа колес и рельсов.

*Ключевые слова:* износ; моделирование; безопасность движения; колебания колесной пары; динамика подвижного состава

### REFERENCES

1. Demin Yu.V., Dlugach L.A., Korotenko M.L., Markova O.M. *Avtokolebaniya i ustoychivost dvizheniya relsovykh ekipazhey* [Auto oscillations and motion stability of rail vehicles]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1984. 160 p.
2. Boronenko Yu.P., Orlova A.M. *Razrabotka teleshchek gruzovykh vagonov s osevoy nagruzkoy 30 t* [Development of the freight car bogies axle loading]. *Podvizhnoy sostav XXI: idei, trebovaniya, proekty* [Rolling stock of XXI century: ideas, requirements, projects], 2007. pp. 5-12.
3. Viktorov I.A. *Zvukovyye poverkhnostnyye volny v tverdykh telakh* [Sound and surface waves in the solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 287 p.
4. Golubenko A.L. *Stsepleniye kolea s relsom* [Wheel-rail adhesion]. Kiev, VIPOL Publ., 1993. 448 p.
5. De Pater A.D. *Kolebaniya nelineynykh mekhanicheskikh sistem s zhestkimi ogranichitelyami* [Oscillations of non-linear mechanical systems with hard limiters]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma po nelineynym kolebaniyam* [Proc. of the Int. Symp. on Nonlinear Oscillations]. Kyiv, 1963, vol. 3, pp. 326-346.
6. Manashkin L.A., Myamlin S.V., Prikhodko V.I., Zhizhko V.V. *K voprosu o predstavlenii dvizheniya kolesnoy pary v zadachakh dinamiki vagonov* [On the problem of representation of the wheel set motion in the tasks of car dynamics]. *Podvizhnoy sostav XXI: idei, trebovaniya, proekty* [Rolling stock of XXI century: ideas, requirements, projects], 2011, issue 6, pp. 45-52.
7. Myamlin S.V. *Modelirovaniye dinamiki relsovykh ekipazhey* [Modeling of the railway vehicle dynamics]. Dni-

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ

- propetrovsk, Novaya ideologiya Publ., 2002. 240 p.
8. Bosov A.A., Myamlin S.V., Panasenko V.Ya., Klimenko I.V. Puti sovershenstvovaniya konstruktssii telezhki gruzovogo vagona [Ways of improvement of the freight car bogie construction]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 27-32.
  9. Orlova A.M., Lesnichiy V.S., Artamonov Ye.I. Issledovaniye vliyaniya sostoyaniya telezhek gruzovykh vagonov na bokovoy iznos grebney koles po rezultatam matematicheskogo modelirovaniya i obsledovaniya vagonov v ekspluatatsii [Impact research of condition of the freight car bogies on the wheel flange side wear on the results of mathematical modeling observation of the operated cars], 2008, issue 28, pp. 69-75.
  10. Rukavichnikov V.A., Sakalo V.I. Issledovaniye sobstvennykh chastot kolebaniy zheleznodorozhnykh koles [Natural frequency research of the rail wheels oscillations]. *Dinamika, prochnost i nadezhnost transportnykh mashin* [Dynamics, durability and reliability of the transport vehicles], Bryansk, 1997. pp. 85-92.
  11. Ushkalov V.F. *Matematicheskoye modelirovaniye kolebaniy relsovykh transportnykh sredstv* [Mathematic modeling of the rail vehicles oscillations]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1989. 240 p.
  12. Beck H.-P. Aktive Schwingungsdämpfung in Triebachsen mittels selbsteinstellender Zustandsregelung. *Elektrische Bahnen*, 1999, no. 12, pp. 393-401.
  13. Claus H., Schiehlen W. System Dynamics of Railcars with Radial- and Lateral Elastic Wheels. [System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade], Berlin, 2003, pp. 64-83.
  14. Claus H.W., Schiehlen W. Dynamic Stability and Random Vibrations of Rigid and Elastic Wheelsets. *Nonlinear Dynamics*, 2004, no. 36, pp. 299-311.
  15. Engel, B. Beck, H. P., Alders J. Verschleißreduzierende Rad-schlupfregelung mit hoher Kraftschlussausnutzung. *Elektrische Bahnen*, 1998, no. 6, pp. 201-209.

*Prof. V. L. Gorobets, D. Sc. (Techn.); Prof. O. O. Beygul, D. Sc. (Tech.) is recommended this article to be published*

Received 15.03.2013

Accepted 06.06.2013

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

UDC 629.4.028.86

S. V. MYAMLIN<sup>1\*</sup>, Ya. N. ROMANYUK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Vice-Rector, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel./fax +38 (056) 793 19 03, e-mail sergeymyamin@gmail.com

<sup>2</sup> Planning and Design Engineering Bureau of Automation Control Systems for Railway Transport in Ukraine, Kalinin alley, 4, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

### EVALUATION OF LONGITUDINAL LOADING OF TANK TRAINS DURING MOTION IN LONGITUDINAL CHANGES OF GRADIENT

**Purpose.** To research the tank train longitudinal loading during motion by track sections with changes of gradient. The trains of different length that consist of bogie tank wagons should be examined. Influence of cargo type on longitudinal loading of train during motion in concave section of track should be evaluated. **Methodology.** The level of the largest longitudinal forces was estimated by mathematical simulation. It was assumed that change of gradient is formed by two grades with baffle platforms, length 50 meters, so that the algebraic difference of limiting grades vary from 10 to 40 ‰, pitch 10 ‰. The initial speeds were 40, 60, 80, 100, 120 km/h. For evaluation of the longitudinal loading the regulating braking and motion «by coasting» was considered. For evaluation of buffing loads the entry to the concave gradient change of expanded train is considered, and in order to determine the quasi-static forces the compressed train is considered. **Findings.** As a result of calculations the dependencies of maximal longitudinal forces in the trains on the cargo type, the algebraic difference of the grades, the number of tank wagons, the initial speed, motion modes, and initial gaps condition in the train were obtained. **Originality.** The longitudinal loading of freight cars of different length formed by the similar bogie tank wagons with one locomotive was obtained. The locomotive is placed in the train head during motion in concave track sections with various algebraic difference of the grades «on coasting» and during the regulating braking mode. The obtained results can be used for parameters standardization of profile elevation of the track. **Practical value.** The obtained results show that during operation of tank trains on track sections of complex breakage the most dangerous is regulating braking of preliminary compressed trains during entering on concave parts of track. Level of the greatest buffing and quasi-static longitudinal forces is almost independent of cargo and slightly depends on the initial speed.

**Keywords:** longitudinal forces; mathematical simulation; changes of gradient; tank trains

#### Introduction

With increasing masses and especially lengths of trains the values of longitudinal forces affecting cars and weights they transport, and their accelerations as well acquire a considerable growth. These forces reach their maximum values in cases of transient or unstable modes of motion when, in general, multi-mass considerably non-linear mechanic system «train» transfers during short time intervals from one state into another [1, 3, 6, 8, 9, 11, 13].

Particular attention should be paid to the traffic of freight trains consisting of tank cars on changes of gradient that can lead to the origin of such longitudinal forces, which can affect the safety of railway traffic in general. As it is known, the maximal longitudinal compressing forces appear at the entering of extended tank train on concave part of track and the maximal extending forces appear at the entering of compressed tank train on convex track profile [1, 6, 9].

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Purpose**

As it is shown in the paper [1] you can analyze only one of two tasks on the train movement in concave and convex track sections, because the results of solving received in both cases are the same, the only difference is sign (negative). The same work shows that in statistically inhomogeneous train the maximum expected values of forces exceed the corresponding values of forces in homogeneous train (with the same mass) no more than on 20 %. That is why the entry of extended homogeneous train on concave changes of gradient is being analyzed below for estimation of buffing loadings and the entry of compressed train – for determination of quasi-static forces.

It is also interesting to analyze influence of cargo types on longitudinal forces at motion by changes of gradient during research of longitudinal dynamic of tank trains.

**Methodology**

During estimation of longitudinal loading the train that consists of 80 bogie tank wagons with mass 84 t with one locomotive VL-8 in the head was analyzed. Mass of tank wagon was chosen in such manner, so that the volume of transported liquid does not exceed the usable storage of tank shell. During mathematical simulation it was assumed that tank wagons were filled with diesel fuel or carbamide-ammoniac blend (CAB) with density accordingly  $\rho = 0.85 \text{ t/m}^3$  and  $\rho = 1.31 \text{ t/m}^3$ . Since, the volume of liquid underfill depends on its density the level of liquid free surface from the top inner surface of tank shell is located on distance 0.11 m for diesel fuel and on 1.17 m for carbamide-ammoniac blend [4, 8].

Solving the task of estimation of maximal longitudinal forces it was assumed that tank wagons were equipped by air distributors with arbitrary no. 483 turned on medium mode and composition brake shoes and the inter-car connections were equipped by elastic-friction draft gear Sh-1-TM [5, 7].

For estimation of longitudinal loading of trains the motion «by coasting» and regulating braking by II stage were analyzed.

It was assumed that change of gradient is formed by two grades with baffle platforms, length 50 meters so that the algebraic difference of limit-

ing grades vary from 10 to 40 ‰, pitch 10 ‰. The initial speeds of motion were  $V_0 = 40, 60, 80, 100, 120 \text{ km/h}$ .

Estimation of longitudinal forces was made by numerical integration of nonlinear differential equations of train motion [8].

**Findings**

Below on the Figures 1 and 2 are illustrated the dependencies of maximal buffing longitudinal forces on values of grades difference during motion «by coasting» and during regulating braking by II stage accordingly. The given graphs are obtained during simulation of train movement with initial speed  $V_0 = 80 \text{ km/h}$ .

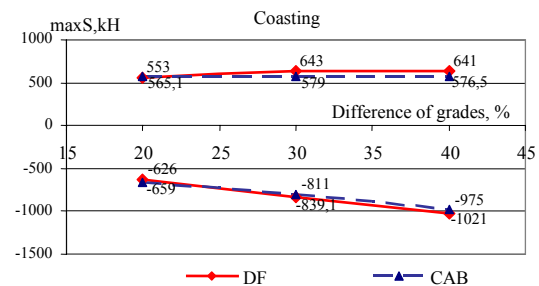


Fig. 1. Dependence of maximal buffing longitudinal forces on value of grade difference during motion «by coasting»

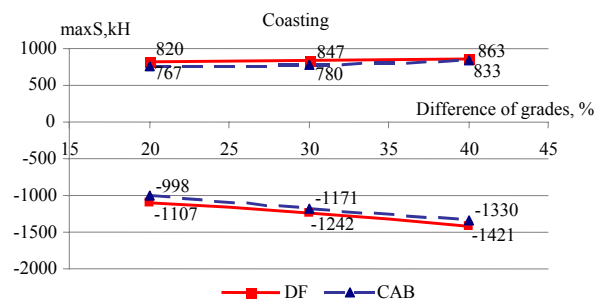


Fig. 2. Dependence of maximal buffing longitudinal forces on value of grade difference during regulating braking by II stage

On the presented Figures the full lines correspond to the tanks filled with diesel fuel and the dashed lines – to the tanks with CAB.

As we can see from the Figures 1 and 2 the maximal buffing longitudinal forces grow with increase of algebraic difference of grades and during both the motion «by coasting» and during regulating braking by II stage. The level of maximal lon-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

itudinal forces during for different types of cargo (diesel fuel and carbamide-ammoniac blend) differed less by 10 %.

As a comparison, the similar motion modes («by coasting» and regulating braking by II stage) for train consisting of 80 open cars during entering on concave track section were simulated. The ini-

tial speed of motion was 80 km/h.

In the Table 1 are listed the maximal buffing extending and compressing forces for analyzed motion modes and different algebraic difference of grades.

Table 1

**Maximal values of buffing compressing and -extending forces (in kN) in trains consisting of tank wagons and open cars for different algebraic difference of gradient changes during motion «by coasting» and regulating braking by II stage with initial speed 80 km/h**

| Algebraic difference of gradient changes, ‰ | Coasting    |       |           | Braking by II stage |       |           |
|---------------------------------------------|-------------|-------|-----------|---------------------|-------|-----------|
|                                             | Tank wagons |       | Open cars | Tank wagons         |       | Open cars |
|                                             | DF          | CAB   |           | DF                  | CAB   |           |
| 20                                          | 553         | 565   | 90        | 820                 | 767   | 90        |
|                                             | -626        | -659  | -748      | -1107               | -998  | -1295     |
| 30                                          | 643         | 579   | 150       | 847                 | 780   | 135       |
|                                             | -839        | -811  | -897      | -1242               | -1171 | -1425     |
| 40                                          | 641         | 576.5 | 180       | 863                 | 833   | 180       |
|                                             | -1021       | -975  | -1035     | -1421               | -1330 | -1515     |

As we can see from the results listed in the Table 1, the level of maximal compressing forces in train consisting of open cars is higher than similar values in the train consisting of tank wagons only.

It should be noted that during freighting of cargo with higher density (CAB) the level of compressing forces was somewhat lower.

It is caused by the fact that with the same mass of car the level of underfill is different.

As was mentioned above the level of maximal compressing forces depends on mass of stationary liquid that is determined by density of transported cargo [4, 6, 9].

Value of stationary mass for diesel fuel is 44.93 tons and for CAB is 39.51 tons. That is why the level of longitudinal loading for tank wagons with carbamide-ammoniac blend was the lowest and for the open cars (all cargo of which is considered as the stationary one) – was the highest.

The moving part of liquid affects the level of maximal extending forces that is why this value in trains consisting of tank wagons exceeds the same values for trains consisting of open cars.

The dependencies of maximal buffing longitudinal forces for different modes of motion during freighting of diesel fuel and carbamide-ammoniac blend in tank wagons are illustrated on Figures 3 and 4.

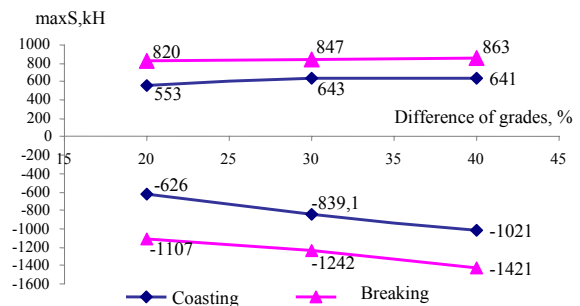


Fig. 3. Dependence of maximal buffing longitudinal forces on value of grade difference during the diesel fuel freighting

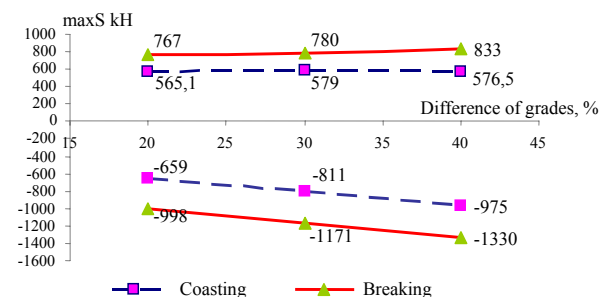


Fig. 4. Dependence of maximal buffing longitudinal forces on value of grade difference during the CAB freighting

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

On the foregoing Figures the dashed lines resulted from the simulation of train motion «by coasting» and the full lines from the regulating braking simulation.

Solving task of regulating braking of initially extended and compressed trains during entering on the concave track section it was assumed that the start of braking happens at the moment of train entering on baffle platform with length 50 meters.

As expected, the longitudinal loading during the regulating braking was considerably higher than that during motion «by coasting»

The graphs of maximal buffing forces behavior in the train consisting of tank wagons (during freighting of CAB) depending on initial speed during motion «by coasting» on concave track section with different algebraic difference of gradient changes are shown on Figures 5 and 6. The maximal buffing extending forces are shown on Figure 5 and the compressing forces – on Figure 6. On the above mentioned graphs the lines 1 correspond to the algebraic difference grades difference  $\Delta i = 10 \text{ ‰}$ , the lines 2 –  $\Delta i = 20 \text{ ‰}$ , the lines 3 –  $\Delta i = 30 \text{ ‰}$ , the lines 4 –  $\Delta i = 40 \text{ ‰}$ .

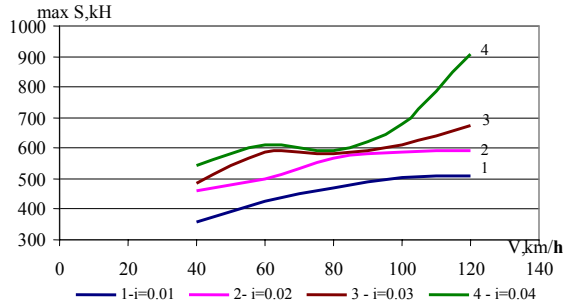


Fig. 5. Dependence of maximal buffing extending longitudinal forces on the initial speed during motion «by coasting» and CAB freighting

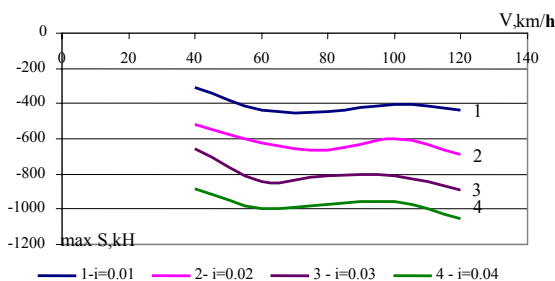


Fig. 6. Dependence of maximal buffing compressing longitudinal forces on the initial speed during motion «by coasting» and CAB freighting

As one can see from the Figures 5-6, as a rule, the level of maximal buffing longitudinal forces grows with the speed increasing. However in the range of initial speed  $V_0$  the maximal compressing forces slightly decrease. It is caused by the fact that the longitudinal loading forming in the trains consisting of tanks depends on the moving liquid oscillation.

In case the liquid oscillations in two neighboring tank wagons are opposite in phase at the moment of maximal longitudinal forces occurring it can lead to the slight decrease of the maximal buffing force.

Dependencies of values of maximal buffing extending and buffing compressing forces on initial speed of motion for different types of transported cargo are shown on the Figures 7-8.

The above mentioned dependencies for the case of train motion «by coasting» are shown on the Figure 7, and the dependencies for the regulating braking are shown on the Figure 8.

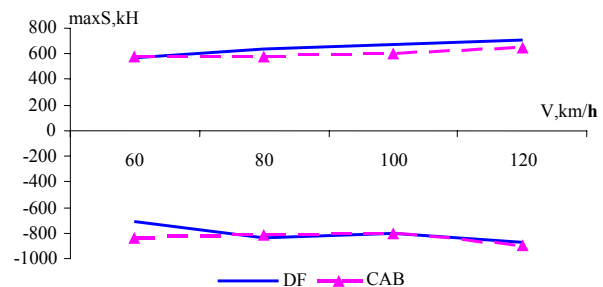


Fig. 7. Dependence of maximal buffing longitudinal forces on initial speed during motion «by coasting»

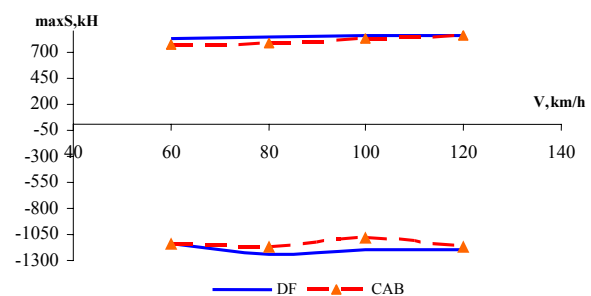


Fig. 8. Dependence of maximal buffing longitudinal forces on initial speed during regulating braking stage II

Graphs shown on the Figures 7 and 8 are obtained for motion of the trains consisting of 80 tank

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

cars in the concave track section with algebraic difference of grades  $\Delta i = 30 \text{ ‰}$ .

Full lines correspond to the variants when the tank wagons transport diesel fuel and the dashed lines when the tank wagons transport the carbamide-ammoniac blend.

According to the obtained results the values of maximum longitudinal forces for analyzed modes of motion insignificantly grow during the increase of initial speed for analyzed types of cargo.

The dependencies of maximal values of longitudinal forces on the train length are researched below.

To do this, the motions of trains consisting of 60, 70, 80, and 100 tank cars, which transport either the diesel fuel or carbamide-ammoniac blend were simulated. Firstly the results of mathematical simulation of train motion «by coasting» should be analyzed.

As an example the above mentioned dependencies received in case of entering compressed (Fig. 9a and 9b) and extended (Fig. 11) trains «by coasting» on the concave track sections with initial speed 80 km/h were shown.

On the Figures 9 and 11 the lines 1 correspond to the concave track section with algebraic difference of grades equal to 20 ‰, lines 2...30 ‰, lines 3...40 ‰. Full lines are obtained for the case of simulation of the CAB transportation in tank wag-

ons and the dashed lines for diesel fuel (DF) transportation.

As it is commonly known, that during entering of preliminary compressed trains on the concave profile track sections in the inter-car connections appear the quasi-static forces. In case these forces exceed the accepted value – 1000 kN, they can lead to extrusion even of loaded car.

As example the oscillograms of longitudinal forces in the inter-car connections during entering «by coasting» of preliminary compressed train consisting of 100 tank wagons, which are filled with carbamide-ammoniac blend on the concave track section with algebraic difference of grades 30 ‰ and initial speed 80 km/h are shown on the Figure 10.

As we can see from the listed oscillograms, the quasi-static forces in inter-car connections of the analyzed train appear even during motion «by coasting». These forces are close to the dangerous values from the position of motion stability.

As an example the dependencies of maximal longitudinal forces on the number of tank wagons in the train for different initial speeds during entering «by coasting» of preliminary extended trains on concave track section with algebraic difference of gradients equal to 30 ‰ are shown on the Figures 12 and 13.

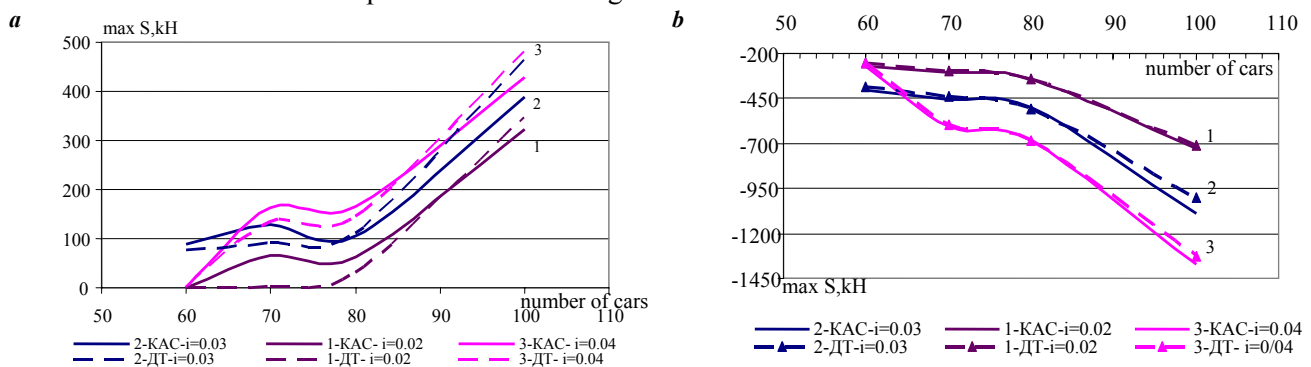


Fig. 9. Dependence of maximal extending (a) and compressing (b) longitudinal forces on the number of tank wagons during entering «by coasting» of preliminary compressed trains on the concave track section

As a result of the presented graphs, the level of maximal longitudinal forces grows with increasing of tank wagons number, insignificantly grows in case of increasing of initial speed and significant accepted below value from a perspective of tank wagons durability.

Since during regulating braking the level of

maximal longitudinal forces is significantly higher than during motion «by coasting» further we are going to estimate the longitudinal loading of trains with different length for the specified mode.

Dependencies of maximal compressing forces on initial speed for different algebraic difference of grades during regulating braking by II stage on

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

the concave track section of preliminary compressed trains transporting the diesel fuel are shown on the Figures 14-17.

On the Figures 14-17 the lines 1 correspond to algebraic difference of grades  $\Delta i = 10\%$ , lines 2 –  $\Delta i = 20\%$ , lines 3 –  $\Delta i = 30\%$ , lines 4 –  $\Delta i = 40\%$ .



Fig. 10. Oscillograms of longitudinal forces in 36<sup>th</sup>, 37<sup>th</sup>, 38<sup>th</sup>, 53<sup>th</sup>, 54<sup>th</sup> and 55<sup>th</sup> sections of preliminary compressed train consisting of 100 tank wagons, which are filled with carbamide-ammoniac blend during motion «by coasting» in the concave track section with algebraic difference of grade difference 30‰ and initial speed 80 km/h

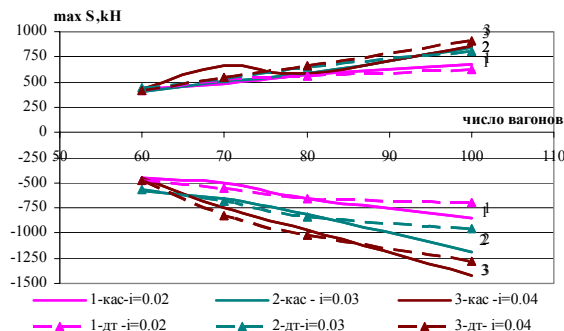


Fig. 11. Dependence of maximal longitudinal forces on the number of tank wagons during entering «by coasting» of extended trains on concave track section

From the presented Figures it can be concluded that maximal values of compressing longitudinal forces practically don't change when the initial speed increases and grow up when the algebraic difference of grades increase.

As can be seen from the Figure 15, the maximal values of compressing longitudinal forces in train that consists of 80 tank wagons are very close to

the limiting value – 1000 kN.

Dependencies of maximal compressing quasi-static longitudinal forces on number of tank wagons during regulating braking of preliminary compressed trains on concave track section are shown on the Figure 16 and 17.

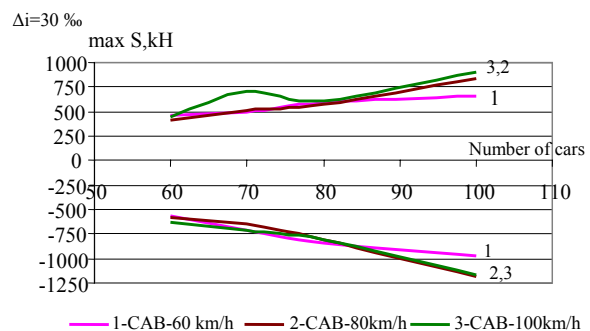


Fig. 12. Dependence of maximal longitudinal forces on the number of tank wagons during entering «by coasting» of extended trains transporting CAB on the concave track section for different initial speeds

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

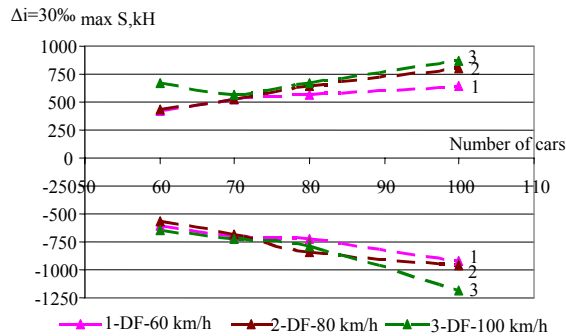


Fig. 13. Dependence of maximal buffering longitudinal forces on number of tank wagons during entering «by coasting» of extended trains transporting diesel fuel on concave track section for different initial speeds

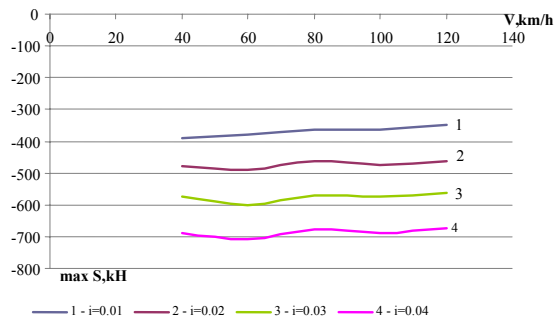


Fig. 14. Dependence of maximal longitudinal forces on the speed for different values of algebraic difference of grades during regulating braking of preliminary compressed trains consisting of 60 tank wagons on concave track section

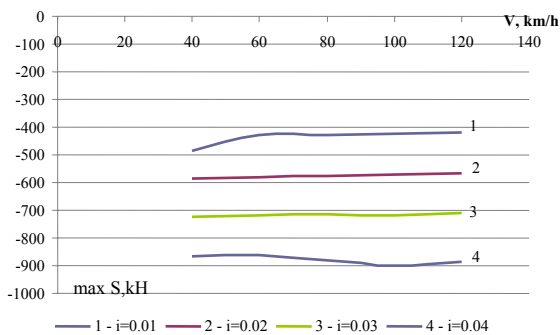


Fig. 15. Dependence of maximal longitudinal forces on motion speed for different values of algebraic difference of grades during regulating braking of preliminary compressed trains consisting of 80 tank wagons on the concave track section

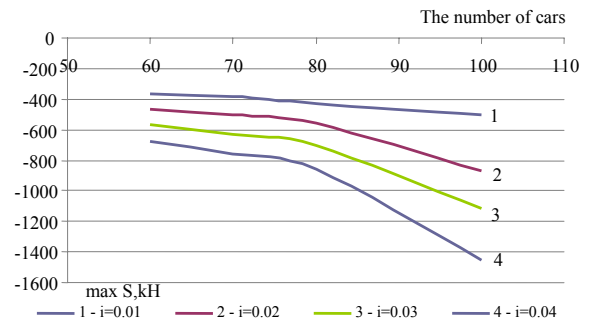


Fig. 16. Dependence of maximal longitudinal forces on number of tank wagons for different values of algebraic difference of grades during regulating braking of preliminary compressed trains with initial speed 60 km/h on concave track section

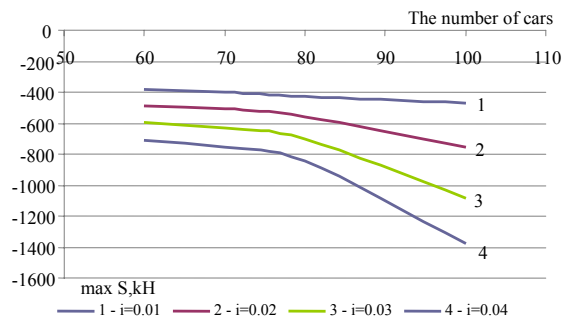


Fig. 17. Dependence of maximal longitudinal forces on number of tank wagons for different values of algebraic difference of grades during regulating braking of preliminary compressed trains with initial speed 80 km/h on concave track section

Using the obtained dependencies (Figures 16, 17) the level of maximal quasi-static compressing longitudinal forces should not exceed the acceptable value, according to the car stability conditions of extrusion (for loaded freight cars this force equals 1000 kN [2]). On the basis of the above mentioned, it can be concluded that during motion in the compound track sections (with grade difference  $\Delta i = 30\%$  or more) one can make up the train with locomotive in the head using no more than 95 tank cars.

### Originality and practical value

The paper researched the longitudinal loading of freight cars of different length formed by identical four-axial tank cars with one locomotive in the head during motion in the track section with different algebraic difference of the grades «by coast-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ing» and in the mode of regulating braking. The obtained results can be used during parameter standardization of the longitudinal profile of the track.

### Conclusions

Results show that if it is necessary to operate the train in the compound track sections the most dangerous is the regulating breaking of the preliminary compressed trains during entering the concave profile sections. In the trains consisting of more than 90 tank wagons during motion in concave track section with algebraic difference of grades more than 30 ‰ these forces can reach the dangerous values from the point of car extrusion.

The values of obtained forces exceed the similar values of quasi-static longitudinal forces in train consisting of open cars only.

As for the level of maximal buffing compressing forces in trains consisting of open cars is higher than that in the same trains consisting of tank wagons. Oscillations of the moving part of liquid reduce the maximal level of compressing forces and provide extending longitudinal forces.

Level of the greatest buffing and quasi-static longitudinal forces is almost independent from the transported cargo and insignificantly depends on the initial speed and grows with the increase of algebraic differences of grades.

As expected the longitudinal loading in case of regulating braking was higher than that in case of motion «by coasting».

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Блохин, Е. П. Динамика поезда / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. – М. : Транспорт, 1982. – 222 с.
2. Вершинский, С. В. Устойчивость вагонов от выжимания продольными силами при торможении поезда / С. В. Вершинский // Тр. ЦНИИ МПС. – М. : Транспорт, 1970. – Вып. 425. – С. 4–38.
3. Гребенюк, П. Т. Динамика торможения грузовых поездов / П. Т. Гребенюк // Вестник ВНИИЖТ, 2002. – № 1. – С. 23–27.
4. Железнодорожные цистерны. Конструкции, техническое обслуживание и ремонт : учеб. пособие для работников ж.-д. трансп. / И. Г. Морчиладзе, А. П. Никодимов, М. М. Соколов, А. В. Третьяков. – М. : ИБС-Холдинг, 2006. – 516 с.
5. Коломийченко, В. В. Автосцепное устройство подвижного состава / В. В. Коломийченко, Н. Г. Бес-палов, Н. А. Семин. – М. : Транспорт, 1980. – 185 с.
6. Нагруженность вагонов-цистерн при переходных режимах движения поездов / Г. И. Богомаз, Н. Е. Науменко, А. Н. Пшинько, С. В. Мямлин. – К. : Наук. думка, 2010. – 215 с.
7. О вождении длинносоставных поездов / Е. П. Блохин, Л. В. Урсуляк, К. И. Железнов, Я. Н. Романюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 30. – С. 48–56.
8. Программно-вычислительный комплекс для исследования продольной нагруженности наливных поездов / Е. П. Блохин, Н. Я. Гаркави, Л. В. Урсуляк, К. И. Железнов, Я. Н. Романюк // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 30. – С. 36–48.
9. Черкашин, Ю. М. Безопасность движения железнодорожного подвижного состава / Ю. М. Черкашин. – М. : Интекст, 2010. – 176 с.
10. Cole, C. Improvements to Wagon Connection Modeling for Longitudinal Train Simulation / C. Cole // Conference on Railway Engineering. – Rockhampton : Institution of Engineers, 1998. – P. 187–194.
11. Hirt, C. W, A Lagrangian Method for Calculation the Dynamics of an Incompressible Fluid with Free Surface / C. W Hirt, S. L. Cook, T. D. Butler // Journal of Computational Physics. – 1970. – Vol. 5. – P. 103–124.
12. Muller, L. TRAIN–A Computer Model for the Simulation of Longitudinal Dynamics in Trains / L. Muller, T. Witt // Conference on Railway Engineering. – Rockhampton : Institution of Engineers, 1998. – P. 181–186.
13. Simson, S. Evaluation and Training of Train Drivers during Normal Train Operations // S. Simson, C. Cole, P. Wilson // Conference on Railway Engineering. – Wollongong : Rail Technical Society of Australia, 2002. – P. 329–336.

С. В. МЯМЛІН<sup>1\*</sup>, Я. М. РОМАНЮК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Проректор з наукової роботи, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел./факс. +38 (056) 793 19 03, ел. пошта sergeyamyamlin@gmail.com

<sup>2</sup> Проектно-конструкторське технологічне бюро з автоматизації систем управління на залізничному транспорті України, пров. Калініна, 4, Дніпропетровськ, 49010, Україна

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

## ОЦІНКА ПОДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НАЛИВНИХ ПОЇЗДІВ ПРИ РУСІ ПЕРЕЛОМАМИ ПОДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ КОЛІЇ

**Мета.** Дослідити подовжню навантаженість наливних поїздів при русі по ділянках шляху ламаного профілю. Розглянути поїзди різної довжини, що складаються з чотиривісних цистерн. Оцінити вплив типу вантажу, що перевозиться, на подовжню навантаженість поїзду при його русі по увігнутій ділянці шляху. **Методика.** Рівень найбільших подовжніх зусиль оцінювався за допомогою математичного моделювання. Передбачалося, що перелом профілю утворений двома ухилами з розділювальним майданчиком довжиною 50 метрів таким чином, що алгебраїчна різниця керівних ухилів змінювалась від 10 до 40 % з кроком 10 %. Початкові швидкості руху приймалися рівними 40, 60, 80, 100, 120 км/год. Для оцінки подовжньої навантаженості розглядалися регулювальні гальмування і рух «на вибіганні». Для оцінки ударних навантажень розглядався в'їзд на увігнуту ділянку розтягнутого однорідного поїзда, а для визначення квазістатичних сил – стислого. **Результати.** У результаті розрахунків були отримані залежності найбільших подовжніх сил в поїздах від типу вантажу, що перевозиться, алгебраїчної різниці ухилів, кількості вагонів-цистерн, початкової швидкості руху, режимів руху, початкового стану зазорів у поїзді. **Наукова новизна.** Досліджено подовжню навантаженість вантажних поїздів різної довжини, сформованих з однакових чотиривісних вагонів-цистерн з одним локомотивом, розташованим в голові при русі по увігнутим ділянках колії з різною алгебраїчною різницею похилів на «вибігу» і режимі регулювального гальмування. Отримані результати можуть бути використані при нормуванні параметрів подовжнього профілю колії. **Практична значимість.** Отримані результати показують, що при необхідності водіння наливних поїздів по ділянках колії складного профілю найбільш небезпечним виявилось регулювальне гальмування попередньо стиснутих поїздів при в'їзді на ділянку увігнутого профілю. Рівень найбільших ударних і квазістатичних подовжніх сил практично не залежить від вантажу, що перевозиться, і трохи залежить від початкової швидкості руху.

**Ключеві слова:** подовжні зусилля; математичне моделювання; переломи подовжнього профілю; наливні поїзди

С. В. МЯМЛИН<sup>1\*</sup>, Я. Н. РОМАНЮК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> Проректор по научной работе, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, 49010, Украина, тел./факс. +38 (056) 793 19 03, эл. почта sergeymyamin@gmail.com

<sup>2</sup> Проектно-конструкторское технологическое бюро по автоматизации систем управления на железнодорожном транспорте Украины, пер. Калинина, 4, Днепропетровск, 49010, Украина

## ОЦЕНКА ПРОДОЛЬНОЙ НАГРУЖЕННОСТИ НАЛИВНЫХ ПОЕЗДОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ПЕРЕЛОМАМ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПУТИ

**Цель.** Исследовать продольную нагруженность наливных поездов при движении по участкам пути ломаного профиля. Рассмотреть поезда различной длины, состоящие из четырехосных цистерн. Оценить влияние типа перевозимого груза на продольную нагруженность поезда при движении по вогнутому участку пути. **Методика.** Уровень наибольших продольных сил оценивался с помощью математического моделирования. Предполагалось, что перелом профиля образован двумя уклонами с разделительной площадкой длиной 50 метров таким образом, что алгебраическая разность руководящих уклонов варьировалась от 10 до 40 % с шагом 10 %. Начальные скорости движения принимались равными 40, 60, 80, 100, 120 км/ч. Для оценки продольной нагруженности рассматривались регулировочные торможения и движения «на выбеге». Для оценки ударных нагрузок рассматривается въезд на вогнутый перелом растянутого однородного поезда, а для определения квазистатических сил – сжатого. **Результаты.** В результате расчетов были получены зависимости наибольших продольных сил в поездах от типа перевозимого груза, алгебраической разности уклонов, количества вагонов-цистерн, начальной скорости движения, режимов движения, начального состояния зазоров в поезде. **Научная новизна.** Исследована продольная нагруженность грузовых поездов разной длины, сформированных из одинаковых четырехосных вагонов-цистерн с одним локомотивом, расположенным в голове при движении по вогнутым участкам пути с различной алгебраической разностью ук-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

лонов на «выбеге» и режиме регулировочного торможения. Полученные результаты могут быть использованы при нормировании параметров продольного профиля пути. **Практическая значимость.** Полученные результаты показывают, что при необходимости вождения наливных поездов по участкам пути сложного профиля наиболее опасным оказалось регулировочное торможение предварительно сжатых поездов при въезде на участки вогнутого профиля. Уровень наибольших ударных и квазистатических продольных сил практически не зависит от перевозимого груза и незначительно зависит от начальной скорости движения.

*Ключевые слова:* продольные усилия; математическое моделирование; переломы продольного профиля; наливные поезда

## REFERENCES

1. Blokhin Ye.P., Manashkin L.A. *Dinamika poyezda* [Train dynamics]. Moscow, Transport Publ., 1982. 222 p.
2. Vershinskiy S.V. Ustoychivost vagonov ot vyzhimaniya prodolnymi silami pri tormozhenii poyezda [Car stability of extrusion by the longitudinal forces during the train breaking]. Trudy TsNII MPS – Proceedings of Central Research Institute of the Ministry of Communications, 1970, issue 425, pp. 4-38.
3. Grebenyuk P.T. Dinamika tormozheniya gruzovykh poyezdov [Breaking dynamics of the freight cars]. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZhT Bulletin*, 2002, no. 1, pp. 23-27.
4. Morchiladze I.G., Nikodimov A.P., Sokolov M.M., Tretyakov A.V. *Zheleznodorozhnyye tsisterny. Konstruktsii, tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont* [Railway tanks. Constructions, maintenance and repair]. Moscow, IBS-Kholding Publ., 2006. 516 p.
5. Kolomiychenko V.V., Bepalov N.G., Semin N.A. *Avtostsepnoye ustroystvo podvizhnogo sostava* [Automatic coupler of the rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1980. 185 p.
6. Bogomaz G.I., Naumenko N.Ye., Pshinko A.N., Myamlin S.V. *Nagruzhennost vagonov-tsistern pri perekhodnykh rezhimakh dvizheniya poyezdov* [Loading of the tank cars during transient modes of the train motion]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2010. 215 p.
7. Blokhin Ye.P., Ursulyak L.V., Zheleznov K.I., Romanyuk Ya.N. O vozhenii dlinnosostavnykh poyezdov [On the operation of the long trains]. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Iazariana [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2009, issue 30, pp. 48-56.
8. Blokhin Ye.P., Garkavi N.Ya., Ursulyak L.V., Zheleznov K.I., Romanyuk Ya.N. Programmno-vychislitelnyy kompleks dlya issledovaniya prodolnoy nagruzhenosti nalivnykh poyezdov [Software-computing system for the research of the longitudinal loading of the tank trains]. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Iazariana [Bulletin of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryn], 2009, issue 30, pp. 36-48.
9. Cherkashin Yu.M. *Bezopasnost dvizheniya zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Traffic safety of the railway rolling stock]. Moscow, Intekst Publ., 2010. 176 p.
10. Cole C. Improvements to Wagon Connection Modeling for Longitudinal Train Simulation. Conference on Railway Engineering. Rockhampton, 1998, pp. 187-194.
11. Hirt C.W., Cook S.L., Butler T.D. A Lagrangian Method for Calculation the Dynamics of an Incompressible Fluid with Free Surface, 1970, vol. 5, pp. 103-124.
12. Muller L., Witt T. TRAIN—A Computer Model for the Simulation of Longitudinal Dynamics in Trains. Conference on Railway Engineering. Rockhampton, 1998, pp. 181-186.
13. Simson S., Cole C., Wilson P. Evaluation and Training of Train Drivers during Normal Train Operations. Conference on Railway Engineering. Wollongong, 2002, pp. 329-336.

*Prof. V. L. Gorobets, D. Sc. (Tech.); Prof. P. S. Anisimov, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published*

Received: 25.04.2013

Accepted: 18.06.2013

# ЗМІСТ

## **ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ**

**О. М. ШИРОКОВА**

НІВЕЛЮВАННЯ ОПОРІВ ЗМІНАМ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ПРОВЕДЕННЯ РЕФОРМ ..... 7

## **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**Б. Є. БОДНАР, О. Б. ОЧКАСОВ, Д. В. ЧЕРНЯЄВ, Я. І. ШЕВЧЕНКО**

ДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗА НЕРІВНОМІРністю ОБЕРТАННЯ ЯКОРЯ ..... 13

**Д. М. КОЗАЧЕНКО**

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ ..... 22

## **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**

**Д. О. ЗАБАРИЛО**

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ ..... 29

## **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**І. О. ВАКУЛЕНКО, С. В. ПРОЙДАК, М. М. ГРИЩЕНКО**

ПЕРСПЕКТИВА ВИКОРИСТАННЯ АТЕРМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОМ'ЯКШЕННЯ МЕТАЛУ ЕЛЕМЕНТІВ РУХОМОГО СКЛАДУ ..... 36

**А. Я. КУЛІЧЕНКО, М. О. КУЗІН, І. О. ВАКУЛЕНКО**

ОЦІНКА ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ КОНТАКТУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТРИБОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ «КОЛЕСО–РЕЙКА» ..... 44

**О. В. ЛЮТОВА**

ПІДВИЩЕННЯ ЛИВАРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ..... 53

**С. О. ПОЛІШКО, М. А. КУШНІР, Ю. В. ТАТАРКО, А. Ф. САНИН**

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ СТІКП ТА КОЛІСНОЇ КП-Т ..... 60

**Ю. В. ТАТАРКО, М. А. КУШНІР, І. А. МАРКОВА, Т. І. ІВЧЕНКО**

ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ МОДИФІКАТОРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СТАЛІ R7 ..... 67

## **МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОНОМІКИ**

**Є. П. БЛОХІН, М. Л. КОРОТЕНКО, І. В. КЛИМЕНКО**

ПРО ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ КРИТЕРІЇВ БЕЗПЕКИ ВІД СХОДУ КОЛЕСА З РЕЙОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ НАПРЯМНОЇ АБО БІЧНОЇ СИЛИ ..... 74

**О. В. ГРАЧОВ**

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ВИПРЯМЛЕННЯ ВАГОВИХ ФУНКЦІЙ РОЗПОДІЛУ ЗА ГРАНИЧНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ Й ЗОЛЬНІСТЮ НА СТІЙКІСТЬ МОДЕЛІ ОПИСУ ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ ВУГІЛЛЯ ..... 82

**А. Л. ДАНЧЕНКО**

АВТОМАТИЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ВДОСКОНАЛЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ОСВІТНІХ РЕСУРСІВ ..... 93

**В. М. ПАХОМОВА**

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ..... 103

**О. В. ПИСЬМЕНСЬКИЙ**

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДОЗУВАННЯ ФЛОКУЛЯНТІВ ..... 111

**Л. А. МАНАШКІН, С. В. МЯМЛІН**

ЩОДО ПИТАННЯ ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОСУ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС І РЕЙОК ..... 119

## **РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**С. В. МЯМЛІН, Я. М. РОМАНЮК**

ОЦІНКА ПОДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НАЛИВНИХ ПОЇЗДІВ ПРИ РУСІ ПЕРЕЛОМАМИ ПОДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ КОЛІІ ..... 125

# СОДЕРЖАНИЕ

## **ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**Е. Н. ШИРОКОВА**

НИВЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ИЗМЕНЕНИЯМ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА В УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ РЕФОРМ ..... 7

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

**Б. Е. БОДНАРЬ, А. Б. ОЧКАСОВ, Д. В. ЧЕРНЯЕВ, Я. И. ШЕВЧЕНКО**

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЯКОРЯ ..... 13

**Д. Н. КОЗАЧЕНКО**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ ..... 22

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

**Д. А. ЗАБАРИЛО**

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ..... 29

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**И. А. ВАКУЛЕНКО, С. В. ПРОЙДАК, Н. Н. ГРИЩЕНКО**

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТЕРМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗУПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА  
ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ..... 36

**А. Я. КУЛИЧЕНКО, Н. О. КУЗИН, И. А. ВАКУЛЕНКО**

ОЦЕНКА КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНТАКТИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ  
ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО–РЕЛЬС» ..... 44

**О. В. ЛЮТОВА**

ПОВЫШЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ СВОЙСТВ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ..... 53

**С. А. ПОЛИШКО, М. А. КУШНИР, Ю. В. ТАТАРКО, А. Ф. САНИН**

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ СТ1КП  
И КОЛЕСНОЙ КП-Т ..... 60

**Ю. В. ТАТАРКО, М. А. КУШНИР, И. А. МАРКОВА, Т. И. ИВЧЕНКО**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ R7 ..... 67

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТА И ЭКОНОМИКИ**

**Е. П. БЛОХИН, М. Л. КОРОТЕНКО, И. В. КЛИМЕНКО**

ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОСТИ ОТ СХОДА КОЛЕСА С РЕЛЬСОВ ПРИ  
ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЛИБО БОКОВОЙ СИЛЫ ..... 74

**О. В. ГРАЧЁВ**

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПРЯМЛЕНИЯ ВЕСОВЫХ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПО ГРАНИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ И ЗОЛЬНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ  
ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА УГЛЯ ..... 82

**А. Л. ДАНЧЕНКО**

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ..... 93

**В. Н. ПАХОМОВА**

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ  
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ..... 103

**А. В. ПИСЬМЕНСКИЙ**

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ДОЗИРОВАНИЯ ФЛОКУЛЯНТА ..... 111

**Л. А. МАНАШКИН, С. В. МЯМЛИН**

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС И РЕЛЬСОВ ..... 119

## **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**С. В. МЯМЛИН, Я. Н. РОМАНЮК**

ОЦЕНКА ПРОДОЛЬНОЙ НАГРУЖЕННОСТИ НАЛИВНЫХ ПОЕЗДОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ПЕРЕЛОМАМ  
ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПУТИ ..... 125

# CONTENTS

## ***ECONOMICS AND MANAGEMENT***

**E. N. SHYROKOVA**

RESISTANCE LEVELING TO CHANGES ON RAILWAY ENTERPRISES UNDER IMPLEMENTATION OF REFORMS ...7

## ***OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS***

**B. Ye. BODNAR, A. B. OCHKASOV, D. V. CHERNYAYEV, Ya. I. SHEVCHENKO**

DIAGNOSIS OF TRACTION ELECTRIC MOTOR AT IRREGULARITY IN SPEED OF ANCHOR ROTATION.....13

**D. M. KOZACHENKO**

MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING OF TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL INDICATORS  
OF RAILWAY STATIONS OPERATION .....22

## ***ELECTRIC TRANSPORT***

**D. A. ZABARILO**

FEATURES OF THE HIGH FREQUENCY POWER TRANSFORMER CALCULATION .....29

## ***MATERIAL SCIENCE***

**I. A. VAKULENKO, S. V. PROYDAK, N. N. GRISCHENKO**

USE PROSPECT OF THE OF ATHERMIC TECHNOLOGIES OF METAL SOFTENING FOR ROLLING STOCK  
ELEMENTS.....36

**A. J. KULICHENKO, N. O. KUZIN, I. O. VAKULENKO**

EVALUATION OF QUALITY INDICATORS CONTACTING THE SURFACE OF THE TRIBOLOGICAL SYSTEM  
«WHEEL–RAIL».....44

**O. V. LYUTOVA**

INCREASING OF FOUNGING PROPERTIES OF SECONDARY ALUMINIUM ALLOYS.....53

**S. POLISHKO, M. KUSHNIR, J. TATARKO, A. SANIN**

INFLUENCE OF MODIFICATION ON DESCRIPTIONS OF LOW-CARBON STEEL OF ST1KP AND WHEELED KP-T...59

**J. TATARKO, M. KUSHNIR, I. MARKOVA, T. IVCHENKO**

USE OF COMPLEX MODIFIERS FOR IMPROVEMENT OF STEEL R7 QUALITY .....67

## ***TRANSPORT AND ECONOMIC TASKS MODELING***

**Ye. P. BLOKHIN, M. L. KOROTENKO, I. V. KLIMENKO**

ON THE EQUIVALENCE OF SEFETY CRITERIA OF THE WHEELS DERAILMENT FROM THE RAILS  
WHEN USING THE DIRECTING OR LATERAL FORCE.....74

**O. V. GRACHYOV**

ANALYSIS OF PARAMETERS CHANGE EFFECT OF WEIGHT FLATNESS FUNCTIONS IN BOUNDARY DENSITY  
AND ASH CONTENT ON MODEL STABILITY OF COAL FRACTIONAL COMPOSITION DESCRIPTION .....82

**A. L. DANCHENKO**

AUTOMATION OF INFORMATION DECISION SUPPORT TO IMPROVE E-LEARNING RESOURCES QUALITY .....93

**V. N. PAKHOMOVA**

METHOD OF CONSTRUCTION OF RATIONAL CORPORATE NETWORK FROM USING  
THE SIMULATION MODEL .....103

**A. V. PISMENSKIY**

SYNTHESIS OF OPTIMAL DIGITAL CONTROLLER DOSING OF FLOCCULANTS .....111

**L. A. MANASHKIN, S. V. MYAMLIN**

TO THE QUESTION OF MODELING OF WHEELS AND RAILS WEAR PROCESSES.....119

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**S. V. MYAMLIN, Ya. N. ROMANYUK**

EVALUATION OF LONGITUDINAL LOADING OF TANK TRAINS DURING MOTION IN LONGITUDINAL  
CHANGES OF GRADIENT .....125

## 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 в електронному виглядах у програмі Microsoft Word 2003 або більш ранній – файли \*.doc (файли \*.docx, \*.dost – не приймаються).

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії збірника та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

**Вимоги щодо об'єму наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:**

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 стор.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 стор.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 стор.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 стор.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

**Увага! Журнал готується до експертизи в наукометричній базі даних SciVerse Scopus.** Із цим фактом пов'язаний ряд необхідних вимог, а саме: наявність авторських розширених і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. – англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Рекомендуємо скористатися правилами до оформлення статей журналу: <http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/Vumogu.pdf>.

Для прийняття статті до друку автору/авторам необхідно:

**1. Для електронної інформації сформулювати всі матеріали в п'яти файлах:**

- **Перший** – із текстом статті та анотацій з ключовими словами. Назва файлу – прізвище та ініціали автора (першого співавтора) латинськими літерами, наприклад, Ivanov\_II\_stattia.doc.
- **Другий** – з розширеними відомостями про автора/авторів (прізвище, ім'я, по батькові; посада; вчений ступінь; учене звання; місце роботи або навчання; адреса електронної пошти; номери контактних телефонів). Назва файлу – Ivanov\_II\_vidomosti.doc.
- **Третій** – рецензія (відсканований). Назва файлу – Ivanov\_II\_recenziia.jpg.
- **Четвертий** – Експертний висновок (відсканований). Назва файлу – Ivanov\_II\_vysnovok.jpg. (складається в вільній формі)
- **П'ятий** – Ліцензійний договір (відсканований). Назва файлу – Ivanov\_II\_dogovir.jpg. Текст договору: <http://library.diit.edu.ua/HTMLs/scientists/Vumogu/license.doc>.

**2. Для друкованої інформації.** Матеріали до редакції надаються особисто або надсилаються поштою. До них відносяться: 1) Два друкованих примірники рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи; 2) Оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів; 3) Оригінал експертного висновку; 4) (для співробітників ДНУЗТ) Рекомендація до друку за підписом відповідального редактора розділу.

**Відповідальність за зміст статті, правильність, точність і коректність цитування, посилань та перекладу покладається на авторів.**

Остаточне рішення щодо публікації ухвалює редакційна колегія журналу.

Статті, відхилені редакційною колегією, повертаються авторам для доопрацювання.

**Шановні автори, запрошуємо до співробітництва!**

**З питань опублікування, будь ласка, звертайтеся до редакції журналу за адресою:**

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту,  
вул. Лазаряна, 2,  
м. Дніпропетровськ,  
Україна,  
49010  
e-mail: [visnik@diit.edu.ua](mailto:visnik@diit.edu.ua)  
Адреса сайту журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>



## Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна веде підготовку докторантів та аспірантів за рахунок коштів Державного бюджету України – за державним замовленням – за наступними спеціальностями:

### І. ДОКТОРАНТУРА

| № | Спеціальність                                | Шифр     |
|---|----------------------------------------------|----------|
| 1 | Теоретичні основи інформатики та кібернетики | 01.05.01 |
| 2 | Управління проектами і програмами            | 05.13.22 |
| 3 | Залізнична колія                             | 05.22.06 |
| 4 | Рухомий склад залізниць і тяга поїздів       | 05.22.07 |
| 5 | Електротранспорт                             | 05.22.09 |
| 6 | Експлуатація та ремонт засобів транспорту    | 05.22.20 |
| 7 | Будівельні конструкції, будівлі та споруди   | 05.23.01 |
| 8 | Будівельні матеріали та вироби               | 05.23.05 |

На підставі угод, що укладаються з докторантом і керівником вищого навчального закладу до докторантури приймаються громадяни України, кандидати наук, що мають наукові досягнення в обраній галузі.

Строк навчання 3 роки.

Вступники до докторантури, подають:

- заяву на ім'я ректора,
- копію першої сторінки паспорту,
- особистий листок з обліку кадрів з фотокарткою, який засвідчено відділом кадрів за місцем основної роботи,
- витяг з трудової книжки,
- довідку з бухгалтерії про заробітну платню,
- засвідчену копію диплому про закінчення вищого навчального закладу із зазначенням одержаної кваліфікації спеціаліста,
- копію диплома кандидата наук,
- копію атестату доцента, с.н.с. за їх наявності,
- розгорнутий план докторської дисертації,
- список опублікованих наукових праць та винаходів,
- медичну довідку про стан здоров'я за формою № 286-у,
- ідентифікаційний код,
- одну фотокартку розміром 3х4.

### ІІ. АСПІРАНТУРА

| №  | Спеціальність                                                             | Шифр     |
|----|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1  | Фізика твердого тіла                                                      | 01.04.07 |
| 2  | Теоретичні основи інформатики та кібернетики                              | 01.05.01 |
| 3  | Математичне моделювання та обчислювальні методи                           | 01.05.02 |
| 4  | Неорганічна хімія                                                         | 02.00.01 |
| 5  | Управління проектами і програмами                                         | 05.13.22 |
| 6  | Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика                        | 05.14.06 |
| 7  | Залізнична колія                                                          | 05.22.06 |
| 8  | Рухомий склад залізниць і тяга поїздів                                    | 05.22.07 |
| 9  | Електротранспорт                                                          | 05.22.09 |
| 10 | Експлуатація та ремонт засобів транспорту                                 | 05.22.20 |
| 11 | Основи і фундаменти                                                       | 05.23.02 |
| 12 | Будівельні конструкції, будівлі та споруди                                | 05.23.01 |
| 13 | Будівельні матеріали та вироби                                            | 05.23.05 |
| 14 | Технологія та організація промислового та цивільного будівництва          | 05.23.08 |
| 15 | Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності) | 08.00.04 |
| 16 | Історія філософії                                                         | 09.00.05 |
| 17 | Екологічна безпека                                                        | 21.06.01 |

На підставі угод, що укладаються з аспірантом і керівником вищого навчального закладу, до аспірантури приймаються громадяни України, які мають вищу освіту і кваліфікацію спеціаліста.

Строк навчання в аспірантурі з відривом від виробництва – 3 роки, без відриву від виробництва – 4 роки.

Особи, допущені до вступних іспитів в аспірантуру, складають три іспити за програмою вищого навчального закладу:

- спеціальну дисципліну,
- філософію,
- іноземну мову

За консультаціями звертатися на відповідні кафедри університету.

Особи, що поступають до аспірантури, подають:

- заяву на ім'я ректора,
- письмовий висновок передбачуваного наукового керівника про можливість навчання в аспірантурі,
- рекомендацію вченої ради вищого навчального закладу до вступу в аспірантуру (для випускників поточного року),
- копію першої сторінки паспорту.
- особистий листок з обліку кадрів з фотокарткою, який засвідчено відділом кадрів за місцем основної роботи,
- витяг з трудової книжки,
- довідку про заробітну платню,
- засвідчену копію диплома про закінчення вищого навчального закладу,
- посвідчення про складання кандидатських іспитів (за їх наявності),
- список опублікованих наукових праць та винаходів або реферат з обраної наукової спеціальності з рецензією передбачуваного наукового керівника,
- медичну довідку про стан здоров'я за формою № 286-у,
- ідентифікаційний код,
- одну фотокартку розміром 3×4.

**Прийом документів до докторантури та аспірантури з 01.09 по 30.09 щорічно.**

Вступні іспити до аспірантури з 10.10 по 30.10 щорічно.

Початок занять з 01.12 щорічно.

**За інформацією звертатися:**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту,  
вул. Лазаряна, 2,  
м. Дніпропетровськ,  
Україна,  
49010.

Тел. : (056) 373-15-44 – ректор, проф. Пшінько Олександр Миколайович, приймальня;

(056) 373-15-29 – проректор з наукової роботи, проф. Мямлін Сергій Віталійович.

(056) 373-15-63 – завідувача аспірантурою та докторантурою Лахнова Ірина Анатоліївна, кімн. 320).

#### **Інформація про спеціалізовані вчені ради університету.**

В університеті працює 3 спеціалізовані вчені ради з захисту докторських та кандидатських дисертацій за спеціальностями :

- Д 08.820.01 – залізнична колія (05.22.06) та електротранспорт (05.22.09);, 05.22.12 – промисловий транспорт.
- Д08.820.02 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів (05.22.07) і експлуатація та ремонт засобів транспорту (05.22.20); транспортні системи (05.22.01);
- К08.820.03 – економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності).

**Для нотаток**

Науковий журнал

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.  
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 3 (45) 2013

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – Т. О. Колесникова

Комп'ютерне верстання – Т. В. Шевченко

Літературна обробка – О. М. Врублевська

Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 16,48. Тираж 300 пр. Зам. № 1228.

**Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

*Адреса редакції, видавця:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Адреса дільниці оперативної поліграфії:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 1201, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Научный журнал

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ. ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 3 (45) 2013

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – Т. А. Колесникова

Компьютерная верстка – Т. В. Шевченко

Литературная обработка – О. М. Врублевская

Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 16,48. Тираж 300 экз. Зам. № 1228.

**Издательство Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна**

*Адрес редакции, издателя:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днепропетровск, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Адрес участка оперативной полиграфии:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 1201, г. Днепропетровск, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Scientific Journal

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VISNIK DNIPROPETROVS'KOGO NACIIONAL'NOGO  
UNIVERSITETU ZALIZNICHNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS.BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 3 (45) 2013

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – Т. О. Kolesnikova

Computer makeup – Т. V. Shevchenko

Redaction – О. М. Vrublevs'ka

Format 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 6,48. Circulation 300. Order no. 1228.

Publication of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Address of small offset printing office*

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine

Тел.: +38 (056) 47-19-66, Fax: +38 (056) 47-19-83



СУЧАСНІ ЗАКЛАДИ ОСВІТИ - 2013

Четверта Міжнародна виставка

# CERTIFICATE

якості наукових публікацій  
УДОСТОЄНИЙ

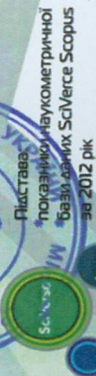
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Міністерство освіти і науки,  
молоді та спорту України

Міністр



Д. Табачник



Національна академія  
педагогічних наук України

Президент



В. Кремень

Україна, м. Київ

Асоціація користувачів  
Української науково-освітньої  
телекомунікаційної мережі «Уран»

Голова Ради



Ю. Якименко

110<sup>00</sup>



ISSN 2307-3489 (Print)

ISSN 2307-6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2013. 3(45). 1-142