

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 (69) 2017

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

*Наука та прогрес транспорту*  
*Автоматизовані системи управління на транспорті*  
*Екологія на транспорті*  
*Економіка та управління*  
*Експлуатація та ремонт засобів транспорту*  
*Електричний транспорт*  
*Залізнична колія*  
*Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання*  
*Матеріалознавство*  
*Моделювання задач транспорту та економіки*  
*Нетрадиційні види транспорту. Машини та механізми*  
*Промисловий транспорт*  
*Рухомий склад залізниць і тяга поїздів*  
*Транспортне будівництво*

Дніпро

2017

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

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

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

*ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):*

Афанасов А. М., Банніков Д. О., Бараш Ю. С., Біляєв М. М., Бобирь Д. В., Бобровський В. І., Боднар Б. Є., Босов А. А., Вакулєнко І. О., Власова Т. І., Волкова В. Є., Габринєць В. О., Гаврилюк В. І., Гєтьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобєць В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейтутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., Настєчик М. П., Нетєса М. І., Оковитий С. І., Очкасов О. Б., Петренко В. Д., Пічугов С. О., Пічурін В. В., Полішко Т. В., Радкевич А. В., Радченко М. О., Ракша С. В., Скалєзуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. І., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

*ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:*

Анісімов П. С. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бялонь А. (Інститут залізничного транспорту, Варшава, Рєспубліка Польща); Вайчунас Г. (Вільнюський технічний університет ім. Гєдиминаса, Литва); Васяк І. (Інститут електроенєргєтики Лєдзинської політехніки, Рєспубліка Польща); Гусєв Б. В. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Долежел І. (Університет Західної Богємії, Чєська Рєспубліка); Зіммер К. (Інститут Електротєхніки Варшавської політехніки, Рєспубліка Польща); Куанишев Б. М. (Казахська академія транспорту і комунікацій, Рєспубліка Казахстан); Лінгайтіс В. Л. (Вільнюський технічний університет ім. Гєдиминаса, Литва); Манашкін Л. А. («ALGAE ENERGY SOLUTION, LLC», США); Сладковські А. (Сілезька політехніка, Рєспубліка Польща); Стржелицькі Р. (Гданська морська академія, Рєспубліка Польща); Тітова Т. С. (Пєтербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олєксандра І, Російська Федерація); Худзікевич А. (Варшавський політехнічний університет, Рєспубліка Польща); Шєпонг Адам (Варшавський політехнічний університет, Рєспубліка Польща).

Журнал зарєєстровано Дєржавною рєєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідєцтво про рєєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р. Видання внесєно до Перєліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освїти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки). Журнал зарєєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI. Друкуєтьсє за рїшенням вчєної ради університету від 15.06.2017 р., протокол № 11

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

Адреса засновника та редакції вул. Лазаряна, 2, кїм. 267, Дніпро, Україна, 49010  
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua;  
сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікуєтьсє 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. – «Вїсник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
- з 2013 р. – «Наука та прогрєс транспорту. Вїсник 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 (69) 2017

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

*Наука и прогресс транспорта*  
*Автоматизированные системы управления на транспорте*  
*Экология на транспорте*  
*Экономика и управление*  
*Эксплуатация и ремонт средств транспорта*  
*Электрический транспорт*  
*Железнодорожный путь*  
*Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование*  
*Материаловедение*  
*Моделирование задач транспорта и экономики*  
*Нетрадиционные виды транспорта. Машины и механизмы*  
*Промышленный транспорт*  
*Подвижной состав железных дорог и тяга поездов*  
*Транспортное строительство*

Днепро

2017

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

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО  
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Мямлин С. В., доктор технических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук  
по социальным коммуникациям

*ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):*

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

*ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:*

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

Журнал  
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.  
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.  
Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).  
Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.  
Печатается по решению ученого совета университета от 15.06.2017 г., протокол № 11

Издатель

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

Адрес  
учредителя

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

Издание публикуется с 1936 г.:

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

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

## **NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU**

**VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU  
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU**

## **SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS**

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

**Scientific journal**

**No. 3 (69) 2017**

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

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

Dnipro

2017

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

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

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

*EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):*

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

*FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:*

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

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Journal<br>was registered | by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine.<br>Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012<br>Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 г. no. 1528 (technical sciences).<br>Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.<br>Published according to the Academic Council decision of the University from 15.06.2017, Protocol no. 11 |
| Publisher                 | Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro)<br>Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Address<br>of Founder     | St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;<br>e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: <a href="http://stp.diit.edu.ua/">http://stp.diit.edu.ua/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Edition is being published since 1936:

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

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC [502.3:504.5]:519.872

L. V. AMELINA<sup>1\*</sup>, M. M. BILIAIEV<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-8525-7096

<sup>2</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

### NUMERICAL SIMULATION OF AIR POLLUTION IN CASE OF UNPLANNED AMMONIA RELEASE

**Purpose.** Development fast calculating model which takes into account the meteorological parameters and buildings which are situated near the source of toxic chemical emission. **Methodology.** The developed model is based on the equation for potential flow and equation of pollutant dispersion. Equation of potential flow is used to compute wind pattern among buildings. To solve equation for potential flow Samarskii implicit difference scheme is used. The implicit change – triangle difference scheme is used to solve equation of mass transfer. Numerical integration is carried out using the rectangular difference grid. Method of porosity technique («markers method») is used to create the form of comprehensive computational region. Emission of ammonia is modeled using Delta function for point source. **Findings.** Developed 2D numerical model belongs to the class of «diagnostic models». This model takes into account the main physical factors affecting the process of dispersion of pollutants in the atmosphere. The model takes into account the influence of buildings on pollutant dispersion. On the basis of the developed numerical models a computational experiment was carried out to estimate the level of toxic chemical pollution in the case of unplanned ammonia release at ammonia pump station. **Originality.** Developed numerical model allows to calculate the 2D wind pattern among buildings and pollutant dispersion in the case unplanned ammonia release. Model allows to perform fast calculations of the atmosphere pollution. **Practical value.** The model can be used when developing the PLAS (Emergency Response Plan).

*Keywords:* air pollution; unplanned release; toxic chemical; numerical modeling

#### Introduction

The ammonia pipeline Toliatti–Odessa was built in the late 70s–early 80s specifically for the transportation of the main products of the Toliatti nitrogen plant for export. The end point of ammonia pipeline is Odessa Port. There are several pumping stations along the route of this pipeline (Fig. 1). These pump stations support the correct pressure in ammonia pipeline. From the point view of industrial safety these pump stations are the chemically dangerous objects [4, 6, 15]. According to the Law of Ukraine for high-risk objects, a PLAS (Emergency Response Plan) document should be developed for such industrial

object. Prediction of contaminated zones and detection of Dangerous Level of Contamination is the basis of this document. Therefore, the actual task is to estimate the level of contamination in working areas of the pump station in the case of unplanned ammonia release.

#### Review of literature sources

To solve the problem of chemical contamination zones formation in the case of unplanned ammonia emissions analytical models are widely used. For example, Berland model was used to predict air pollution in the case of ammonia pipe rupture [6]:

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$C = \frac{Q_m (zH)^{\left(\frac{1-m}{2}\right)} z_1^m}{2(2+n-m)k_1 \sqrt{\pi k_0 x^3}} \exp \left[ -\frac{y^2}{4k_0 x} - \frac{u_1 z_1^{m-n} (z^{2+n-m} + H^{2+n-m})}{k_1 (2+n-m)x} \right] \times \frac{I_{1-m}}{2+n-m} \left[ \frac{2u_1 z_1^{m-n} H_z^{\frac{2+n-m}{2}}}{(2+n-m)^2 k_1 x} \right],$$

$Q_r$  – emission rate;  $H$  – height of emission source;  $k_0, k_1, m$  – empirical constants;  $I$  – Bessel function;  $C$  – concentration.

Another approach for assessing the zones of chemical contamination is the application of the Gaussian plume model [2, 3, 10-14]. The use of the analytical models or Gaussian models allow to calculate quickly zones of chemical contamination. On the other hand, these models have significant lacks because they cannot be used when we model toxic chemical dispersion among buildings. For this purpose, it is necessary to use numerical models [1, 8, 9] which are based on Fluid Dynamics equations. In Ukraine, there is a certain deficit of such models [8, 9]. Worthy of note that the application Navier–Stokes equations for this purpose demands using of very fine computational grid and much computational time.

### Purpose

The purpose of this paper is to develop a numerical model for computing the chemical contamination of air on the territory of the ammonia pump station for unplanned ammonia release (accidental release or terror act).



Fig. 1. GOOGLE's image of Ammonia Pump Station:  
I – pump station

### Mathematical formulation

To simulate the pollutant dispersion in the atmosphere 2D transport model is used [5, 7]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

where  $C$  is mean concentration;  $u, v$  are the wind velocity components;  $\sigma$  is the parameter taking into account the process of pollutant chemical decay or washout;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  are the diffusion coefficients;  $Q$  is intensity of point source emission;  $\delta(r - r_i)$  are Dirak delta function;  $r_i = (x_i, y_i)$  are the coordinates of the point source.

To simulate the wind flow in the case of the buildings at the territory of Pump Station the 2D model of potential flow is used [7]

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

where  $P$  is the potential of velocity.

The wind velocity components are calculated as follows:

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

Boundary conditions for modeling equations are discussed in [5, 7].

### Numerical model

The computation of wind pattern and pollutant dispersion is carried out on rectangular grid. To create the form of buildings we use porosity technique or so called «markers method» [1, 7]. Markers are used to separate the computational cells where flow takes place from the cells which correspond to buildings.

Main features of the finite difference schemes which we use for the numerical integration of modeling equations are shown below.

To solve equation (1) we use change – triangle difference scheme [1, 7]. The time dependent derivative in Eq. (1) is approximated as follows:

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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

At the first step convective derivatives are represented in the following way:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x};$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y};$$

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

At the second step the convective derivatives are approximated as follows:

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

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

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

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

The second order derivatives are approximated as follows:

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

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

In these expressions  $L_x^+$ ,  $L_x^-$ ,  $L_y^+$ ,  $L_y^-$ ,  $M_{xx}^+$ ,  $M_{xx}^-$ ,  $M_{yy}^+$ ,  $M_{yy}^-$  are the difference operators. Using these expressions, the difference scheme for the transport equation can be

written as follows:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + \\ + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ = M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} \end{aligned}$$

Solution of the transport equation in finite – difference form is split in four steps on the time step of integration  $dt$ :

– at the first step ( $k = \frac{1}{4}$ ) the difference equation is:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^{n+k} + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^{n+k} + M_{yy}^- C^n) \quad (3) \end{aligned}$$

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

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

– at the third step ( $k = n + \frac{3}{4}$ ;  $c = n + \frac{1}{2}$ ) the expression (4) is used;

– at the fourth step ( $k = n + 1$ ;  $c = n + \frac{3}{4}$ ) the expression (3) is used.

At the fifth step (at this step the influence of the source of pollutant emission is taken into account) the following approximation is used:

$$\frac{C_{i,j}^{5n+1} - C_{i,j}^{5n}}{\Delta t} = \sum_{l=1}^N \frac{Q_l(t^n)}{\Delta x \Delta y} \delta_l.$$

Function  $\delta_l$  is equal to zero in all cells except the cells where source of emission is situated.

This difference scheme is implicit and absolutely steady but the unknown concentration  $C$  is calculated using the explicit formulae at each step (so called «method of running calculation»).

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

To solve equation (2) we transform it to the «evolution type»

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

where  $\eta$  is 'fictitious' time.

For  $\eta \rightarrow \infty$  the solution of equation (3) tends to the solution of equation (2).

To solve equation (3) A. A. Samarskii's change-triangle difference scheme is used. According to this scheme the solution of equation (3) is split into two steps:

– at the first step the difference equation is

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

– at the second step the difference equation is

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

From these expressions the unknown value  $P_{i,j}$  is determined using the explicit formulae at each step of splitting («method of running calculation»). The calculation is completed if the condition

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon$$

is fulfilled (where  $\varepsilon$  is a small number,  $n$  is the number of iteration). The components of velocity vector are calculated on the sides of computational cell as follows

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x},$$

$$v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Calculation of velocity components on the sides of computational cell allows to develop the conservative numerical scheme for pollutant dispersion.

For coding of difference formulae, we used FORTRAN language.

## Findings

Developed numerical model and code were used to compute ammonia concentrations at the territory of ammonia pump station in the case of unplanned release (Fig.2). It was supposed that release takes place near building with ammonia pumps (Fig. 3, 4). Sketch of computational region is shown in Figure 4. Figures 5, 6 show modeling results for ammonia emission. Emission rate is  $Q=17$  kg/s and was chosen from literature [6].



Fig. 2. Ammonia pump station



Fig. 3. Buildings with ammonia pumps

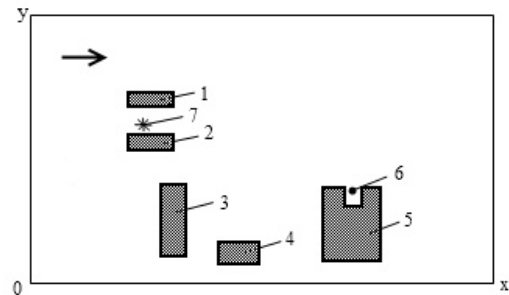


Fig. 4. Sketch of computational region (ammonia pump station): 1, 2 – buildings with ammonia pumps, 3, 4, 5 – industrial buildings on the territory of station; 6 – receptor position; 7 – position of ammonia release at the territory of pump station

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

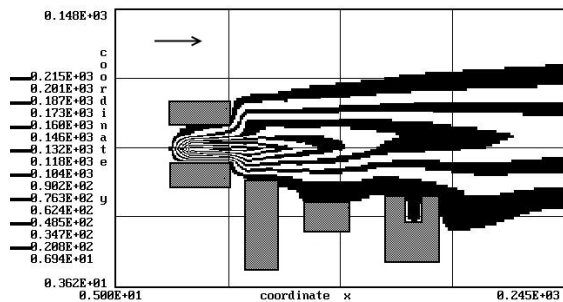
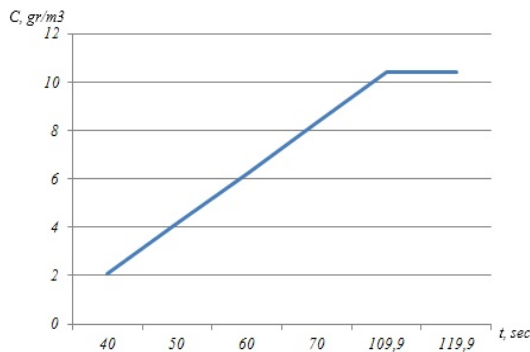
Fig. 5. Computed ammonia concentration,  $t=250$  s

Fig. 6. Ammonia concentration at receptor spot (position No. 6, Fig. 4)

As we can see from Fig. 5 plume of toxic chemical quickly covers all the territory of ammonia pump station. To estimate the danger of such unplanned release we computed the ammonia concentration near one building at the territory of this station. Receptor position (position of person) is shown in Fig. 4. Dynamics of ammonia concentration at this spot is shown in Fig. 6. It is clear that the people affected will die at the territory in the case of this unplanned release because the ammonia concentration exceeds Level of Concern which is  $20 \text{ mg/m}^3$ .

Worthy of note that computational time was 5 sec. It allows to use the developed model for prediction of air pollution during PLAS development.

### Originality and practical value

A 2D numerical model has been developed to compute contamination zones among buildings during the accidental emission of a hazardous substance. The presented 2D numerical model is based on the application of the fundamental equations of aerodynamics and mass transfer.

The peculiarity of the developed model is the use of standard meteorological information and quick calculation.

### Conclusions

Numerical 2D numerical model for estimating the level of atmospheric air pollution during the emergency emission of hazardous substances is proposed. Proposed numerical model allows to predict level of pollution of atmospheric air among buildings. The solution of the aerodynamic problem is based on the numerical integration of the equation for the velocity potential. To predict the air pollution, the equation of mass transfer is used. The mass transfer equation takes into account the convective and diffusive transport of pollutants in atmosphere, taking into account buildings situated near the source of emission. Emission of a dangerous substance is simulated by a point source, which is modeled using Dirac's delta function.

Further improvement of the model should be carried out in the direction of creating a 3D numerical model that takes into account the formation of vortices in the air flow.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы : монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 127 с.
2. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
3. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
4. Заказнов, В. Ф. Распространение аммиака при разгерметизации аммиакопровода, емкостей / В. Ф. Заказнов, Л. А. Куршева // Исследования и разработки по созданию магистральных аммиакопроводов и складов жидкого аммиака : тр. ГИАП. – Москва, 1985. – С. 57.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

6. Цыкало, А. Л. Испарение и рассеивание аммиака при его разливах и утечках. Серия: Азотная промышленность / А. Л. Цыкало, И. И. Стрижевский, А. Д. Баглет. – Москва : НИИТЭХИМ, 1982. – 48 с.
7. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
8. Biliaiev, M. M. Numerical simulation of the atmosphere pollution after accident at the «Tolliaty-Odessa» ammonia pipe / M. M. Biliaiev, L. V. Amelina, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental security. – 2013. – P. 391–395. doi: 10.1007/978-94-007-5577-2\_66.
9. Biliaiev, M. M. The Numeric Forecast of Air Pollution Caused by a Blasting Accident in the Enterprise Responsible for Rocket Fuel Utilization in Ukraine / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – 2012. – P. 313–327. doi: 10.1007/978-94-007-5034-0\_25.
10. Daly, A. Accident reconstruction and plume modeling of an unplanned ammonia release / A. Daly, P. Zanetti, M. Jennings // Air Pollution XX. WIT Transactions on Ecology and The Environment. – 2013. – Vol. 174. – P. 3–13. doi:10.2495/AIR130011.
11. Dispersion Modeling of Hydrogen Sulfide at Cimarex Rands Butte Project Using ALOHA / Bureau of Land Management Pinedale Field Office, SWCA Environmental Consultants. – Wyoming, 2010. – 26 p.
12. Janos, T. Atmospheric spreading model for ammonia released from the poultry house [Electronic resource] / T. Janos. E. Gorliczay, J. Borbely // Ecotoxicologie, Zootehnie si Tehnologii de Industrie Alimentara. – 2016. – Vol. XV/B. – P. 331–337. – Available at: [http://protmed.uoradea.ro/facultate/publicatii/ecotox\\_zooteh\\_ind\\_alim/2016B/ipa/17%20Tamas\\_Janos.pdf](http://protmed.uoradea.ro/facultate/publicatii/ecotox_zooteh_ind_alim/2016B/ipa/17%20Tamas_Janos.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 30.05.2017.
13. Mellisen, S. B. A Fortran Program for Calculating Chemical Hazards Using the NATO Stanag 2103/ATP-45 Algorithm [Electronic resource] / S. B. Mellisen // Suffield memorandum No. 1275. – Alberta : Defence Research Establishment Suffield, 1989. – 34 p. – Available at: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA214763>. – Title from the screen. – Accessed : 30.05.2017.
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes [Electronic resource] / O. Zavila, P. Dobeš, J. Dlabka, J. Bitta // Bezpecnostni vyzkum. The science for population protection. – 2015. – No. 2. – P. 1–9. – Available at: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/30/213.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 30.05.2017.
15. The Pentagon Shield Field Program: Toward Critical Infrastructure Protection / T. Warner, P. Benda, S. Swerdlin [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2007. – Vol. 88. – Iss. 2. – P. 167–176. doi: 10.1175/BAMS-88-2-167.

Л. В. АМЕЛІНА<sup>1\*</sup>, М. М. БІЛЯЄВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта [gidravlika2013@mail.ru](mailto:gidravlika2013@mail.ru), ORCID 0000-0002-8525-7096

<sup>2\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта [gidravlika2013@mail.ru](mailto:gidravlika2013@mail.ru), ORCID 0000-0002-1531-7882

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ В РАЗІ РАПТОВОГО ВИКИДУ АМІАКУ

**Мета.** Дослідження спрямоване на розробку моделі швидкого обчислення, яка враховувала б метеорологічні параметри та будівлі, котрі знаходяться поблизу джерела токсичного викиду. **Методика.** Розроблена модель заснована на рівнянні для потенційного потоку та рівнянні розсіювання забруднюючих речовин. Рівняння потенційного потоку використовується для обчислення моделі вітру між будівлями, а для вирішення рівняння потенційної течії – неявна різницева схема Самарського. Неявна поперемінно-трикутна різницева схема застосовується для вирішення рівняння масопереносу. Чисельне інтегрування здійснюється за допомогою прямокутної різницевої сітки. Метод маркування («метод маркерів») вживається для створення форми великої розрахункової області. Викид аміаку моделюється з використанням Дельта функції для точкового джерела. **Результати.** Розроблена двовірсна чисельна модель відноситься до класу «діагностичні

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

моделі». Ця модель має на увазі основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері. Модель враховує вплив будівель на розсіювання забруднюючих речовин. На основі розроблених чисельних моделей був проведений обчислювальний експеримент для оцінки рівня токсичного хімічного забруднення в разі раптового викиду аміаку на аміачній насосній станції. **Наукова новизна.** Розроблена авторами чисельна модель дозволяє розрахувати двомірну модель вітру серед будівель та розсіювання забруднюючих речовин у разі раптового викиду аміаку. Модель дозволяє виконувати швидкі розрахунки забруднення атмосфери. **Практична значимість.** Модель можливо використувати при розробці ПЛАСа (план ліквідації аварійних ситуацій).

*Ключові слова:* забруднення повітря; раптовий викид; токсичні хімічні речовини; чисельне моделювання

Л. В. АМЕЛИНА<sup>1\*</sup>, Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-8525-7096

<sup>2</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В СЛУЧАЕ ВНЕЗАПНОГО ВЫБРОСА АММИАКА

**Цель.** Исследование направлено на разработку быстрой расчетной модели, которая учитывала бы метеорологические параметры и здания, расположенные вблизи источника токсического химического выброса. **Методика.** Разработанная модель основана на уравнении для потенциального потока и уравнении дисперсии загрязняющих веществ. Уравнение потенциального потока используется для вычисления модели ветра между зданиями, а для решения уравнения потенциального течения – неявная разностная схема Самарского. Неявная попеременно-треугольная разностная схема применяется для решения уравнения массопереноса. Численное интегрирование осуществляется с помощью прямоугольной разностной сетки. Метод маркировки («метод маркеров») используется для создания формы большой расчетной области. Эмиссия аммиака моделируется с использованием Дельта функции для точечного источника. **Результаты.** Разработанная двумерная численная модель относится к классу «диагностические модели». Эта модель имеет в виду основные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. Модель учитывает влияние зданий на дисперсию загрязняющих веществ. На основе разработанных численных моделей был проведен вычислительный эксперимент для оценки уровня токсического химического загрязнения в случае внезапного выброса аммиака на аммиачной насосной станции. **Научная новизна.** Разработанная авторами численная модель позволяет рассчитать двумерную модель ветра между зданиями и дисперсию загрязняющих веществ в случае внезапного выброса аммиака. Модель позволяет выполнять быстрые расчеты загрязнения атмосферы. **Практическая значимость.** Модель можно применять при разработке ПЛАСа (план ликвидации аварийных ситуаций).

*Ключевые слова:* загрязнение воздуха; внезапный выброс; токсичные химические вещества; численное моделирование

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Berlov, A. V., & Mashikhina, P. B. (2014). *Modelirovaniye nestatsionarnykh protsessov avariynogo zagryazneniya atmosfery* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Berlyand, M. Y. (1985). *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat.
3. Bruyatskiy, Y. V. (2000). *Teoriya atmosfernoy diffuzii radioaktivnykh vybrosov*. Kyiv: Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy.
4. Zakaznov, V. F., & Kursheva, L. A. (1985). Rasprostraneniye ammiaka pri razgermetizatsii ammiakoprovoda, emkostey. In *Issledovaniya i razrabotki po sozdaniyu magistralnykh ammiakoprovodov i skladov zhidkogo ammiaka*. Moscow: The State Research and Design Institute of the Nitric Industry and Organic Synthesis Products.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

5. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka.
6. Tsykalo, A. L., Strizhevskiy, I. I., & Baglet, A. D. (1982). *Azotnaya promyshlennost: Ispareniye i rasseivaniye ammiaka pri ego razlivakh i utechkakh*. Moscow: NIITEKHIM.
7. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev M. M. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka.
8. Biliaiev, M. M., Amelina, L.V., & Kharitonov, M. M. (2013). Numerical simulation of the atmosphere pollution after accident at the “Tolliaty-Odessa” ammonia pipe. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 391-395. doi: 10.1007/978-94-007-5577-2\_66
9. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). The Numeric Forecast of Air Pollution Caused by a Blasting Accident in the Enterprise Responsible for Rocket Fuel Utilization in Ukraine. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 313-327. doi: 10.1007/978-94-007-5034-0\_25
10. Daly, A., Zanetti, P., & Jennings, M. (2013). Accident reconstruction and plume modeling of an unplanned ammonia release. *Air Pollution XXI. WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 174, 3-13. doi: 10.2495/AIR130011
11. SWCA Environmental Consultants. (2010). *Dispersion Modeling of Hydrogen Sulfide at Cimarex Rands Butte Project Using ALOHA*. Wyoming.
12. Janos, T., Gorliczay, E., & Borbely, J. (2016). Atmospheric spreading model for ammonia released from the poultry house. *Ecotoxicologie, Zootehnie si Tehnologii de Industrie Alimentara, XV/B*, 331-337. Retrieved from [http://protmed.uoradea.ro/facultate/publicatii/ecotox\\_zooteh\\_ind\\_alim/2016B/ipa/17%20Tamas\\_Janos.pdf](http://protmed.uoradea.ro/facultate/publicatii/ecotox_zooteh_ind_alim/2016B/ipa/17%20Tamas_Janos.pdf)
13. Mellisen, S. B. (1989). *A Fortran Program for Calculating Chemical Hazards Using the NATO Stanag 2103/ATP-45 Algorithm: Suffield memorandum 1275*. Alberta: Defence Research Establishment Suffield. Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA214763>
14. Zavila, O., Dobeš, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *Bezpečnostní výzkum*, 2. Retrieved from <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/30/213.pdf>
15. Warner, T., Benda, P., Swerdlin, S., Knievel, J., Copeland, J., Crook, A., ..., & Weil, J. (2007). The Pentagon Shield Field Program: Toward Critical Infrastructure Protection. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88 (2), 167-176. doi: 10.1175/BAMS-88-2-167

*Prof. S. A. Pichugov, Dr. Sc. in Phys.-and-Math. (Ukraine); Prof. S. Z. Polishchuk, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Feb. 10, 2017

Received: May 18, 2017

## УДК 502.3:504.5:629.33

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, Е. С. СЛАВИНСКАЯ<sup>2\*</sup>, Р. В. КИРИЧЕНКО<sup>3\*</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882<sup>2\*</sup>Каф. «Управление производством и имуществом», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-5163-5645<sup>3\*</sup>Каф. «Управление производством и имуществом», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-9918-3895**ПРОГНОЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА  
ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКОЙ  
ТРАНСФОРМАЦИИ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ**

**Цель.** Научная работа предполагает разработку 3D-численных моделей, которые позволят рассчитывать процесс загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта с учетом химической трансформации вредных веществ. Также необходимо рассмотреть создание численных моделей, которые давали бы возможность прогнозировать уровень загрязнения атмосферного воздуха в условиях городской застройки.

**Методика.** Для решения задачи по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта задействованы уравнения аэродинамики и массопереноса. Для решения дифференциальных уравнений аэродинамики и массопереноса используются конечно-разностные методы. Для численного интегрирования уравнения потенциала скорости применяется метод условной аппроксимации. Уравнение для потенциала скорости, записанное в разностном виде, разделяется на два уравнения, причем на каждом шаге разделения неизвестное значение потенциала скорости определяется по явной схеме бегущего счета, при этом сама разностная схема – неявная. Для численного интегрирования уравнения рассеивания выбросов в атмосфере применяется неявная попеременно-треугольная разностная схема расщепления. Выбросы от автотрассы моделируются серией точечных источников заданной интенсивности. Разработанные численные модели составляют основу созданного пакета прикладных программ.

**Результаты.** Авторами созданы 3D-численные модели, которые относятся к классу «diagnostic models». Данные модели учитывают основные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания вредных веществ в атмосфере при выбросах от автотранспорта с учетом химической трансформации вредных веществ. На основе построенных численных моделей проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения воздушной среды на улице. **Научная новизна.** Разработаны численные модели, которые позволяют рассчитать 3D аэродинамику ветрового потока в условиях городской застройки и процесс массопереноса выбросов от автотрассы. Модели позволяют учитывать химическую трансформацию выбросов в атмосфере. Выполнены расчеты по определению зоны загрязнения, которая формируется возле зданий, расположенных вдоль автомагистрали. **Практическая значимость.** Рассмотрены эффективные численные модели, которые могут быть применены при разработке мероприятий по охране окружающей среды при эксплуатации автомобильного транспорта в городе. Разработанные модели позволяют оценить размеры, форму и интенсивность зоны загрязнения возле автомагистрали.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы; автотранспорт; численное моделирование; химическая трансформация вредных веществ

**Введение**

Известно, что автотранспорт является крупнейшим источником загрязнения атмосферного воздуха. Кроме этого, в мире наблюдается стремительная тенденция роста количества автомобилей в различных странах. По этой причине значительно усилился интерес к разработ-

ке теоретических методов оценки влияния автотранспорта на загрязнение воздушной среды в городах (рис. 1) [1–3, 6, 8–10]. Применение таких методов имеет определенное преимущество перед методом физического моделирования, который требует больших материальных затрат и времени на организацию и проведение

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

експеримента, как в лабораторных, так и в природных условиях.

При использовании метода математического моделирования наиболее часто применяются эмпирические и аналитические модели [1]. Данные модели позволяют оперативно получать данные о возможном уровне загрязнения атмосферного воздуха. Однако, существенным их недостатком является то, что они при получении прогнозных оценок не учитывают наличие зданий.



Рис. 1. Выбросы от автотранспорта

Fig. 1. Emissions from motor vehicles

В этой связи наблюдается повышенный интерес к созданию численных моделей для исследования процессов загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта, которые учитывали бы все факторы [1, 2]. Следует подчеркнуть, что в Украине наблюдается ограниченное количество научных разработок в данном направлении.

### Цель

Целью данной работы является создание 3D CFD моделей для прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта в условиях застройки. Ставится задача создания моделей, которые позволяли бы учитывать химическую трансформацию выбросов в атмосфере.

### Методика

Для решения задачи по прогнозу уровня загрязнения атмосферного воздуха в условиях застройки выбросами автотранспорта будут использоваться фундаментальные уравнения аэродинамики и массопереноса. Для численно-

го интегрирования моделирующих уравнений будут применяться конечно-разностные методы.

### Математическая модель

*Модель аэродинамики.* Так как ставится задача разработки математической модели для прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха в условиях застройки, то для решения такой задачи необходимо определить поле скорости ветрового потока при наличии зданий. Для решения этой задачи будем применять модель безвихревого течения идеальной жидкости [5]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – потенциал скорости.

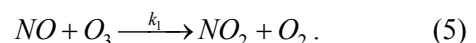
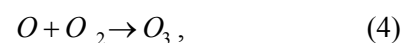
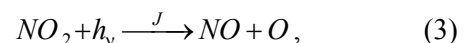
Компоненты вектора скорости воздушного потока определяется такими соотношениями:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (2)$$

Постановка граничных условий для данного уравнения рассматривается в работах [1, 5]. Отметим, что решение уравнения (1) осуществляется в условиях застройки.

Компоненты вектора скорости воздушного потока, определенные после решения аэродинамической задачи, используются далее для решения задачи массопереноса вредных веществ (выбросы от автотранспорта) на улицах.

*Модель массопереноса.* Как известно, выбросы от автотранспорта содержат большое количество вредных веществ. Под действием солнечного света между органическими веществами, поступающими с отработанными газами автотранспорта и оксидами азота, идет фотохимическая реакция и образуется так называемый фотохимический смог. Основными реакциями при этом являются [9, 10]:



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением процесса переноса химического превращения окиси азота и двуокиси азота в атмосфере на улице. Выбор только этих загрязняющих веществ связан также с тем, что для расчета химической трансформации выбросов в атмосферу необходимо знать скорости химических реакций. В литературе существует определенная информация относительно этого параметра для указанных веществ.

Решение задачи о прогнозе загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта будет осуществляться в два этапа. На первом этапе решения будет моделировать процесс переноса указанных веществ в атмосфере с учетом рассеивания озона. На этом этапе используются следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial[NO]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO]}{\partial y} + \frac{\partial w[NO]}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[NO]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[NO]}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[NO]}{\partial z}) + \\ + Q_{NO} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \delta(z-z_0), \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[NO_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO_2]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO_2]}{\partial y} + \frac{\partial w[NO_2]}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[NO_2]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[NO_2]}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[NO_2]}{\partial z}) + \\ + Q_{NO_2} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \delta(z-z_0), \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[O_3]}{\partial t} + \frac{\partial u[O_3]}{\partial x} + \frac{\partial v[O_3]}{\partial y} + \frac{\partial w[O_3]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial[O_3]}{\partial x}) + \\ + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial[O_3]}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_z \frac{\partial[O_3]}{\partial z}). \quad (8) \end{aligned}$$

где  $Q_{NO}$  – интенсивность выброса  $NO$  от автомобилей,  $Q_{NO_2}$  – интенсивность выброса  $NO_2$  от автомобилей;  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости ветра;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $x_0, y_0, z_0$  – координаты источника выброса загряз-

няющего вещества;  $\delta(x-x_0), \delta(y-y_0), \delta(z-z_0)$  – дельта-функция Дирака, с помощью которой моделируется выброс загрязнителя.

Эмиссия загрязняющих веществ от автотранспорта моделируется серией точечных источников, заданной интенсивности  $Q_{NO}, Q_{NO_2}$  и расположенных вдоль магистрали.

Постановка граничных и начальных условий для уравнения массопереноса рассмотрена в работах [1, 5].

На входе в расчетную область задаются следующие значения параметров [1, 7]:

$$u = u_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^p, \mu_z = k_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^m, \\ \mu_x = k_0 u, \mu_x = \mu_y,$$

где  $u_1$  – скорость ветра на высоте  $z_1$  (принимается  $z_1 \approx 10 \text{ м}$ );  $k_1 = 0,2$ ;  $k_0 = 0,1$ ;  $p = 0,16$ ;  $m \approx 1$ .

На втором этапе решения задачи массопереноса осуществляется расчет химической трансформации веществ в атмосфере с использованием таких зависимостей [8–10]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_1 [NO][O_3] + J[NO_2]; \quad (9)$$

$$\frac{d[NO_2]}{dt} = k_1 [NO][O_3] - J[NO_2]; \quad (10)$$

$$\frac{d[O_3]}{dt} = -k_1 [NO][O_3] + J[NO_2]. \quad (11)$$

Решение данных уравнений проводится методом Эйлера.

Известно, что выброс  $NO_2$  составляет величину порядка 5 % от выброса  $NO_x$ , а остальная часть выброса, порядка 95 %, – это выброс  $NO$ . Для расчета процесса химической трансформации в работе принято, что скорость химических реакций составляет:  $J = 0,0045 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_1 = 0,00039 \text{ ppb}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

Для формирования вида расчетной области используются маркеры [1, 2]. С помощью маркеров в дискретной модели задается положение

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

автомагістралі, інтенсивність вибросов от автомобилей и положение зданий в расчетной области. Это позволяет очень быстро формировать «геометрию» расчетной области, т.е. положение зданий, их форму, положение автомагистралей и т. д.

**Метод решения.** Для решения дифференциальных уравнений аэродинамики и массопереноса используются конечно-разностные методы. Так, при численном интегрировании уравнения, для потенциала скорости применяется метод условной аппроксимации [4] Уравнение для потенциала скорости записывается в виде:

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

здесь  $\eta$  – фиктивное время.

При  $\eta \rightarrow \infty$  решение уравнения (12) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (1).

Разностные уравнения для численного решения (12) на каждом дробном шаге расщепления имеют вид [4]:

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} &= \left[ \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \\ &+ \left[ \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \left[ \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right], \\ \frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \left[ \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \\ &+ \left[ \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} \right]. \end{aligned}$$

На каждом шаге расщепления расчет неизвестной величины потенциала скорости идет по явной формуле – методу бегущего счета.

Перед началом численного интегрирования уравнения (4) задается поле потенциала скорости для «начального» момента фиктивного времени. Процесс расчета поля потенциала

скорости заканчивается при выполнении условия:

$$|P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n| \leq \varepsilon,$$

где  $P_{i,j,k}^{n+1}$  – новое приближение величины потенциала скорости;  $P_{i,j,k}^n$  – предыдущее значение величины потенциала скорости;  $\varepsilon$  – малое число.

После расчета поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент вектора скорости воздушного потока на гранях разностных ячеек по зависимостям:

$$\begin{aligned} u_{ijk} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x}, \\ v_{ijk} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y}, \\ w_{ijk} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}. \end{aligned}$$

После решения задачи аэродинамики – определения поля скорости воздушного потока решается задача массопереноса загрязняющих веществ от автомагистрали. Для численного интегрирования уравнений (6)–(8) используется попеременно-треугольная разностная схема [1, 5]. Построение этой разностной схемы осуществляется путем расщепления решения исходного уравнения массопереноса (6)–(8) на последовательность разностных уравнений более простой структуры, из которых неизвестное значение концентрации примеси определяется методом бегущего счета.

## Результаты

Ниже представлены результаты решения задачи по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха вблизи двух зданий. Рядом со зданиями планируется строительство автомагистрали (рис. 2). Как видно из рис. 2 автомагистраль огибает первое здание (позиция 1), которое имеет Г-образную форму. Интенсивность эмиссии от автомагистрали задается с помощью дельта-функции Дирака, т. е. набором точечных источников эмиссии, расположенных по трассе автомагистрали. Ставилась задача

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

оценки размеров, формы зоны загрязнения возле автомагистрали.

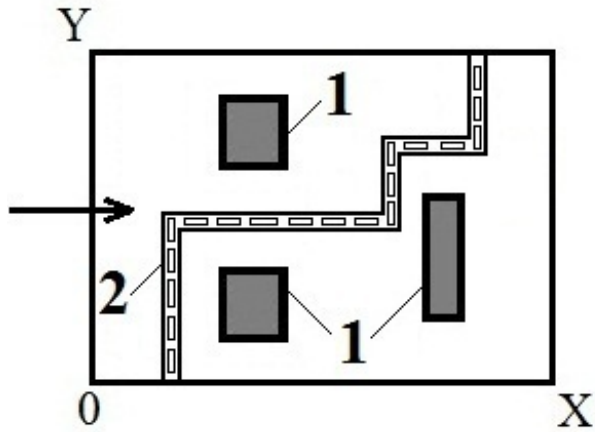


Рис. 2. Расчетная схема:  
1 – здания, 2 – автомагистраль

Fig. 2. Sketch of computational region:  
1 – buildings, 2 – highway

На рис. 3 показана зона загрязнения на уровне  $z = 3$  м. Из этого рисунка хорошо видно, что первое здание полностью попадает в зону влияния автомагистрали. Между зданиями формируется подзона с большим градиентом концентрации примеси.

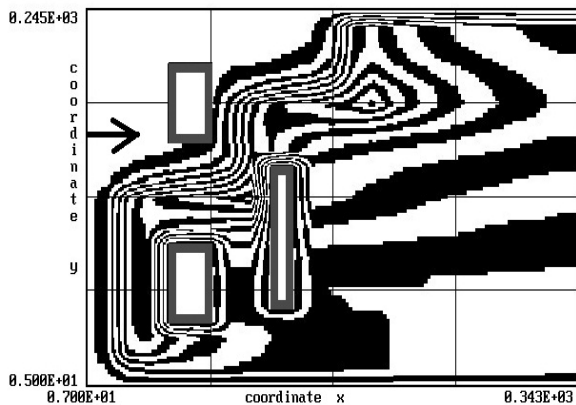


Рис. 3. Зона загрязнения ( $NO_2$ ) возле зданий  
(уровень  $z = 3$  м)

Fig. 3. Pollution area ( $NO_2$ ) near buildings  
(level  $z = 3$  m)

Отметим, что на решение задачи потребовалось около 10 с компьютерного времени.

### Научная новизна и практическая значимость

Созданы 3D численные модели, позволяющие рассчитывать формирование зон загрязнений в условиях застройки при эмиссии вредных веществ от автотранспорта с учетом химической трансформации этих выбросов в атмосферу. Представленные 3D численные модели основаны на применении фундаментальных уравнений аэродинамики и массопереноса.

Особенностью разработанных моделей является использование стандартной метеорологической информации, быстрота в получении расчетных данных и удобство анализа получаемых результатов прогноза.

### Выводы

Предложены численные 3D модели для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта. Численные модели предполагают прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в условиях застройки с учетом химической трансформации выбросов в атмосфере. Решение аэродинамической задачи по определению поля скорости воздушного потока, при наличии зданий, основывается на численном интегрировании уравнения для потенциала скорости. Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха осуществляется на базе уравнений массопереноса, записанных для каждого конкретного загрязняющего вещества. Применяемые уравнения массопереноса учитывают конвективный и диффузионный перенос загрязняющих веществ в атмосфере с учетом застройки. Выбросы от автотрассы моделируются серией точечных источников, которые задаются с помощью дельта-функции Дирака. Предложенные модели дают возможность оперативно получить информацию об уровне загрязнения атмосферного воздуха в районах, где проходят автомагистрали.

Дальнейшее совершенствование моделей следует проводить в направлении создания численной модели, учитывающей образование вихрей в воздушном потоке.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах городов : монография / Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова, П. С. Кириченко. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 159 с.
2. Беляев, Н. Н. CFD прогнозирование процесса загрязнения воздушной среды на улицах / Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова // *Екологія і природокористування* : зб. наук. пр. / Ін-т проблем природокористування та екології НАН України. – Київ, 2013. – Вип. 17. – С. 188–194.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. A new simplified NO/NO<sub>2</sub> conversion model under consideration of direct NO<sub>2</sub>-emissions / I. During, W. Bachlin, M. Ketzler [et al.] // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2011. – Vol. 20, No. 1. – P. 67–73. doi: 10.1127/0941-2948/2011/0491.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // *Наука та прогрес транспорту*. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953.
8. Nguyen, T. N. Numerical simulation of wind flow and pollution transport in urban street canyons / T. N. Nguyen, T. C. Nguyen, V. T. Nguyen // *Advanced Science and Technology Letters*. – 2015. – Vol. 120. – P. 770–777. doi: 10.14257/astl.2015.120.152.
9. Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements / C.-H. Chang, J.-S. Lin, C.-M. Cheng, Y.-S. Hong // *J. of Marine Science and Technology*. – 2013. – Vol. 21, No. 2. – P. 119–126.
10. Overman, H. T. Simulation model for NO<sub>x</sub> distributions in a street canyon with air purifying pavement : master thesis / H. T. Overman ; University of Twente. – Enschede, Netherlands, 2009. – 69 p.

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, О. С. СЛАВІНСЬКА<sup>2\*</sup>, Р. В. КИРИЧЕНКО<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідраліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Управління виробництвом та майном», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-5163-5645

<sup>3\*</sup>Каф. «Управління виробництвом та майном», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-9918-3895

## ПРОГНОЗ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ З УРАХУВАННЯМ ХІМІЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН

**Мета.** Наукова робота передбачає розробку 3D чисельних моделей, які дозволять розраховувати процес забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту з урахуванням хімічної трансформації шкідливих речовин. Також необхідно розглянути створення чисельних моделей, які давали б можливість прогнозувати рівень забруднення атмосферного повітря в умовах міської забудови. **Методика.** Для вирішення задачі по оцінці рівня забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту використовуються рівняння аеродинаміки та масопереносу. Для вирішення диференціальних рівнянь аеродинаміки та масопереносу задіяні кінцево-різницеві методи. Для чисельного інтегрування рівняння потенціалу швидкості застосовується метод умовної апроксимації. Рівняння для потенціалу швидкості, записане в різницевому вигляді, розділяються на два рівняння, причому на кожному кроці розділення невідоме значення потенціалу швидкості визначається за явною схемою біжучого рахунку, при цьому сама різницева схема – неявна. Для чисельного інтегрування рівняння розсіювання викидів в атмосфері застосовується неявна поперемінно-трикутна різницева схема розщеплення. Викиди від автотраси моделюються серією точ-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

кових джерел заданої інтенсивності. Розроблені чисельні моделі складають основу створеного пакета прикладних програм. **Результати.** Авторами створені 3D чисельні моделі, які відносяться до класу «diagnostic models». Дані моделі враховують основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання шкідливих речовин в атмосфері при викидах від автотранспорту з урахуванням хімічної трансформації шкідливих речовин. На основі побудованих чисельних моделей проведено обчислювальний експеримент по оцінці рівня забруднення повітряного середовища на вулиці. **Наукова новизна.** Розроблено чисельні моделі, які дозволяють розрахувати 3D аеродинаміку вітрового потоку в умовах міської забудови та процес масопереносу викидів від автотраси. Моделі дозволяють враховувати хімічну трансформацію викидів в атмосфері. Виконано розрахунки по визначенню зони забруднення, яка формується біля будівель, розташованих вздовж автомагістралі. **Практична значимість.** Розглянуто ефективні чисельні моделі, які можуть бути застосовані при розробці заходів із охорони навколишнього середовища при експлуатації автомобільного транспорту в місті. Розроблені моделі дозволяють оцінити розміри, форму та інтенсивність зони забруднення біля автомагістралі.

*Ключові слова:* забруднення атмосфери; автотранспорт; чисельне моделювання, хімічна трансформація шкідливих речовин

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, O. S. SLAVINSKA<sup>2\*</sup>, R. V. KYRYCHENKO<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Dep. «Manufacturing and Property Management», National Transport University of Ukraine, Suvorov St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 82 03, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-5163-5645

<sup>3\*</sup>Dep. «Manufacturing and property management», National Transport University of Ukraine, Suvorov St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 82 03, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-9918-3895

## PREDICTION OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION BY EMISSIONS OF MOTOR TRANSPORT TAKING INTO ACCOUNT THE CHEMICAL TRANSFORMATION OF HARMFUL SUBSTANCES

**Purpose.** Development of 3D numerical models, which allow us to calculate air pollution process from road transport emissions based on chemical transformation of pollutants. Creating numerical models, which would give the opportunity to predict the level of air pollution in urban areas. **Methodology.** To address the evaluation of the air pollution problem of emissions of vehicles the equations of aerodynamics and mass transfer were used. In order to solve differential equations of aerodynamics and mass transfer the finite difference methods are used. For the numerical integration of the equation for the velocity potential the method of conditional approximation was applied. The equation for the velocity potential written in difference form, is being split into two equations, and at each step of splitting the unknown value of the potential speed is determined by the explicit scheme of running account and the difference scheme itself is implicit. For the numerical integration of the equation of dispersion of emissions in the atmosphere is used implicit alternating-triangular difference splitting scheme. Emissions from the road are simulated by a series of point sources of a given intensity. The developed numerical models are the basis of established software package. **Findings.** There were developed 3D numerical models, which belong to the class «diagnostic models». These models take into account the main physical factors affecting the process of dispersion of pollutants in the atmosphere when emissions from road transport taking into account the chemical transformation of pollutants. On the basis of the constructed numerical models a computational experiment to assess the level of air pollution in the street was carried out. **Originality.** Numerical models that allow you to calculate the 3D aerodynamic of wind flow in urban areas and the process of mass transfer of emissions from the road were developed. The models make it possible to account the chemical transformation of emissions in the atmosphere. There were preformed the calculations to determine the contamination zone that formed near the buildings along the motorway. **Practical value.** There were considered efficient numerical models that can be used in the development of environmental protection measures in the operation of road transport in the city. The developed models allow us to estimate the size, shape and intensity of the contamination zone near the motorway.

*Keywords:* air pollution; vehicles; numerical modeling; chemical transformation of pollutants

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Rusakova, T. I., & Kirichenko, P. S. (2014). *Modelirovaniye zagryazneniya atmosfernogo vozduha vybrosami avtotransporta na ulicah gorodov* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Biliaiev, M. M., & Rusakova, T. I. (2013). CFD prediction of air pollution in the streets. *Ecology and Nature Management*, 17, 188-194.
3. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka.
4. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka.
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka.
6. Düring, I., Bächlin, W., Ketzel, M., Baum, A., Friedrich, U., & Wurzel, S. (2011). A new simplified NO/NO<sub>2</sub> conversion model under consideration of direct NO<sub>2</sub>-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*, 20 (1), 67-73. doi: 10.1127/0941-2948/2011/0491
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1 (61), 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953
8. Nguyen, T. N., Nguyen, T. C., & Nguyen, V. T. (2015). Numerical simulation of wind flow and pollution transport in urban street canyons. *Advanced Science and Technology Letters*, 120, 770-777. doi: 10.14257/astl.2015.120.152
9. Chang, C.-H., Lin, J.-S., Cheng, C.-M., & Hong, Y.-S. (2013). Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements. *Journal of Marine Science and Technology*, 21 (2), 119-126.
10. Overman, H. T. (2009). *Simulation model for NO<sub>x</sub> distributions in a streey canyon with air purifying pavement*. (Master thesis). University Twente, Netherlands.

Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. С. А. Пичуговым (Украина);  
д.т.н., проф. С. З. Полищуком (Украина)

Поступила в редколлегию: 10.02.2017

Принята к печати: 27.05.2017

# ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.482

Ю. М. ДАЦУН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Експлуатація та ремонт рухомого складу», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 19 99, тел. +38 (050) 401 64 43, ел. пошта remlocomot@gmail.com, ORCID 0000-0002-5794-1528

## ОЦІНКА РІВНЯ ВІДПОВІДНОСТІ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Мета.** Перевірки та обстеження технічного рівня локомотиворемонтних виробництв залізниць проводяться представниками керівного складу Департаменту та служби локомотивного господарства, ревізорського апарату, експертними групами в рамках атестації виробництва. Виявлені порушення фіксуються у вигляді лінгвістичних експертних тверджень, які не дозволяють оцінювати їх значимість та ефективно визначати пріоритетність усунення. Тому метою наукової роботи є розробка методики оцінки відповідності локомотиворемонтного виробництва вимогам нормативної документації з визначенням показника рівня відповідності. **Методика.** При формалізації лінгвістичних тверджень про відповідність ремонтного виробництва враховується вплив ряду чинників, значимість яких визначалась шляхом експертної оцінки, формалізованими моделями розвитку подій при побудові та аналізі «дерева відмов». Для обчислення показника рівня відповідності пропонується застосування потрійної адитивної згортки з коефіцієнтами вагомості. Дослідження взаємозв'язку інтегрального показника з витратами на утримання локомотивів проводилось методами регресійного аналізу. **Результати.** Аналіз результатів перевірок та обстежень технічного рівня локомотиворемонтних виробництв показав схожу структуру експертних тверджень невідповідностей, що дозволило представити їх у вигляді вектора. При перетворенні багатокритеріальної задачі в однокритеріальну був застосований найбільш об'єктивний метод зваженої суми. Обчислені показники відповідності за результатами обстеження ряду локомотиворемонтних виробництв. У результаті кореляційно-регресійного аналізу доведено вплив показника відповідності ремонтного виробництва на перевитрати для утримання локомотивів. **Наукова новизна.** Розроблена методика оцінки відповідності технічного рівня локомотиворемонтного виробництва на основі лінгвістичних експертних тверджень із урахуванням впливу виду виявленої невідповідності, типу технологічного процесу, виду вузла локомотива та виду компоненту технічного рівня виробництва. Отримано взаємозв'язок рівня відповідності ремонтного виробництва та витрат на утримання локомотивів. **Практична значимість.** Застосування розробленої методики дозволить реально оцінити значимість виявлених невідповідностей, впорядкувати усунення невідповідностей згідно пріоритетності та підвищити ефективність капіталовкладень у ремонтне виробництво. Отримані регресійні рівняння дозволять нормувати показник відповідності та прогнозувати перевитрати на утримання локомотивів за результатами обстеження ремонтних виробництв.

**Ключові слова:** локомотиворемонтне виробництво; локомотив; рівень; показник; відповідність; вузол; технологічний процес; експерт; значимість

### Вступ

При ремонті локомотивів якість виконаних робіт істотно залежить від ряду факторів, що визначаються організаційно-технічним рівнем виробництва. Ці фактори розрізняються за своєю природою і ступенем впливу на ремонтне

виробництво, що ускладнює їх однозначну оцінку або вимірювання [2, 3, 17]. При визначенні технологічних можливостей ремонтного виробництва існує необхідність оцінки їх фактичного рівня. Дослідження складових організаційно-технічного рівня локомотиворемонтних виробництв (ЛРВ) українських залізниць показало,

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

що вони мають ієрархічну структуру. На нижньому рівні найбільший вплив становлять фактори: «обладнання та інструмент», «персонал», «виробниче середовище», «вимірювання», «технологічна документація» [1, 5, 14]. Рівень відповідності технологічних процесів вимогам конструкторської та технологічної документації на промислових підприємствах довгий час визначався в рамках контролю технологічної дисципліни виробництва [7, 9]. Кількісну оцінку порушень отримували як відношення числа технологічних процесів з відхиленнями до загальної кількості технологічних процесів. Такий підхід характеризується низькою інформативністю і не може враховувати різну значимість технологічних процесів ЛРВ, різну критичність вузлів локомотивів. У даний час у світовій практиці на етапах розробки, доопрацювання або поліпшення процесів широко використовується метод «аналізу видів і наслідків потенційних невідповідностей процесу» (Process Failure Mode and Effects Analysis, PFMEA) [10, 11, 13]. Його метою є поліпшення процесу на основі аналізу його потенційних невідповідностей з кількісним аналізом наслідків і причин невідповідностей. Однак, при розрахунку пріоритетного числа ризику процесу поряд з важливістю наслідків порушення враховуються складові виникнення (частоти) і ймовірності виявлення порушення процесу за порядковою (ранговою) шкалою. Застосування такого підходу при оцінці порушень технологічних процесів ЛРВ може призвести до спотворення результатів, неправильних висновків і коригувальних дій.

### Мета

Метою роботи є розробка методики оцінки рівня відповідності локомотиворемонтного виробництва вимогам нормативної документації та обґрунтування впливу рівня відповідності на витрати, які пов'язані з утриманням локомотивів.

### Методика

При проведенні обстеження ЛРВ в рамках його атестації на право проведення ремонтів локомотивів, виявлення невідповідностей здійснюється експертною групою [8]. Невідповідності формулюються і реєструються у вигляді експертних тверджень типу: «установка для

перевірки обмоток якорів електричних машин на замикання в непрацездатному стані», «опресовування системи охолодження дизеля проводиться без підігріву води» і т. д. Природно, що різні невідповідності ремонтного виробництва не можуть здійснювати однаковий вплив на якість ремонту. З урахуванням ризик-орієнтованого підходу, невідповідності у ремонті вузлів, які обумовлюють безпеку руху, мають більш суттєве значення, ніж невідповідності у ремонті вузлів допоміжних або резервованих систем [6]. Аналіз результатів обстеження ЛРВ українських залізниць за 15 років дозволив виявити, що всі експертні твердження невідповідностей ремонтного виробництва мають схожу структуру і можуть бути представлені у вигляді вектора:

$$X = \langle x_1, x_2, x_3 \rangle, \quad (1)$$

де  $x_1$  – вид виявленої невідповідності;  $x_2$  – вид вузла, при ремонті якого виявлена невідповідність;  $x_3$  – тип технологічного процесу, при виконанні якого виявлено невідповідність.

Для отримання кількісних оцінок складових невідповідностей необхідно застосовувати методи, які могли б враховувати вплив цих складових на кінцевий результат діяльності.

Аналіз складових (1) дозволяє стверджувати, що  $x_1$  є визначальною складовою, оскільки обумовлює вид невідповідності. За час існування процедури атестації ЛРВ експертами був сформований обмежений перелік невідповідностей виробництва. Для ЛРВ, що є виробничими підрозділами ПАТ «Українська залізниця», невідповідності розділяються за чотирма компонентами: «обладнання та інструмент», «персонал», «виробниче середовище», «документація», коефіцієнт вагомості яких обчислювався за даними [5]. У залежності від ступеня впливу на технологічний процес невідповідності кожного компонента виділялись в три групи: від тих, що здійснюють мінімальний негативний вплив (викликають незначні порушення технологічного процесу) до невідповідностей з максимальним негативним впливом (невиконання технологічного процесу). Кожній групі невідповідностей експертним шляхом призначався показник впливу на технологічний процес (табл. 1).

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Під час обстеження виробництва оцінка здійснюється по кожній ремонтній позиції згідно з технологічною послідовністю виконання робіт. Через ремонтні позиції проходять різні вузли і деталі, що порізно впливають на показники безпеки та працездатності локомотива. Це необхідно враховувати при оцінці рівня невідповідностей. Для оцінки альтернатив за векторним критерієм застосовуються перетворен-

ня, що переводять багатокритерійну задачу в однокритеріальну. Існує ряд підходів переводу векторного критерію в скалярний вид [12, 15]. Однак найбільш поширеним і простим є метод зваженої суми. Його застосування для вирішення поставленого завдання може забезпечити більшу об'єктивність відносно інших методів з компенсуючим ефектом.

Таблиця 1

**Розподіл невідповідностей локомотиворемонтного виробництва за компонентами та ступенем впливу на технологічний процес**

Table 1

**Distribution of discrepancies in locomotive repair production by components and degree of influence on the technological process**

| Компонент виробництва                                    | Коефіцієнт вагомості компонента | Характеристика невідповідності / показник впливу на технологічний процес                                              |                                                                                                                                        |                                                                |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
|                                                          |                                 | Виконання технологічного процесу з незначними порушеннями / 0,05                                                      | Виконання технологічного процесу з суттєвими порушеннями / 0,2                                                                         | Невиконання технологічного процесу / 0,75                      |
| Документація (нормативна, конструкторська, технологічна) | 0,15                            | Представлена не в повному обсязі. Застаріла, потребує оновлення чи перегляду                                          | Відсутність на робочому місці                                                                                                          | Відсутність на виробництві                                     |
| Обладнання та інструмент                                 | 0,33                            | Порушення термінів технологічного обслуговування обладнання. Порушення термінів перевірки чи калібрування інструменту | Невідповідність типу обладнання та інструменту вимогам технологічних процесів. Невідповідність стану обладнання та інструменту вимогам | Відсутність необхідного обладнання чи інструменту              |
| Виробниче середовище                                     | 0,25                            | Незначні невідповідності виробничого середовища                                                                       | Невідповідність виробничих приміщень вимогам технологічного процесу                                                                    | Відсутність необхідних виробничих приміщень                    |
| Персонал                                                 | 0,27                            | Порушення термінів і планів технічного навчання та контролю знань                                                     | Незначні невідповідності по кількості чи кваліфікації персоналу                                                                        | Недостатня кількість персоналу та невідповідність кваліфікації |

Інтегральна оцінка ремонтних позицій розраховується як

$$R = \sum_{k=1}^4 \gamma_k \sum_{i=1}^p \lambda_i x_i, \quad (2)$$

де  $\lambda_i$  – показник, що характеризує ступінь впливу невідповідності на технологічний процес ремонту;  $x_i$  – коефіцієнт вагомості технологічних процесів ремонту, при яких допускаються невідповідності;  $p$  – кількість невідповідностей, що були допущені на ремонтній пози-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ції за певним компонентом;  $\gamma_i$  – коефіцієнт вагомості компонента ремонтного виробництва.

Коефіцієнти вагомості технологічних процесів ремонту визначались з урахуванням їх показників значимості, отриманих у [4].

Після отримання інтегральних оцінок невідповідностей ремонтних позицій (2), виникає необхідність їх агрегування, але вже з урахуванням значимості різних вузлів, що ремонтуються.

Оцінку значимості вузлів локомотивів доцільно здійснювати з точки зору ризик-орієнтованого підходу, відповідно до значимості їх відмов в експлуатації. Оскільки ці дані залежать від особливостей конструкції вузлів локомотивів і ряду зовнішніх факторів, їх оцінка в загальному вигляді некоректна. Для даної роботи використовувалися результати експертного ранжування вузлів тепловозів та електровозів базових серій українських залізниць [6]. Використовуючи дані ранжування вузлів локомотивів, вагові коефіцієнти їх значимості визначалися за правилом Фішберна [16].

З огляду на обраний спосіб скаляризації критеріїв (2), обчислені вагові коефіцієнти показників загальний рівень невідповідності виробництва з ремонту локомотивів набуде вигляду потрійної адитивної згортки:

$$K_d = \sum_{j=1}^n \alpha_j \sum_{k=1}^m \gamma_k \sum_{i=1}^p \lambda_i x_i, \quad (3)$$

де  $\alpha_j$  – коефіцієнт вагомості значимості вузла локомотива, при ремонті якого допускається невідповідність.

Отриманий показник може змінюватися в межах від 0 до 1. Отже, для визначення показника відповідності ремонтного виробництва можна використовувати вираз:

$$K_c = 1 - K_d = 1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j \sum_{k=1}^m \gamma_k \sum_{i=1}^p \lambda_i x_i. \quad (4)$$

Визначений показник характеризує загальний рівень відповідності ремонтного виробництва, причому, чим вище його значення, тим вище ступінь відповідності.

## Результати

За розробленою методикою проводилась оцінка рівня відповідності ЛРВ українських залізниць. Аналіз результатів оцінки (табл. 2) показує, що обстежені виробництва різняться за рівнем відповідності, а комплексний показник  $K_c$  лежить у межах 0,6...0,87. Відсутність суттєвих відмінностей значень  $K_c$  виробництв з ремонту тепловозів та електровозів пояснюється індивідуальним підходом при визначенні коефіцієнтів вагомості значимості  $\alpha_j$  вузлів різних локомотивів.

У теперішній час стан ремонтного виробництва є основним чинником, що обумовлює надійність локомотивів в експлуатації, тому підтвердження адекватності отриманого коефіцієнту невідповідності ремонтного виробництва можливе за рахунок визначення його зв'язку з технічним станом локомотивів.

В умовах використання недосконалих форм реєстрації відмов та пошкоджень локомотивів, неможливості відстеження збільшення обсягу робіт при планових видах ремонту через низький технічний стан локомотивів найбільш об'єктивним показником, що відображає стан локомотивів, є витрати на їх утримання.

Зважаючи на різний термін експлуатації та технічний стан локомотивів різних серій, витрати приводилися у вигляді питомого показника (коефіцієнту перевитрат  $S_{ПВ}$ ):

$$S_{ПВ} = \frac{S_{П}}{S_{Ф}}, \quad (5)$$

де  $S_{П}$  – планові витрати на утримання локомотива на рік, тис. грн.;  $S_{Ф}$  – фактичні витрати на утримання локомотива на рік, тис. грн.

На основі поля кореляції висувалася гіпотеза, що характер зв'язку між значеннями  $K_c$  та  $S_{ПВ}$  має експоненціальний характер (рис. 1).

Після визначення параметрів регресії методом найменших квадратів, були отримані регресійні моделі для виробництв з ремонту тепловозів (6) та електровозів (7):

$$S_{ПВ}^m = 7,11 \cdot e^{-1,884 K_c}; \quad (6)$$

$$S_{ПВ}^e = 3,87 \cdot e^{-1,352 K_c}. \quad (7)$$

Таблиця 2

**Значення показника рівня відповідності локомотиворемонтних  
виробництв українських залізниць**

Table 2

**Compliance level figure of locomotive repair  
production at Ukrainian railways**

| Показник рівня відповідності $K_c$<br>виробництва з ремонту | Локомотиворемонтне виробництво |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                             | 1                              | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| тепловозів                                                  | 0,61                           | 0,64 | 0,67 | 0,7  | 0,71 | 0,77 | 0,79 | 0,83 | 0,84 | 0,86 |
| електровозів                                                | 0,6                            | 0,62 | 0,66 | 0,68 | 0,71 | 0,73 | 0,79 | 0,81 | 0,82 | 0,87 |

Статистична значимість рівнянь перевірена за допомогою коефіцієнта детермінації та критерію Фішера. Коефіцієнти детермінації склали значення 0,79 та 0,73 відповідно. Тобто рівняння регресії пояснюють 79 % та 73 % варіації коефіцієнту перевитрат на утримання локомотивів варіацією коефіцієнту відповідності виробництва.

Це вказує на високу точність підбору рівнянь регресії та добре узгоджується з тими фактами, що причинами відмов локомотивів в експлуатації в 60 – 70 % випадків є невідповідності ремонтних виробництв.

Отримані значення коефіцієнтів еластичності вказують, що збільшення коефіцієнта відпо-

відності ремонтного виробництва на 1 %, призведе до зменшення витрат на 1,88 % на утримання тепловозів та на 1,35 % на утримання електровозів. Що підтверджує адекватність обраної методики оцінки рівня відповідності локомотиворемонтного виробництва.

З використанням F-критерію встановлено, що отримані рівняння регресії є статистично значимими ( $F^T = 32,38$ ,  $F^e = 20,36$ ,  $F_{\text{табл}} = 5,32$ ,  $F^T > F_{\text{табл}}$ ,  $F^e > F_{\text{табл}}$ ).

Отримані результати доводять, що коефіцієнт відповідності ремонтного виробництва здійснює значний вплив на перевитрати на технічне утримання локомотивів, що характеризує їх технічний стан.

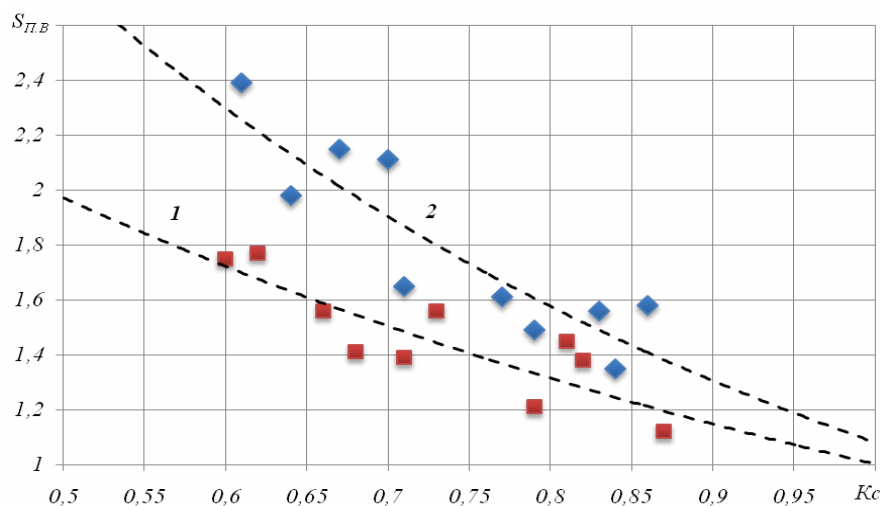


Рис. 1. Визначення характеру зв'язку між коефіцієнтами ремонтного виробництва:  
1 – електровозів; 2 – тепловозів

Fig. 1. Determination the bond character between the coefficients of repair production:  
1 – electric locomotives; 2 – diesel locomotives

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Наукова новизна та практична значимість**

Розроблена методика оцінки відповідності технічного рівня локомотиворемонтного виробництва на основі лінгвістичних експертних тверджень, з урахуванням впливу виду виявлених невідповідностей, типу технологічного процесу, виду вузла локомотива та виду компонента технічного рівня виробництва.

Застосування розробленої методики дозволить реально оцінювати значимість виявлених невідповідностей, впорядкувати усунення невідповідностей згідно їх пріоритетності та підвищити ефективність капіталовкладень у ремонтне виробництво. Отримані регресійні рівняння дозволять нормувати показник відповідності

та прогнозувати перевитрати на утримання локомотивів за результатами обстеження ремонтних виробництв.

**Висновки**

У результаті проведеної роботи була запропонована методика оцінки відповідності ремонтного виробництва локомотивів вимогам нормативної документації, яка базується на використанні комплексного показника рівня відповідності у вигляді потрійної адитивної згортки з трьома коефіцієнтами вагомості. Кореляційно-регресійний аналіз комплексних показників ремонтних виробництв та перевитрат на утримання локомотивів підтверджує адекватність запропонованого підходу.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Боднар, Б. Е. Моделирование технологий ремонта технических объектов / Б. Е. Боднар // Вестн. нац. трансп. ун-та и трансп. акад. Украины. – Киев, 2002. – Вып. 6. – С. 10–14.
2. Боднар, Б. Є. Обґрунтування критерію ефективності функціонування ремонтного підрозділу депо промислового підприємства / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : тез. 72 міжнар. наук.-практ. конф. (19.04–20.04.2012) / М-во інфраструктури України, Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 12.
3. Боднар, Б. Є. Структурно-функціональний аналіз системи ремонту рухомого складу промислових підприємств / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, Р. О. Коренюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 70–79.
4. Дацун, Ю. М. Визначення ступеню впливу технологічних процесів ремонту на справність вузлів тягового рухомого складу / Ю. М. Дацун // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 1/7 (79). – С. 56–61. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59878.
5. Дацун, Ю. М. Дослідження складових організаційно-технічного рівня локомотиворемонтного виробництва на основі когнітивних карт / Ю. М. Дацун // Зб. наук. пр. Укр. держ. ун-ту залізн. трансп. – Харків, 2016. – Вип. 160. – С. 105–111.
6. Дацун, Ю. М. Оцінка параметрів відмов вузлів локомотивів при визначенні їх системи технічного обслуговування та ремонту / Ю. М. Дацун // Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті : тез. 77 міжнар. наук.-техн. конф. (21.04–23.04.2015) / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т залізн. трансп. – Харків, 2015. – С. 69.
7. Контроль технологической дисциплины как условие стабильности производственного процесса / Ю. М. Фартышев, М. М. Кузнецов, А. К. Гаутцель, В. Ю. Языков // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – № 3. – С. 214–218.
8. Положення з атестації підприємств з обслуговування та ремонту тягового рухомого складу : ЦТ-0162 : затв. наказом Держ. адмін. залізн. трансп. України від 10.10.2007 р. – Київ : Укрзалізниця, 2007. – 244 с.
9. Рекомендации. Контроль технологической дисциплины. Общие положения : Р 50-609-48-88. – Введ. 1989-09-29. – Горький : Горьковский филиал ВНИИ по нормализации в машиностроении, 1989. – 44 с.
10. Methodology for Optimizations of Business Processes in Macedonian Railways – Transport in the Republic of Macedonia / E. Mitreva, E. Nikolov, B. Nikolova, N. Taskov, N. Dimitrov // Mediterranean J. of Social Sciences. – 2016. – Vol. 7. – No. 3 S1. – P. 394–402. doi: 10.5901/mjss.2016.v7n3s1p394.
11. Mikosa, W. Knowledge Sharing and Reuse in Potential Failure Mode and Effects Analysis in the Manufacturing and Assembly Processes (PFMEA) Domain / W. Mikosa, J. Ferreira // Complex Systems Concurrent Engineering : Conf. Proc. – London, 2007. – P. 461–468. doi: 10.1007/978-1-84628-976-7\_51

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

12. Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches / J. Branke, K. Deb, K. Miettinen, R. Slowinski. – Berlin : Springer, 2008. – 470 p.
13. Rachieru, N. Improvement of Process Failure Mode and Effects Analysis using Fuzzy Logic / N. Rachieru, N. Belu, D. C. Anghel // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 371. – P. 822–826. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.371.822.
14. Rail Transport – Systems Approach / A. Śladowski (Ed.). – Cham : Springer International Publishing AG, 2017. – 466 p. doi: 10.1007/978-3-319-51502-1.
15. Stadler, W. Multicriteria optimization in engineering and in the sciences / W. Stadler. – New York : Plenum Press, 1988. – 405 p.
16. Fishburn, P. C. Utility Theory for Decision Making / P. C. Fishburn. – New York : Wiley, 1970. – 246 p.
17. Zhang, H. Research on the Measurement of Enterprise Technological Innovation Capability Model based on Information Axiom / H. Zhang // Intern. J. of Multimedia and Ubiquitous Engineering. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 7. – P. 319–332. doi: 10.14257/ijmue.2014.9.7.27.

Ю. Н. ДАЦУН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Експлуатація і ремонт подвижного складу», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел +38 (057) 730 19 99, тел. +38 (050) 401 64 43, ел. пошта gem-locomot@gmail.com, ORCID 0000-0002-5794-1528

## ОЦЕНКА УРОВНЯ СООТВЕТСТВИЯ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Цель.** Проверки и обследования технического уровня локомотиворемонтных производств железных дорог проводятся представителями руководящего состава Департамента и службы локомотивного хозяйства, ревизорского аппарата, экспертными группами в рамках аттестации производства. Выявленные нарушения фиксируются в виде лингвистических экспертных утверждений, которые не позволяют оценивать их значимость и эффективно определять приоритетность устранения. Поэтому целью научной работы является разработка методики оценки соответствия локомотиворемонтного производства требованиям нормативной документации с определением показателя уровня соответствия. **Методика.** При формализации лингвистических утверждений о несоответствии ремонтного производства учитывается влияние ряда факторов, значимость которых определялась путем экспертной оценки, формализованными моделями развития событий при построении и анализе «дерева отказов». Для вычисления показателя уровня соответствия предлагается применение тройной аддитивной свертки с коэффициентами весомости. Исследование взаимосвязи интегрального показателя с расходами на содержание локомотивов проводилось методами корреляционно-регрессионного анализа. **Результаты.** Анализ результатов проверок и обследований технического уровня локомотиворемонтных производств показал схожую структуру экспертных утверждений несоответствий, что позволило представить их в виде вектора. При преобразовании многокритериальной задачи в однокритериальную был применен наиболее объективный метод взвешенной суммы. Рассчитаны показатели соответствия по результатам обследования ряда локомотиворемонтных производств. В результате корреляционно-регрессионного анализа доказано влияние показателя соответствия ремонтного производства на перерасход для содержания локомотивов. **Научная новизна.** Разработана методика оценки соответствия технического уровня локомотиворемонтного производства на основе лингвистических экспертных утверждений с учетом влияния вида выявленного несоответствия, типа технологического процесса, вида узла локомотива и вида компонента технического уровня производства. **Практическая значимость.** Применение разработанной методики позволит реально оценить значимость выявленных несоответствий, упорядочить устранение несоответствий согласно приоритетности и повысить эффективность капиталовложений в ремонтное производство. Полученные регрессионные уравнения позволят нормировать показатель соответствия и прогнозировать перерасход на содержание локомотивов по результатам обследования ремонтных производств.

**Ключевые слова:** локомотиворемонтное производство; локомотив; уровень; показатель; соответствие; узел; технологический процесс; эксперт; значимость

Y. M. DATSUN<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Maintenance and Repair of Rolling Stock», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 19 99, tel. +38 (050) 401 64 43, e-mail remlocomot@gmail.com, ORCID 0000-0002-5794-1528

## CONFORMANCE RATING FOR LOCOMOTIVE REPAIR PRODUCTIONS

**Purpose.** Inspection and observation of the technical level of rail locomotive repair productions are conducted by the management team of the Department and the Locomotive division, audit sectors, expert groups within the production certification procedure. The faults revealed are fixed as linguistic expert reports which cannot assess their significance and identify priorities in terms of elimination. The paper aimed the development of methods for the conformance rating for locomotive repair production to legal requirements with conformance level determination. **Methodology.** Formalization of linguistic reports on the locomotive repair facility conformance takes into account the influence of a whole number of factors, their significance being determined by the expert assessment, formalized models of events when designing and analyzing the fault tree. In order to calculate the conformance, index the triple additive convolution with the weight coefficient is proposed. Investigation into interrelation between the integral index and the locomotive maintenance costs was conducted by methods of the correlation and regression analysis. **Findings.** The analysis of results of inspection and observation of the technical level of locomotive repair productions demonstrated a similar structure of expert reports on faults, which made it possible to present them as a vector. While transforming a multi-criterion problem into a single-criterion one of the most objective method, the weighted sum method, was applied. The conformance indices were calculated according to the results of observations on several locomotive repair productions. The correlation and regression analysis proved the influence of the conformance index of locomotive repair productions on locomotive maintenance overconsumption. **Originality.** The conformance rating methods for a technical level of locomotive repair productions based on linguistic expert reports which consider type of the fault detected, type of the technological process, type of the locomotive unit and type of the technical level of production have been designed. **Practical value.** Implementation of the methods designed will help undertake assessment of the faults detected, eliminate them according to the priority and invest more effectively in locomotive repair productions. The regressive equations obtained allow standardizing the conformance index and forecasting possible locomotive maintenance overconsumption by the results of inspection at repair productions.

**Keywords:** locomotive repair production; locomotive; level; index; conformance; unit; technological process, expert, significance

## REFERENCES

1. Bodnar, B. Y. (2002). Modelirovaniye tekhnologiy remonta tekhnicheskikh obektov. *Vestnik natsionalnogo transportnogo universiteta i Transportnoy akademii Ukrainy*, 6, 10-14.
2. Bodnar, B. Y., & Kapitsa, M. I. (2012). Obhruntuvannya kryteriiu efektyvnosti funktsionuvannya remontnoho pidrozdilu depo promyslovoho pidpriemstva. *Abstracts of the 72 International Scientific & Practical Conference "The problems and prospects of railway transport development"*, Dnepropetrovsk, April 19-20, 2012. (pp. 12). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan
3. Bodnar, B. E., Kapitsa, M. I., & Korenyuk, R. A. (2012). Structural-functional analysis of rolling stock repair of industrial enterprises. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 42, 70-73.
4. Datsun, Y. M. (2016). Determination of the degree of influence of repair processes on serviceability of units of the traction rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (7) (79), 56-61. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59878
5. Datsun, Y. M. (2016). Research of the elements of the organizational-technical level of locomotive repair productions based on cognitive maps. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 160, 105-111.
6. Datsun, Y. M. (2015). Otsinka parametriv vidmov vuzliv lokomotyviv pry vyznachenni yikh systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya ta remontu. *Abstracts of the 77 International Conference «The development of*

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- research and innovation in transport», Kharkiv, April 21-23, 2015. (pp. 69). Kharkiv: Ukrainian State University of Railway Transport.*
7. Fartyshev, Y. M., Kuznetsov, M. M., Gauttsel, A. K., & Yazykov, V. Y. (2015). Control of technological discipline as a condition for the stability of the production process. *Interexpo Geo-Siberia*, 3, 214-218.
  8. Ukrzaliznytsia. (2007). *Polozhennia z atestatsii pidpriemstv z obsluhovuvannia ta remontu tiahovoho rukhomoho skladu TsT-0162*. Kyiv: Ukrzaliznytsia.
  9. Rekomendatsii. Kontrol tekhnologicheskoy distsipliny. Obshchiye polozheniya. R 50-609-48-88. (1989). Gorky: Gorky branch of the Institute for normalization in mechanical engineering.
  10. Mitreva, E., Nikolov, E., Nikolova, B., Taskov, N., & Dimitrov, N. (2016). Methodology for Optimizations of Business Processes in Macedonian Railways – Transport in the Republic of Macedonia. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 7(3 S1), 394-402. doi: 10.5901/mjss.2016.v7n3s1p394
  11. Mikosa, W., & Ferreira, J. (2007). Knowledge Sharing and Reuse in Potential Failure Mode and Effects Analysis in the Manufacturing and Assembly Processes (PFMEA) Domain. In G. Loureiro, & R. Curran (eds.), *Complex Systems Concurrent Engineering* (pp. 461-468). London: Springer. doi: 10.1007/978-1-84628-976-7\_51
  12. Branke, J., Deb, K., Miettinen, K., & Slowinski, R. (2008). *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*. Berlin: Springer.
  13. Rachieru, N., Belu, N., & Anghel, D. (2013). Improvement of Process Failure Mode and Effects Analysis using Fuzzy Logic. *Applied Mechanics and Materials*, 371, 822-826. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.371.822
  14. Ślaskowski A. (Ed.). (2017). Rail Transport – Systems Approach. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 87). Cham: Springer International Publishing AG. doi 10.1007/978-3-319-51502-1
  15. Stadler, W. (1988). *Multicriteria optimization in engineering and in the sciences*. New York: Plenum Press.
  16. Fishburn, P. C. (1970). *Utility Theory for Decision Making*. New York: Wiley.
  17. Zhang, H. (2014). Research on the Measurement of Enterprise Technological Innovation Capability Model based on Information Axiom. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 9(7), 319-332. doi: 10.14257/ijmue.2014.9.7.27

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Г. Пузиром (Україна); д.т.н., проф. Б. Є. Боднаром (Україна)

Надійшла до редколегії: 16.02.2017

Прийнята до друку: 18.05.2017

## УДК 625.032.5:531.311:629.423.1

А. Я. КУЗИШИН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Львівський НДІ судових експертиз, вул. Липинського, 54, Львів, Україна, 79024, тел. +38 (032) 231 76 13, тел. +38 (032) 231 70 61, ел. пошта kuzyshyn1993@gmail.com, ORCID 0000-0002-3012-5395

## ВИЗНАЧЕННЯ РАМНОЇ СИЛИ ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ80 ПРИ РУСІ НА КРИВИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ

**Мета.** При русі локомотивів на кривих ділянках залізничної колії виникають поперечні горизонтальні сили, які призводять до притиснення гребеня колісної пари до головки рейки. Використовуючи існуючу методику розрахунку бокової сили, необхідно розробити метод визначення рамної сили, що діє на візок зі сторони кузова секції локомотива. Також потрібно встановити основні параметри, які мають вплив на величину рамної сили. Змінюючи ці параметри, побудувати залежності сили від часу руху електровоза по відповідній кривій. **Методика.** Представимо електровоз як багатомасову механічну систему з семи тіл: кузова, двох рам візків та чотирьох колісних пар. Для визначення бокової сили, яка діє від колісної пари на рейку, потрібно вирішити диференціальні рівняння руху локомотивного візка по кривим малого радіуса. За допомогою рівнянь кінестатики для колісної пари візка перейти до визначення рамної сили, яка діє на візок зі сторони кузова секції локомотива. У розрахунках приймаються номінальні геометричні та масові параметри вузлів і деталей електровоза. Радіус кривої, довжина перехідної кривої, довжина кругової кривої, позовжній ухил рейкової колії та інші параметри приймаються сталими величинами. **Результати.** Отримані розрахункові значення величини рамної сили електровоза ВЛ80, яка діє на візок зі сторони кузова секції локомотива. На основі отриманих результатів були побудовані залежності рамної сили від часу руху електровоза по відповідній кривій при зміні швидкості руху та відповідному підвищенні зовнішньої рейкової нитки. **Наукова новизна.** На основі існуючої методики розрахунку бокової сили розроблений метод визначення рамної сили, яка діє на візок зі сторони кузова секції локомотива. **Практична значимість.** Удосконалення методу визначення рамної сили підвищує точність розрахунків при аналізі безпеки руху та при проведенні судових залізнично-транспортних експертиз.

**Ключові слова:** рамна сила; колісна пара; електровоз; рейкова колія; кругова крива; перехідна крива; візок; підвищення зовнішньої рейки

## Вступ

Взаємодія колії та рухомого складу залізниць є однією з найважливіших проблем залізничного транспорту [1–4]. При русі локомотивів по кривих ділянках залізничної колії виникають поперечні горизонтальні сили, які призводять до притиснення гребеня колісної пари до головки рейки. При цьому відбувається знос рейки і гребеня колісної пари локомотива.

Об'єктом даного дослідження є двовісний візок електровоза ВЛ80. Двовісний візок електровоза, що експлуатується на залізницях України, має жорстку раму [10]. Кузов секції електровоза опирається на рами візків завдяки колісковому підвішуванню, а позовжній зв'язок кузова з рамою візка здійснюється через кульову опору. Цим забезпечується можливість реалізації малих зміщень рами візка відносно

кузова у площині, яка паралельна площині рейкової колії, а саме можливість поперечного зміщення центру рами і повороту рами відносно цього центру. Колісні пари візка сполучені з рамою пружними шарнірно-повідковими зв'язками. Дані зв'язки дозволяють позовжнім осям колісних пар здійснювати незалежні, один від одного малі, поступальні переміщення і малі повороти відносно рами візка в площині, яка паралельна площині рейкової колії.

Найбільш повне трактування поняття рамної сили викладено в роботах М. Ф. Веріго [6], О. П. Ершкова [8], М. А. Чернишева [12] і Г. М. Шахунянца [13]. Викладемо суть цих трактувань, використовуючи єдині позначення.

Трактування О. П. Ершкова.

«Силу, которую надо приложить к раме для преодоления действия сил трения ненабегающих колес, называют рамной силой  $Y_p$ . Силу

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$Y_p$  можна розкласти на две боковые силы: действующую на наружный рельс и внутренний рельс».

Трактування М. Ф. Веріго.

«Боковые силы, воспринимаемые колесами одной колесной пары, передаются раме тележки. Равнодействующую боковых сил, воспринимаемых колесами одной колесной пары, называют рамной силой. В зависимости от направления поперечной силы, действующей по поверхности катания колеса по рельсу, вызванная их взаимным проскальзыванием, рамная сила  $Y_p = Y_o + F'_r$  или  $Y_p = Y_o - F'_r$ ».

Трактування Г. М. Шахунянца.

«Рамной силой  $Y_p$  называется поперечная сила, передаваемая рамой экипажа через колесную пару на рельс (в том числе и сила инерции, развиваемая самой колесной парой). Она равна разности боковых сил, передаваемых одной и той же осью на наружную и внутреннюю рельсовые нити».

Трактування М. А. Чернишева.

«При движении экипажей в прямых участках пути возникают боковые силы, связанные с влиянием подвижного состава. Силы, действующие на кузов, передаются через раму экипажа на колесные пары. Эти силы называются рамными».

Що ж стосується трактування поняття «рамна сила», то в приведених вище роботах є деякі розбіжності.

У роботах [6, 12–14] бокова сила  $Y_o$  розглядається як функція направляючої сили і поперечної сили тертя ковзання. Іншими словами, бокова сила – це алгебраїчна сума сил  $Y$  і  $F'_r$  одного і того ж колеса. Якщо колісна пара знаходиться попереду центру повороту візка, то для колеса, яке рухається по зовнішній рейці кривої, бокова сила визначається виразом [13]:

$$Y_{o,n} = Y - F'_r. \quad (1)$$

Для колеса, яке рухається по внутрішній рейці кривої, бокова сила визначається виразом [13]:

$$Y_{o,b} = F'_r. \quad (2)$$

Різниця бокових сил, що передаються одні-

єю і тією ж колісною парою на зовнішні і внутрішні рейки колії, кількісно дорівнює рамній силі  $Y_p$ . Для випадку, коли колісна пара знаходиться попереду центру повороту візка, згідно (1) і (2) маємо [13]:

$$Y_{o,n} - Y_{o,b} = Y - 2F'_r = Y_p \quad (3)$$

У роботі [8] рамна сила розглядається як функція направляючої сили і поперечних до осі колії сил тертя ковзання. Дані сили виникають на зовнішній і внутрішній рейках. Якщо колісна пара знаходиться попереду центра повороту візка, рамна сила дорівнює:

$$Y_p = Y - 2F'_r \quad (4)$$

Бокова ж сила розглядається як функція рамної сили. Згідно [8] бокова сила, яка діє на зовнішню рейку колії, дорівнює:

$$Y_{o,n} = Y_p - F'_r. \quad (5)$$

Бокова сила, яка діє на внутрішню рейку колії, буде визначатися за виразом:

$$Y_{o,b} = F'_r. \quad (6)$$

Згідно з [8] різниця бокових сил дорівнює:

$$Y_{o,n} - Y_{o,b} = Y_p - F'_r - F'_r = Y_p - 2F'_r. \quad (7)$$

При цьому сума бокових сил дорівнює:

$$Y_{o,n} + Y_{o,b} = Y_p - F'_r + F'_r = Y_p. \quad (8)$$

Таким чином, рамна сила, визначена одним і тим же аналітичним виразом (3) і (4), в одному випадку трактується як різниця бокових сил (3), а в другому випадку – як сума бокових сил (8). Порівняння виразів (3) і (7) призводить до висновку, що поняття «різниця бокових сил» в одному з випадків трактується неправильно.

На основі вищевикладених теоретичних положень були запропоновані практичні формули для визначення рамних сил  $Y_p$ .

Згідно з [8] рамна сила, яка діє на першу за напрямком руху колісну пару електровоза ВЛ80, визначається виразом:

$$Y_p = 25 + 25 \cdot \left( \frac{v^2}{R} - \frac{h_0}{S} g \right). \quad (9)$$

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Згідно [6] рамна сила визначається виразом:

$$Y_p = 7,5 + 28 \cdot \left( \frac{v^2}{R} - \frac{h_0}{S} g \right), \quad (10)$$

де  $v$  – швидкість руху центру мас екіпажа (поїзда), м/с;  $R$  – радіус кривої, м;  $h_0$  – підвищення зовнішньої рейки, м;  $S$  – відстань між осями симетрії поперечних перерізів рейок рейкової колії, м;  $g$  – прискорення вільного падіння.

При цьому вираз  $\left( \frac{v^2}{R} - \frac{h_0}{S} g \right)$  у залізнично-транспортній літературі називають непогашеним поперечним прискоренням і позначають  $a_{н.п}$ .

Згідно [6, 15] вираз (10) рекомендується використовувати для  $a_{н.п}$  в межах від  $-0,5$  м/с<sup>2</sup> до  $+0,7$  м/с<sup>2</sup>, а згідно [8, 12] вираз (9) рекомендується використовувати для  $a_{н.п}$  в межах від  $-0,5$  м/с<sup>2</sup> до  $+0,1$  м/с<sup>2</sup>.

При цьому у вказаних межах  $a_{н.п}$  може приймати і нульові значення.

Прирівнявши вираз  $\left( \frac{v^2}{R} - \frac{h_0}{S} g \right)$  до нуля, знайдемо швидкість  $v^*$ , при якій поперечне прискорення повністю погашається ( $a_{н.п} = 0$ ):

$$v^* = \sqrt{\frac{R \cdot h_0}{S} g}. \quad (11)$$

У випадку, коли підвищення зовнішньої рейки дорівнює нулю ( $h_0 = 0$ ), швидкість  $v^*$  також буде дорівнювати нулю. Це відповідає стану спокою екіпажу. Проте і в стані спокою екіпажу згідно (9) маємо:

$$Y_p = 25 \text{ кН},$$

а згідно (10)

$$Y_p = 7,5 \text{ кН}.$$

На мій погляд, у стані спокою екіпажу ( $v = 0$ ,  $h_0 = 0$ ) рамна сила повинна дорівнювати нулю.

### Мета

Використовуючи існуючу методику розрахунку бокової сили, розробити метод визначен-

ня рамної сили, яка діє на візок зі сторони кузова секції локомотива.

### Методика

**Постановка задачі.** Об'єктом дослідження є типовий двовісний візок електровоза ВЛ80, який рухається зі встановленою швидкістю на кривій ділянці колії з відповідним підвищенням зовнішньої рейкової нитки. Необхідно визначити та проаналізувати величину рамної сили, яка виникає при русі локомотивного візка.

**Розв'язок задачі.** Як відомо, електровоз представляє собою багатомасову механічну систему. Будемо рахувати, що вказана система складається із семи тіл: кузова, двох рам візків та чотирьох колісних пар.

Статичні або динамічні сили, які діють на кузов електровоза, передаються на рами візків. З рами візків дані сили передаються на колісні пари, а з колісних пар на рейки колії.

Передача вказаних сил від кузова на рами візків відбувається у точках їх взаємодії завдяки колісковому підвішуванню. У колісковому підвішуванні виникають сили, які діють як у вертикальній, так і в горизонтальній площині. При цьому в горизонтальній площині сили діють вздовж і поперек рейкової колії.

Для знаходження аналітичних виразів, за допомогою яких визначаються вертикальні та горизонтальні навантаження на раму візка, потрібно скористатися принципом Германа-Ейлера-Даламбера і принципом звільнення твердого тіла від зв'язків. При цьому коліскове підвішування необхідно замінити віртуальною кульовою опорою, зберігаючи всі його характеристики.

Згідно з цими принципами рух кожного тіла механічної системи формально приводиться до стану рівноваги (до задачі статики). Для цього кожне тіло механічної системи звільняється від зв'язків, а їх дія замінюється реакціями. Потім до тіла прикладаються всі діючі на нього зовнішні сили і сили інерції. Після цього складаються рівняння рівноваги статики, вирішення яких і дозволить визначити невідомі реакції.

Для вирішення поставленої задачі потрібно послідовно розглянути:

1) сили, які діють на візок зі сторони кузова секції локомотива;

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

2) активні сили і сили інерції локомотивного візка;

3) сили, які діють на локомотивний візок зі сторони рейкової колії;

4) розрахункову схему візка – для визначення дії сили на колісну пару.

При розрахунку сил, які діють на візок зі сторони кузова секції локомотива, основна увага приділялась визначенню активних сил, відцентрової сили інерції, моменту сил інерції від кутового прискорення, поперечних та вертикальних сил, які передаються на кузов від відповідних візків, моментів пар сил відносно осей  $x$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ .

Активними силами, які діють на кузов секції, являються сила ваги кузова  $P_k$  і сила тяги секції  $Q$ . Знаючи силу  $Q$ , можна визначити величину поздовжньої сили, яка виникає у автозчепі секції:

$$Q_1 = Q \cdot (j-1); Q_2 = Q \cdot j, \quad (12)$$

де  $j$  – кількість секцій локомотива.

Відцентрова сила, яка діє в круговій кривій радіусом  $\rho_0$ , є величиною постійною і дорівнює:

$$F_{\kappa}^{\text{цб}} = P_{\kappa} \cdot v^2 / g \cdot \rho_0. \quad (13)$$

У перехідній кривій модуль відцентрової сили інерції змінний і визначається за формулою:

$$F_{\kappa}^{\text{цб}} = K_1 \cdot P_{\kappa} \cdot v^2 / g \cdot \rho_0, \quad (14)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;  $K_1$  – коефіцієнт, який враховує збільшення кривизни перехідної кривої;  $v$  – швидкість руху.

При русі локомотива в перехідній кривій з постійною швидкістю на кузов секції діє також момент сил інерції від кутового прискорення.

Величина цього моменту визначається за формулою:

$$M_{zK}^{\text{ин}} = K_2 \cdot J_{zK} \cdot v^2 / q, \quad (15)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт, який враховує вид кривої;  $J_{zK}$  – момент інерції маси кузова секції відносно осі  $z$ ;  $q$  – параметр перехідної кривої.

Активні сили і сили інерції, які діють на ку-

зов секції, показані на розрахункових схемах (рис. 1–3).

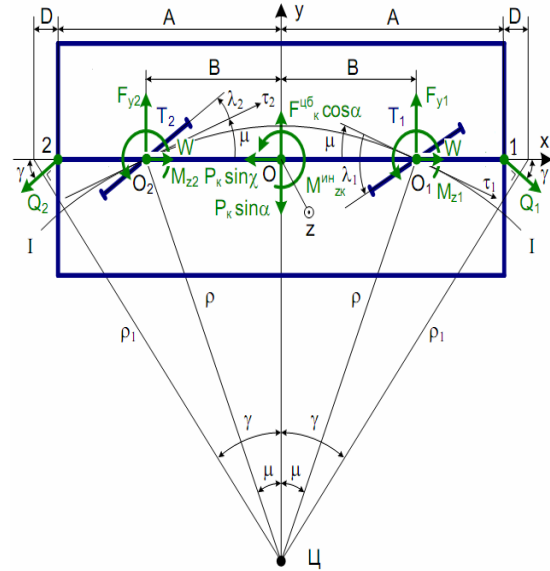


Рис. 1. Проекції сил на площину  $xy$

Fig. 1. Projections of forces on the plane  $xy$

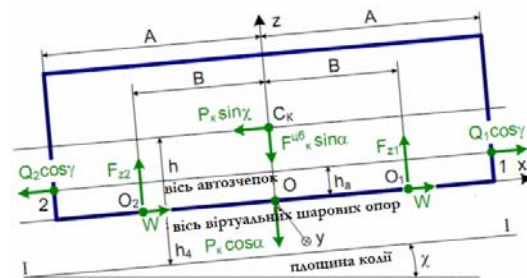


Рис. 2. Проекції сил на площину  $xz$

Fig. 2. Projections of forces on the plane  $xz$

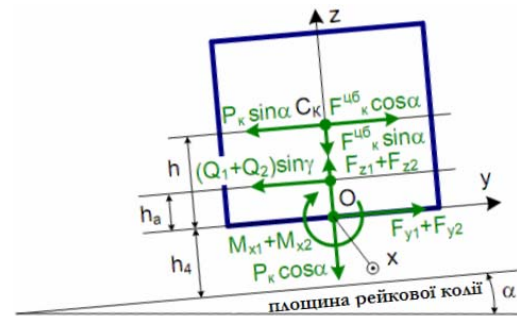


Рис. 3. Проекції сил на площину  $yz$

Fig. 3. Projections of forces on the plane  $yz$

На розрахункових схемах індекс 1 відповідає першому візку, а індекс 2 – другому візку.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Реакціями зв'язків є наступні сили і моменти:

$W$  – сила тяги одного візка, яка прийнята однаковою для всіх візків секції локомотива;

$F_{y1}$  і  $F_{y2}$  – поперечні сили, що передаються на кузов від відповідних візків;

$F_{z1}$  і  $F_{z2}$  – вертикальні сили, що передаються на кузов від відповідних візків;

$M_{x1}$  і  $M_{x2}$  – моменти пар сил відносно осі  $x$ , що передаються на кузов від відповідних візків, у розрахунках прийнято  $M_{x1} = M_{x2} = M_x$ ;

$M_{z1}$  і  $M_{z2}$  – моменти пар сил відносно осей  $z_1$  і  $z_2$ , діючих на кузов від відповідних візків.

Для визначення раніше вказаних параметрів складається шість рівнянь кінетостатики для кузова:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0, \\ Q_1 - Q_2 + 2W - P_k \chi &= 0, \\ \sum F_y &= 0, \\ F_{y1} + F_{y2} + \Delta_K - (Q_1 + Q_2) \gamma &= 0, \\ \sum F_z &= 0, \\ F_{z1} + F_{z2} - P_k - F_k^{\text{пб}} \alpha &= 0, \\ \sum M_x &= 0, \\ -2M_x + (Q_1 + Q_2) \gamma h_a - \Delta_K h &= 0, \\ \sum M_y &= 0, \\ -(F_{z1} - F_{z2}) B + (Q_1 - Q_2) h_a - P_k \chi h &= 0, \\ \sum M_z &= 0, \\ M_{z1} + M_{z2} - (Q_1 - Q_2) \gamma A + (F_{y1} - F_{y2}) B + M_{\text{зк}}^{\text{ин}} &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

У результаті розв'язку системи рівнянь (16) були отримані наступні результати:

$$W = \frac{1}{2}(Q + P_k \chi), \quad (17)$$

$$M_x = \frac{1}{2}[Q \gamma (2j - 1) h_a - \Delta_K h], \quad (18)$$

$$F_{z1} = \frac{1}{2} \left[ -Q \frac{h_a}{B} + P_k \left( 1 - \frac{h}{B} \chi \right) + (F_k^{\text{пб}}) \alpha \right], \quad (19)$$

$$F_{z2} = \frac{1}{2} \left[ Q \frac{h_a}{B} + P_k \left( 1 + \frac{h}{B} \chi \right) + (F_k^{\text{пб}}) \alpha \right], \quad (20)$$

$$F_{y1} = \frac{Q}{2} \left[ \gamma \left( 2j - 1 - \frac{A}{B} \right) - e \frac{h_a}{B^2} \mu \right] - \frac{M_k^{\text{ин}}}{2B} - \frac{e P_k}{2B} \lambda_1 - \frac{\Delta_K}{2}, \quad (21)$$

$$F_{y2} = \frac{Q}{2} \left[ \gamma \left( 2j - 1 + \frac{A}{B} \right) + e \frac{h_a}{B^2} \mu \right] + \frac{M_k^{\text{ин}}}{2B} + \frac{e P_k}{2B} \lambda_1 - \frac{\Delta_K}{2} \quad (22)$$

У структурі реактивних сил звернемо увагу на сили  $F_{y1}$  і  $F_{y2}$ , які виникають у віртуальній кульовій опорі при передачі статичних і динамічних сил від кузова електровоза на раму візка. При цьому вказані сили діють у поперечному до осі колії напрямку. Як зазначалось вище, зі сторони кузова на раму візка передаються ще і вертикальні сили  $F_{z1}$  і  $F_{z2}$ . Проте, на думку ряду авторів, саме до горизонтальних сил  $F_{y1}$  і  $F_{y2}$ , які діють у поперечному до осі колії напрямку, застосовано поняття «рамна сила».

Таким чином, горизонтальну силу, яка діє зі сторони кузова електровоза в поперечному до осі колії напрямі, що передається через віртуальну кульову опору на раму візка, найдоцільніше і назвати рамною силою.

Рамну силу  $F_{y1}$ , яка діє у віртуальних кульових опорах, слід розглядати як рівнодіючу рамних сил, які діють на колісні пари візків.

При розрахунку активних сил і сил інерції локомотивного візка основна увага приділялась визначенню відцентрової сили інерції візка, головного вектора і головного моменту сил інерції у відносних переміщеннях.

Сили інерції візка показані на рис. 4, що запозичений з [7].

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

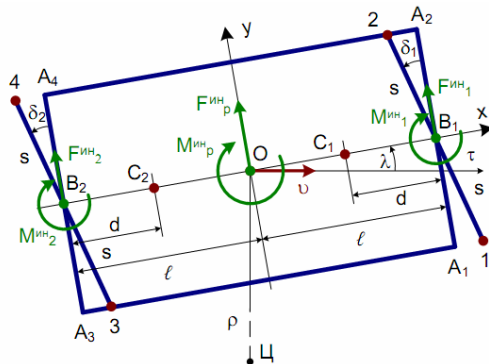


Рис. 4. Сили інерції візка

Fig. 4. Inertia forces of the bogie

Сили інерції відносного руху визначались з урахуванням того, що локомотивний візок не являється жорстко закріпленим об'єктом, а складається не менше як із трьох тіл, які мають малі поступальні і поворотні переміщення відносно один одного. Цими тілами є рама візка і два колісно-моторні блоки (КМБ).

Загальними для всіх тіл візка є два відносні рухи: поворот візка в площині  $xy$  навколо осі  $z$  у перехідних кривих з кутовим прискоренням  $v/q$  і поворот візка в цій же площині з кутовим прискоренням  $\ddot{\lambda}$  навколо осі, яка проходить через точку  $B_1$  і паралельна осі  $z$ . Кожен колісно-моторний блок здійснює ще додатковий поворот відносно рами візка з кутовими прискореннями  $\ddot{\delta}_1$  і  $\ddot{\delta}_2$  відповідно.

Сили інерції рами візка після приведення їх до центру  $O$  характеризуються головним вектором  $F_p^{\text{ин}}$  і головним моментом  $M_p^{\text{ин}}$ :

$$F_p^{\text{ин}} = \frac{P_p}{g} l \ddot{\lambda}_n, \quad (23)$$

$$M_p^{\text{ин}} = -J_{zp} \left( \ddot{\lambda}_n - K_2 \frac{v^2}{q} \right), \quad (24)$$

де  $P_p$  – сила ваги рами візка;  $n$  – номер візка в секції;  $l$  – половина бази візка;  $J_{zp}$  – момент інерції маси рами візка відносно осі  $z$ .

Сили інерції переднього колісно-моторного блоку, після приведення їх до точки  $B_1$ , харак-

теризуються головним вектором  $F_1^{\text{ин}}$  і головним моментом  $M_1^{\text{ин}}$ :

$$F_1^{\text{ин}} = \frac{P_6}{g} \left[ d \left( \ddot{\delta}_1 + \ddot{\lambda}_n - K_2 \frac{v^2}{q} \right) + K_2 l \frac{v^2}{q} \right], \quad (25)$$

$$M_1^{\text{ин}} = J_{zB1} \left( \ddot{\delta}_1 + \ddot{\lambda}_n - K_2 \frac{v^2}{q} \right) + K_2 \frac{P_6}{g} l d \frac{v^2}{q}, \quad (26)$$

де  $P_6$  – сила ваги колісно-моторного блоку;  $J_{zB1}$  – момент інерції маси колісно-моторного блоку відносно осі, яка проходить через точку  $B_1$  паралельно осі  $z$ .

Сили інерції заднього колісно-моторного блоку, після приведення їх до точки  $B_2$ , характеризуються головним вектором  $F_2^{\text{ин}}$  і головним моментом  $M_2^{\text{ин}}$ :

$$F_2^{\text{ин}} = \frac{P_6}{g} \times \left[ -d \left( \ddot{\delta}_2 + \ddot{\lambda}_n - K_2 \frac{v^2}{q} \right) + 2l \ddot{\lambda}_n - K_2 l \frac{v^2}{q} \right] \quad (27)$$

$$M_2^{\text{ин}} = J_{zB2} \left( \ddot{\delta}_2 + \ddot{\lambda}_n - K_2 \frac{v^2}{q} \right) - 2 \frac{P_6}{g} l \ddot{\lambda}_n + K_2 \frac{P_6}{g} l d \frac{v^2}{q} \quad (28)$$

де  $\ddot{\lambda}_n$  – кутове прискорення візка;  $d$  – відстань від центру мас колісно-моторного блоку до поздовжньої осі колісної пари;  $\ddot{\delta}_1$  і  $\ddot{\delta}_2$  – кутові прискорення колісно-моторних блоків відповідно;  $J_{zB2}$  – момент інерції маси колісно-моторного блоку відносно осі, яка проходить через точку  $B_2$  паралельно осі  $z$ .

При розрахунку сил, які діють на локомотивний візок зі сторони рейкової колії, основна увага приділялася визначенню нормальних реакцій рейок на візок, сил в точці контакту гребеня набігаючого колеса з рейкою, дотичних сил крипа в точках контакту з рейками поверхностей кочення колеса.

Визначення сил крипа в контактних точках

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

«колесо-рейка» найбільш часто проводять за методиками С. М. Куценко [9] і Ж. Калкера [16]

У цих методиках сили крипа вважаються пропорційними величинам відповідних крипів. Величина крипа для кожної контактної точки визначається як відношення швидкості пружного просковзування контактної точки колеса до швидкості руху візка. Для подальших розрахунків потрібні формули, які визначають проекції швидкостей контактних точок коліс локомотивного візка при вписуванні якого в криву малого радіуса. Складові цих швидкостей наведені на рис. 5 [5, 7].

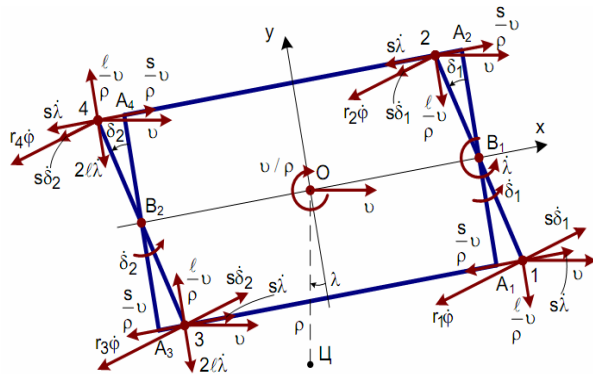


Рис. 5. Швидкості контактних точок коліс візка

Fig. 5. Speeds of contact points of bogie wheels

Згідно з методикою С. М. Куценко, проекції головних векторів сил крипа для кожної колісної пари в поперечному до осі колії напрямку визначаються:

– для передньої колісної пари:

$$F_{y1}^k = 2k^* \left\{ (N - \Delta N') \left( \lambda + \delta_1 + \frac{l}{\rho} \right) \right\} \quad (29)$$

– для задньої колісної пари:

$$F_{y2}^k = 2k^* \left\{ (N + \Delta N') \left[ \left( \lambda + \delta_2 - \frac{l}{\rho} \right) + 2l \frac{\dot{\lambda}}{v} \right] \right\} \quad (30)$$

де  $k^*$  – коефіцієнт крипа для одиничного вертикального навантаження на колесо.

Модулі нормальних реакцій у даній методиці пропонується визначати за формулами:

$$N_{1,2} = N - \Delta N' \pm \Delta N'', \quad (31)$$

$$N_{3,4} = N + \Delta N' \pm \Delta N'', \quad (32)$$

де  $N$  – вертикальне навантаження, яке однаково для всіх коліс візка;  $\Delta N'$  і  $\Delta N''$  – поправки, які враховують вплив на вертикальне навантаження моментів  $M_{xt}$ ,  $M_{yt}$ .

Індекси 1, 2, 3, 4 відповідають номерам точок контакту «колесо-рейка» на розрахунковій схемі візка рис. 4.

При визначенні бокової сили в точці контакту гребеня з рейкою будемо розглядати диференціальні рівняння руху локомотивного візка по кривій малого радіусу. Розрахункова схема візка представлена на рис. 6.

Рівняння кінестатики для візка мають вигляд:

$$\sum F_x = 0; \quad F_{xt} + F_{xt}^k + G \cdot f = 0; \quad (33)$$

$$\sum F_y = 0; \quad F_{yt} + F_{yt}^k - G = 0; \quad (34)$$

$$\sum M_o = 0;$$

$$M_{zt} + M_{zt}^k - G \cdot [l - s \cdot (\delta_1 - f)] = 0, \quad (35)$$

де  $F_{xt}$ ,  $F_{yt}$  – проекції на осі  $x$  і  $y$  головного вектора активних сил і сил інерції візка;  $F_{xt}^k$ ,  $F_{yt}^k$  – проекції на ті ж осі головного вектора сил крипа візка;  $M_{zt}$ ,  $M_{zt}^k$  – головний момент активних сил та сил інерції візка і головний момент сил крипа візка;  $G$  – проекція на площину  $xy$  нормальної реакції рейки на гребінь колеса;  $f$  – коефіцієнт тертя гребеня з рейкою приведений до площини  $xy$ .

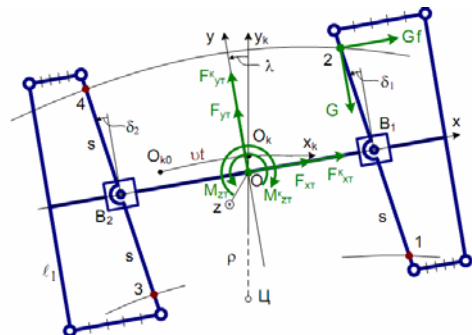


Рис. 6. Розрахункова схема локомотивного візка

Fig. 6. The calculation model of the locomotive bogie

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

З рівняння (34) визначається бокова сила притиснення гребня на рейку, яка дорівнює по модулю реакції рейки  $G$ :

$$G = D_1 \cdot \ddot{\lambda} + D_2 \cdot \ddot{\delta}_1 + D_3 \cdot \ddot{\delta}_2 + D_4 \cdot \dot{\lambda} + D_5 \cdot \dot{\delta}_1 + D_6 \cdot \dot{\delta}_2 + D_7 \cdot \lambda + D_8 \cdot \delta_1 + D_9 \cdot \delta_2 + D_{10}, \quad (36)$$

де  $D_1 \dots D_{10}$  – коефіцієнти полінома;  $\lambda$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – узагальнені координати руху візка відносно системи відліку  $O_k x_k y_k$ .

Для знаходження законів зміни узагальнених координат  $\lambda$ ,  $\delta_1$  і  $\delta_2$  необхідно провести розрахунок системи трьох диференціальних рівнянь:

$$A_1 \cdot \ddot{\lambda} + A_2 \cdot \ddot{\delta}_1 + A_3 \cdot \ddot{\delta}_2 + A_4 \cdot \dot{\lambda} + A_5 \cdot \dot{\delta}_1 + A_6 \cdot \dot{\delta}_2 + A_7 \cdot \lambda + A_8 \cdot \delta_1 + A_9 \cdot \delta_2 = A_{10} + A_{11} \cdot t; \quad (37)$$

$$B_1 \cdot \ddot{\lambda} + B_2 \cdot \ddot{\delta}_1 + B_3 \cdot \ddot{\delta}_2 + B_4 \cdot \dot{\lambda} + B_5 \cdot \dot{\delta}_1 + B_6 \cdot \dot{\delta}_2 + B_7 \cdot \lambda + B_8 \cdot \delta_1 + B_9 \cdot \delta_2 = B_{10} + B_{11} \cdot t; \quad (38)$$

$$C_1 \cdot \ddot{\lambda} + C_2 \cdot \ddot{\delta}_1 + C_3 \cdot \ddot{\delta}_2 + C_4 \cdot \dot{\lambda} + C_5 \cdot \dot{\delta}_1 + C_6 \cdot \dot{\delta}_2 + C_7 \cdot \lambda + C_8 \cdot \delta_1 + C_9 \cdot \delta_2 = C_{10} + C_{11} \cdot t, \quad (39)$$

де  $A_1 \dots A_{11}$ ,  $B_1 \dots B_{11}$ ,  $C_1 \dots C_{11}$  – коефіцієнти, які наведені в табл. 2.2, 2.3, 2.4 відповідно [5, 7].

Для знаходження рамної сили, яка діє на вісь колісної пари у кривій ділянці колії, скористаємося розрахунковою схемою двох колісно-моторних блоків візка електровоза (рис. 7).

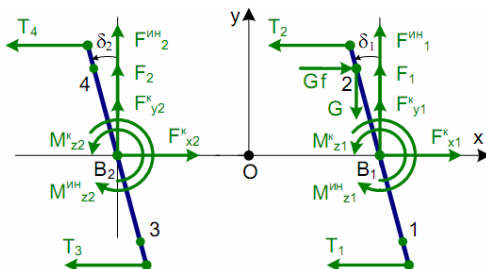


Рис. 7. Розрахункова схема двох КМБ візка

Fig. 7. The calculation model of two wheel-motor blocks of the bogie

Для знаходження рамної сили необхідно скласти систему рівнянь кінестатики для передньої колісної пари візка. Дана система буде мати вигляд:

$$\sum F_x = 0;$$

$$F_{x1}^k + Gf - (T_1 + T_2) = 0;$$

$$\sum F_y = 0;$$

$$F_{y1}^k - G + F_{p1} + F_1^{\text{ин}} = 0; \quad (40)$$

$$\sum M_{B1} = 0;$$

$$M_{z1}^k - M_{z1}^{\text{ин}} - G \cdot s \cdot (f - \delta_1) - (T_1 - T_2) \cdot s_6 = 0,$$

де  $F_{p1}$  – рамна сила, яка діє на першу колісну пару;  $T_1$  і  $T_2$  – поздовжні сили в шарнірно-повідкових зв'язках;  $s_6$  – половина відстані між центрами букс однієї колісної пари.

З другого рівняння системи (40) визначається рамна сила, яка дорівнює:

$$F_{1p} = G - F_{y1}^k - F_1^{\text{ин}}. \quad (41)$$

Знаходження рамної сили для другої колісної пари проводиться аналогічним методом.

Слід відзначити, як зазначає д.т.н. Е. М. Сокол [11], для виконання судової залізнично-транспортної експертизи при сходженні рухомого складу з рейок необхідно задаватися вихідними даними з конкретного місця сходження. Вихідними даними при цьому являються: план і профіль колії, тип рейок, характеристика кривої, по якій відбувалося сходження (радіус, довжина, підвищення зовнішньої рейки, наявність перехідних кривих), технічний стан елементів верхньої будови колії (боковий і вертикальний знос рейкових ниток), несправності ходових частин рухомого складу (знос гребенів, знос поверхні кочення колісних пар). Отже, маючи конкретне місце сходження та використовуючи вище наведену методику, можна визначити рамну силу на осі колісної пари електровоза.

## Результати

Оскільки сходження електровоза з рейок може відбутися у вхідній перехідній, круговій та вихідній перехідній кривій, то проведемо розрахунок рамної сили для кожної конкретної кривої у відповідний момент часу.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Вихідні дані для розрахунку:  $P_k = 527$  кН;  
 $\chi = 0,028$  рад;  $P_T = 204$  кН;  $u_1 = 0,007$  м;  
 $l = 1,5$  м;  $v = 10$  м/с;  $\Delta h_0 = 0,15$  м;  
 $\rho = 300$  м;  $L_k = 100$  м;  $u_2 = 0,01$  м.

Вхідна перехідна крива:  $L = 50$  м,  $v = 10$  м/с

Знаючи довжину перехідної кривої та швидкість руху електровоза, можна знайти час його слідування по відповідній кривій, який в даному випадку складає  $t_1 = 0 \dots 5$  с.

Виконаємо розрахунок для електровоза при умові, що він прослідував від початку даної кривої  $t_1 = 2,5$  с.

Виконавши розрахунок за допомогою програми Maple, були отримані такі результати:

$$G_1 = 24,7109 \text{ кН},$$

$$F_{y1}^k = 29,2944 \text{ кН},$$

$$F_1^{\text{нн}} = 0,0636 \text{ кН}.$$

Рамна сила на осі першої колісної пари

$$F_{1p} = -4,647 \text{ кН}.$$

Виконаємо аналогічний розрахунок для кругової кривої. При цьому приймемо, що електровоз ВЛ80 прослідував від початку даної кривої  $t_2 = 5$  с.

$$G_1 = 57,247 \text{ кН},$$

$$F_{y1}^k = 65,999 \text{ кН},$$

$$F_1^{\text{нн}} = 0,0000056 \text{ кН},$$

Рамна сила на осі першої колісної пари

$$F_{1p} = -8,752 \text{ кН}.$$

Параметри вихідної перехідної кривій аналогічні параметрам вихідної перехідної кривій. При цьому були отримані такі результати:

$$G_1 = 30,065 \text{ кН},$$

$$F_{y1}^k = 35,5285 \text{ кН},$$

$$F_1^{\text{нн}} = -0,06361 \text{ кН}.$$

Рамна сила на осі першої колісної пари:

$$F_{1p} = -5,3996 \text{ кН}.$$

Для більш точного розуміння та повноти дослідження проведемо розрахунок за вище наведеною методикою для різних швидкостей та підвищень зовнішньої рейкової нитки. При цьому будемо вважати, що зазор, який виникає між робочою гранню рейки та гребенем колеса при русі по кривій, буде змінюватися в діапазоні  $u_1 \dots u_2$ . На основі отриманих результатів були отримані залежності рамної сили першої колісної пари електровоза ВЛ80 від часу руху по відповідній кривій. Дані залежності представлені на рис. 8–11.

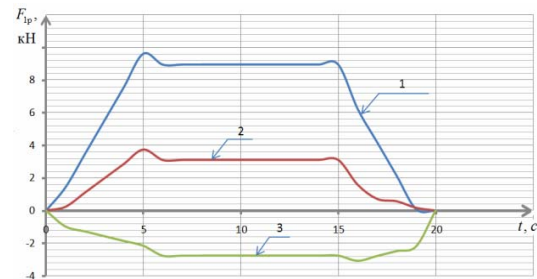


Рис. 8. Графік зміни рамної сили  $F_{1p}$  в залежності від часу руху локомотива при  $V = 10$  м/с :

1 –  $\Delta h_0 = 50$  мм; 2 –  $\Delta h_0 = 100$  мм; 3 –  $\Delta h_0 = 150$  мм

Fig. 8. Graph of behaviour of frame force  $F_{1f}$  depending on the movement time of the locomotive at  $V = 10$  m/sec :

1 –  $\Delta h_0 = 50$  mm; ; 2 –  $\Delta h_0 = 100$  mm; ; 3 –  $\Delta h_0 = 150$  mm

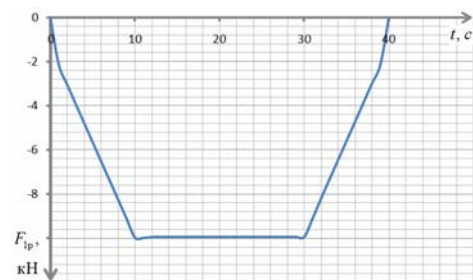


Рис. 9. Графік зміни рамної сили  $F_{1p}$  в залежності від часу руху локомотива при  $V = 5$  м/с,  $\Delta h_0 = 150$  мм

Fig. 9. Graph of behaviour of frame force  $F_{1f}$  depending on the movement time of the locomotive at  $V = 5$  m/sec,  $\Delta h_0 = 150$  mm

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

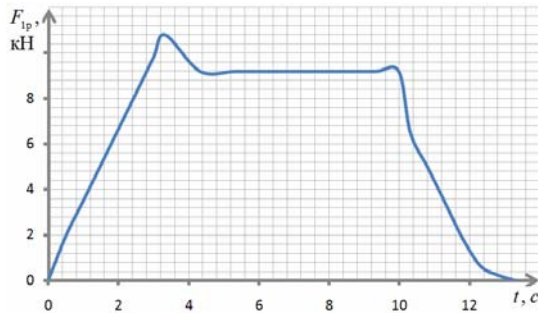


Рис. 10. Графік зміни рамної сили  $F_{1p}$  в залежності від часу руху локомотива при  $V = 15$  м/с,  $\Delta h_0 = 150$  мм

Fig. 10. Graph of behaviour of frame force  $F_{1f}$  depending on the movement time of locomotive at  $V = 15$  m/sec,  $\Delta h_0 = 150$  mm

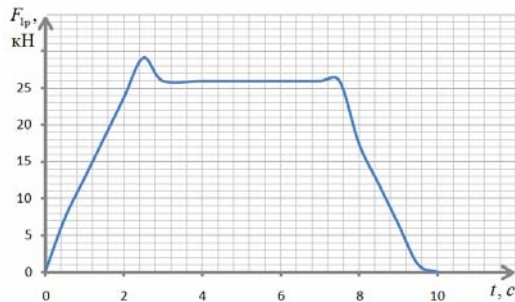


Рис. 11. Графік зміни рамної сили  $F_{1p}$  в залежності від часу руху локомотива при  $V = 20$  м/с,  $\Delta h_0 = 150$  мм

Fig. 11. Graph of behaviour of frame force  $F_{1f}$  depending on the movement time of the locomotive at  $V = 20$  m/sec,  $\Delta h_0 = 150$  mm

За отриманими результатами можна зробити наступний висновок.

У стані спокою екіпажу ( $v = 0$ ,  $h_0 = 0$ ) рамна сила дорівнює нулю. При русі електровоза – по кривій ділянці колії буде виникати рамна сила, яка буде залежати від багатьох факторів, основними з яких є: радіус кривої, швидкість та підвищення зовнішньої рейкової нитки.

З рис. 8–11 видно, що при зменшенні радіусу відповідної кривої, рамна сила буде зростати.

З рис. 8. видно, що при постійній швидкості, із збільшенням підвищення зовнішньої рейкової нитки, дія рамної сили буде більшою на головку внутрішньої рейки. Цим і пояснюється її від'ємне значення.

З рис. 9–11 видно, що при сталому значенні підвищення зовнішньої рейкової нитки, із збільшенням швидкості електровоза, дія рамної сили на головку зовнішньої рейки буде більшою.

### Наукова новизна та практична значимість

На основі існуючої методики розрахунку бокової сили розроблений метод визначення рамної сили, яка діє на візок зі сторони кузова секції локомотива. Удосконалення методу визначення рамної сили підвищує точність розрахунків при аналізі безпеки руху та при проведенні судових залізнично-транспортних експертиз.

### Висновки

1. Було розроблено метод визначення рамної сили, яка діє на візок зі сторони кузова секції локомотива.
2. На основі розробленого методу були отримані розрахункові значення рамної сили, яка діє на візок зі сторони кузова секції локомотива.
3. Отримані результати були використані для побудови залежностей рамної сили  $F_{1p}$  від часу руху електровоза по відповідній кривій при зміні швидкості руху та відповідному підвищенні зовнішньої рейкової нитки.
4. Напрямами подальших досліджень є визначення бокової сили притиснення колеса до рейки на прямих та кривих ділянках залізничної колії для швидкісного рухомого складу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блохин, Е. П. Об оценке безопасности от схода колеса с рельсов при использовании направляющей либо боковой силы / Е. П. Блохин, М. Л. Коротенко, И. В. Клименко // Проблемы и перспективы развития ж.-д. трансп. : материалы 73 междунар. науч.-практ. конф. (23.05–24.05.2013) / М-во инфраструкту-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

- ры України, Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2013. – С. 81–82.
2. Блохин, Е. П. Об эквивалентности критериев безопасности от схода колеса с рельсов при использовании направляющей либо боковой силы / Е. П. Блохин, М. Л. Коротенко, И. В. Клименко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 3 (45). – С. 74–81. doi: 10.15802/stp2013/14538.
  3. Боднар, Б. Є. Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина : підручник для ВНЗ залізн. трансп. / Б. Є. Боднар, Є. Г. Нечаєв, Д. В. Бобир ; під ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. – Дніпропетровськ : Ліра ЛТД, 2009. – 284 с.
  4. Болжеларський, Я. В. Огляд методів динамічного вписування локомотивів у перехідні та кругові криві / Я. В. Болжеларський, С. С. Довганюк, А. Я. Кузишин // Залізничний транспорт України. – 2016. – № 5/6. – С. 23–29.
  5. Болжеларський, Я. В. Порівняння методів розрахунку бокової сили від дії колеса електровоза на головку рейки / Я. В. Болжеларський, А. Я. Кузишин // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 11. – С. 55–64.
  6. Вериги, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериги, А. Я. Коган ; под ред. М. Ф. Вериги. – Москва : Транспорт, 1986. – 556 с.
  7. Доронин, С. В. Движение многосекционных локомотивов в кривых малого радиуса : монография / С. В. Доронин. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. – 220 с.
  8. Ершков, О. П. Расчеты поперечных горизонтальных сил в кривых / О. П. Ершков // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1966. – Вып. 301. – С. 3–236.
  9. Куценко, С. М. Динамика установившегося движения локомотивов в кривых / С. М. Куценко, А. Э. Руссо, Э. П. Елбаев [и др.] ; под ред. С. М. Куценко. – Харьков : Высш. шк., 1975. – 132 с.
  10. Магистральные электровозы: Общие характеристики. Механическая часть / В. И. Бочаров, И. Ф. Козинцев, А. И. Кравченко [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1991. – 224 с.
  11. Сокол, Э. Н. Сходы с рельсов и столкновения подвижного состава (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики). – Київ : Транспорт України, 2004. – 386 с.
  12. Чернышев, М. А. Железнодорожный путь / М. А. Чернышев, З. М. Крейнис. – Москва : Транспорт, 1985. – 302 с.
  13. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянц. – Москва : Транспорт, 1987. – 479 с.
  14. A comprehensive model of the railway wheelset-track interaction in curves / J. Martínez-Casas, E. Di Gialleonardo, S. Bruni, L. Baeza // J. of Sound and Vibration. – 2014. – Vol. 333. – Iss. 18. – P. 4152–4169. doi: 10.1016/j.jsv.2014.03.032.
  15. Fatigue damage mechanism of railway wheels under lateral forces / G. Zhou, C. He, Guang Wen, Qiyue Liu // Tribology International. – 2015. – Vol. 91. – P. 160–169. doi: 10.1016/j.triboint.2015.07.008.
  16. Kalker, J. J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction / J. J. Kalker : Ph.D. Thesis Delft ; University of Technology. – Delft, 1967. – 112 p.

А. Я. КУЗЫШИН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Львовский НИИ судебных экспертиз, ул. Липинского, 54, Львов, Украина, 79024, тел. +38 (032) 231 76 13, тел. +38 (032) 231 70 61, эл. почта kuzyshyn1993@gmail.com, ORCID 0000-0002-3012-5395

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАМНОЙ СИЛЫ ЭЛЕКТРОВОЗА ВЛ80 ПРИ ДВИЖЕНИИ НА КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

**Цель.** При движении локомотивов на кривых участках железнодорожного пути возникают поперечные горизонтальные силы, которые приводят к прижатию гребня колесной пары к головке рельса. Используя существующую методику расчета боковой силы, необходимо разработать метод определения рамной силы, действующей на тележку со стороны кузова секции локомотива. Также нужно установить основные параметры, которые влияют на величину рамной силы. Изменяя эти параметры, построить зависимости рамной силы от времени движения электровоза по соответствующей кривой. **Методика.** Представим электровоз как многомассовую механическую систему из семи тел: кузова, двух рам тележек и четырех колесных пар. Для определения боковой силы, которая действует от колесной пары на рельс, нужно решить дифференци-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

альные уравнения движения локомотивной тележки по кривым малого радиуса. С помощью уравнений кинестатики для колесной пары тележки перейти к определению рамной силы, действующей на тележку со стороны кузова секции локомотива. В расчетах принимаются номинальные геометрические и массовые параметры узлов и деталей электровоза. Радиус кривой, длина переходной кривой, длина круговой кривой, продольный уклон рельсового пути и другие параметры принимаются постоянными величинами. **Результаты.** Получены расчетные значения величины рамной силы электровоза ВЛ80, которая действует на тележку со стороны кузова секции локомотива. На основе этих данных были построены зависимости рамной силы от времени движения электровоза по соответствующей кривой при изменении скорости движения и соответствующем повышении внешней рельсовой нити. **Научная новизна.** На основе существующей методики расчета боковой силы разработан метод определения рамной силы, действующей на тележку со стороны кузова секции локомотива. **Практическая значимость.** Совершенствование метода определения рамной силы повышает точность расчетов при анализе безопасности движения и при проведении судебных железнодорожно-транспортных экспертиз.

*Ключевые слова:* рамная сила; колесная пара; электровоз; рельсовый путь; круговая кривая; переходная кривая; тележка; возвышения наружного рельса

A. Y. KUZYSHYN<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Lviv Research Institute of Forensic Examination, Lypynskyi St., 54, Lviv, Ukraine, 79024,  
tel.+38 (032) 231 76 13, tel.+38 (032) 231 70 61, e-mail kuzyshyn1993@gmail.com, ORCID 0000-0002-3012-5395

## DETERMINATION OF FRAME FORCE FOR ELECTRIC LOCOMOTIVE VL80 WHEN MOVING IN THE CURVED TRACK SECTIONS

**Purpose.** When locomotives move in curved sections of the railway track, horizontal forces arise, which lead to pressing the ridge of the wheel pair to the railway track. The article is aimed to develop a method for determining the frame force acting on the bogie from the side of body of the locomotive section using the current methodology of calculating the lateral force. It is also aimed to determine the basic parameters that influence the value of the frame force. It is necessary to construct the dependencies of the frame force on the travel time of electric locomotive in the corresponding curve changing these parameters. **Methodology.** As is known, the electric locomotive is a multimass mechanical system. We will assume that this system consists of seven bodies: a body, two frames of carriages and four wheel sets. To determine the lateral force acting on the rail from the wheelset one need to solve differential equations of motion of locomotive bogie in curves of small radius. Using the equations of kinetostatics for wheelset one should come to determining the frame force acting on the car bogie from the side of body of the locomotive section. The nominal geometric and mass parameters of parts and components of electric locomotive are taken in the calculations. The curve radius, the length of transition curve, the length of circular curve, the longitudinal slope of railway track and other parameters are fixed values. **Findings.** There were obtained calculated values of the frame force of electric locomotive VL80 acting on the bogie from the side of body of the locomotive section. Based on the obtained results there were built the dependencies of frame force on the travel time of electric locomotive on the corresponding curve when changing the speed and corresponding elevation of the outer rail. **Originality.** On the basis of the existing methodology for calculating the lateral force it was developed the method for determining the frame force acting on the car bogie from the side of body of the locomotive section. **Practical value.** Improving the method for determining the frame force improves the accuracy of calculations when analyzing the traffic safety and when conducting the forensic rail-transport examinations.

*Keywords:* frame force; wheel set; electric locomotive; railway track; circular curve; transition curve; bogie; elevation of outer rail

## REFERENCES

1. Blokhin, Y. P., Korotenko, M. L., & Klimenko, I. V. (2013). Ob otsenke bezopasnosti ot skhoda koleasa relsov pri ispolzovanii napravlyayushchey libo bokovoy sily. *Proceedings of the 73 International Scientific & Practical Conference «Problems and Prospects of Railway Transport Development», May 23-24, 2013, Dnipropetrovsk.* 81-82.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

2. Blokhin, Y. P., Korotenko, M. L., & Klimenko, I. V. (2013). On the equivalence of safety criteria of the wheels derailment from the rails when using the directing or lateral force. *Science and Transport Progress*, 3(45), 74-81. doi: 10.15802/stp2013/14538
3. Bodnar, B. Y., Nechaiev, Y. H., & Bobyr, D. V. (2009). *Teoriia ta konstruktsiia lokomotyviv. Ekipazhna chastyna*. Dnipropetrovsk: Lira LTD.
4. Bolzhelarskyi, Y. V., Dovhaniuk, S. S., & Kuzyshyn, A. Y. (2016). Ohliad metodiv dynamichnoho vpysuvannia lokomotyviv u perekhidni ta kruhovi kryvi. *Railway Transport of Ukraine*, 5/6, 23-29.
5. Bolzhelarskyi, Y. V., & Kuzyshyn, A. Y. (2016). Comparison of the methods for calculating the lateral force from the influence of the locomotive wheel on the rail head. *Electromagnetic Compatibility and Safety on railway transport*, 11, 55-64.
6. Verigo, M. F., & Kogan, A. Y. (1986). *Vzaimodeystviye puti i podvizhnogo sostava*. Moscow: Transport.
7. Doronin, S. V. (2009). *Dvizheniye mnogosektsionnykh lokomotivov v krivykh malogo radiusa*. Khabarovsk: DVGUPS.
8. Yershkov, O. P. (1966). Raschety poperechnykh gorizontalnykh sil v krivykh. *Nauchnyye trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, 301, 236.
9. Kutsenko, S. M. (Ed.). (1975). *Dinamika ustanovivshegosya dvizheniya lokomotivov v krivykh*. Kharkov: Vysshaya shkola.
10. Bocharov, V. I., Kodintsev, I. F., & Kravchenko, A. I. (1991). *Magistralnyye elektrovozy. Obshchiye kharakteristiki: Mekhanicheskaya chast*. Moscow: Mashinostroyeniye.
11. Sokol, E. N. (2004). *Skhody s rel'sov i stolknoveniya podvizhnogo sostava. Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki*. Kyiv: Transport Ukrainy.
12. Chernyshev, M. A., & Kreynis, Z. M. (1985). *Zheleznodorozhnyy put*. Moscow: Transport.
13. Shakhunyan, G. M. (1987). *Zheleznodorozhnyy put*. Moscow: Transport.
14. Martínez-Casas, J., Di Gialleonardo, E., Bruni, S., & Baeza, L. (2014). A comprehensive model of the railway wheelset-track interaction in curves. *Journal of Sound and Vibration*, 333(18), 4152-4169. doi: 10.1016/j.jsv.2014.03.032
15. Zhou, G., He, C., Wen, G., & Liu, Q. (2015). Fatigue damage mechanism of railway wheels under lateral forces. *Tribology International*, 91, 160-169. doi: 10.1016/j.triboint.2015.07.008
16. Kalker, J. J. (1967). *On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction*. (PhD thesis). Available from Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. І. Капіцею (Україна);  
д.т.н., проф. В. Л. Горобцем (Україна)

Надійшла до редколегії: 22.02.2017

Прийнята до друку: 18.05.2017

## УДК 656.22

О. А. ТЕРЕЩЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +375 (232) 95 21 84, эл. почта i\_am\_@tut.by, ORCID 0000-0002-5598-9309

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ВАГОНОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

**Цель.** В статье предполагается рассмотреть создание методической основы моделирования процессов накопления вагонов при решении задач оперативного планирования в условиях неопределенности исходной информации для оценки устойчивости принятого планового сценария и расчета сопутствующих технологических рисков. **Методика.** Решение исследуемой задачи основано на использовании общенаучных подходов, аппарата теории вероятностей и теории нечетких множеств. Для достижения поставленной цели систематизированы факторы, влияющие на энтропию оперативных планов. Установлено, что при планировании эксплуатационной работы железнодорожных станций, участков и узлов наиболее значимыми факторами, обуславливающими неопределенность исходной информации, являются: а) внешние условия по отношению к рассматриваемому железнодорожному полигону, выражаемые неопределенностью моментов времени поступления вагонов; б) внешние трудно идентифицируемые цели функционирования других участников логистической цепи (прежде всего клиентов), выражаемые неопределенностью моментов времени завершения грузовых операций с вагонами. Данные факторы предложено учитывать при автоматизированном планировании посредством статистического анализа – установления и исследования остатков времени (ошибок прогнозирования). В результате предложены аналитические зависимости для рационального представления функций плотности вероятности распределения остатков времени в виде точечных, кусочно-заданных и непрерывных аналитических моделей. Далее представлены разработанные модели накопления вагонов, применение которых зависит от идентифицированных состояний прогнозируемого входящего потока вагонов в систему накопления. Кроме того, последняя предложенная модель является общим случаем модели процессов накопления с произвольным уровнем достоверности исходной информации при любой структуре входящего потока вагонов. В заключение предложена методика оценки результатов моделирования накопления вагонов для оптимизации перевозочного процесса в зависимости от выбранного критерия. **Результаты.** Разработанная методика моделирования процессов накопления вагонов нашла отражение в создаваемых с участием автора и внедряемых на Белорусской железной дороге на базе ИАС ПУР ГП (информационно-аналитическая система поддержки управленческих решений для грузовых перевозок) динамических моделях. Они предназначены для обеспечения оперативного планирования перевозочного процесса на основе методов, позволяющих оценивать технологические риски. **Научная новизна.** Инновационная составляющая работы обусловлена расширением существующих моделей накопления вагонов для случаев неопределенности исходной информации. Таким образом, существовавшие ранее детерминированные модели являются частными случаями предложенной. Также, в отличие от существующих, методика позволяет комплексно учитывать влияние случайных процессов. За счет этого могут дополнительно оцениваться технологические риски и оперативно осуществляться необходимые регулировочные мероприятия. В целом, полученные при моделировании предлагаемым способом результаты позволяют повысить качество выходных решений в системе сменного-суточного и текущего планирования эксплуатационной работы, увеличив достоверность оперативных планов. **Практическая значимость.** На сегодняшний день существует благоприятная возможность использования предложенной методики моделирования в существующих на железнодорожном транспорте системах автоматизированного оперативного планирования эксплуатационной работы, в том числе для оптимизации местных вагонопотоков и решения ряда актуальных задач поездообразования.

**Ключевые слова:** оперативное планирование; неопределенность информации; накопление вагонов; моделирование; технологические риски; автоматизация

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Введение**

Качество функционирования транспортной отрасли зависит от используемых и внедряемых инноваций, научное обеспечение которых направлено как на процесс создания, так и на снижение ресурсоемкости их внедрения и сопровождения.

Современные информационные технологии, применяемые на железнодорожном транспорте, создали виртуальную среду, динамично и адекватно отображающую перевозочный процесс. Наличие подобной интегрированной базы данных позволяет на ее основе разрабатывать и реализовывать алгоритмы прогнозирования перевозочного процесса на недоступном ранее уровне, включая модели реального времени [1, 12].

Планирование, как функция менеджмента, определяет программу регулировочных действий в расчетном интервале времени в совокупности с устанавливаемыми методами и средствами реализации. Оперативное планирование является важной составляющей эксплуатационной деятельности, от качества которого напрямую зависит как реализация долгосрочных планов и программ, так и уровень исполнения текущих производственных процессов [5, 8, 12]. Показатели оперативного плана устанавливаются на основе прогнозирования динамических процессов, параметры которых определяются в том числе другими участниками логистической цепи, что является источником неопределенности исходной информации, снижает достоверность получаемых результатов и усложняет процесс планирования на их основе.

Процессы, связанные с накоплением вагонов, широко распространены в станционной технологии и являются типичным предметом оперативного планирования. Их наличие обусловлено двумя основными факторами:

- необходимостью консолидации вагонопотока для обеспечения установленных значений массы и длины железнодорожных составов;
- присутствием в технологии операций, начало выполнения которых устанавливается расписанием.

В условиях неопределенности исходной информации автоматизированное моделирование

процесса накопления вагонов требует вероятностной оценки для набора возможных сценариев его реализации. При этом в системе моделирования должна учитываться не только энтропия исходной информации, но и точность модели, которая определяет продвижение вагонопотока в технологической цепи.

Применяемые в статье подходы предусматривают комплексное решение поставленной задачи в обозначенных условиях.

**Цель**

Целью работы является создание методической основы моделирования процессов накопления вагонов при решении задач оперативного планирования в условиях неопределенности исходной информации для оценки устойчивости принятого планового сценария и расчета технологических рисков.

**Методика**

Результатом неопределенности исходной информации в системах планирования транспортных процессов является неопределенность выходной информации. Таким образом, любое запланированное событие в приведенных условиях можно рассматривать, как совершаемое с определенной вероятностью или имеющее вероятностные параметры (количественные, качественные, временные и др.). Для описания таких процессов в статье использован специализированный аппарат теории вероятностей и теории нечетких множеств, позволяющий одновременно оценивать уровень достоверности плановых решений и создавать адекватные заданным условиям модели накопления вагонов.

Неопределенность исходной информации можно выразить через энтропию  $H_{\text{пер}}$ , которая применительно к задаче исследования зависит от:

- устойчивости перевозочного процесса, определяемой соответствием эксплуатационной нагрузки развитию инфраструктуры и имеющимся перевозочным ресурсам;
- наблюдаемости перевозочного процесса, которая зависит от группы факторов: удаленности операции во времени от момента принятия решения (планирования); удаленности операции в технологической цепи (количества про-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

межуточных операций); удаленности операции в пространстве (фактора расстояния и присутствия различного рода административных границ); полноты и доступности воздействия на управляемую систему (административного и оперативного подчинения, удаленности, владельца, собственника);

– управляемости перевозочного процесса, как функции наблюдаемости и параметров управляющих ресурсов;

– координируемости перевозочного процесса, обусловленной уровнем согласованности взаимодействия организаций железнодорожного транспорта между собой, партнерами и клиентами.

Оценку источников энтропии информации в системе оперативного планирования можно провести на основе представленных ниже групп условий и факторов, влияющих на оперативный прогноз продвижения  $i$ -го вагона по технологической цепи на расчетном железнодорожном полигоне (участке, узле, станции):

*1-я группа:*

– нормативное время обработки в каждой подсистеме;

– способ использования производственных ресурсов, обеспечивающих обработку и продвижение вагонопотока;

– количественные характеристики и структура обрабатываемого вагонопотока (эксплуатационная нагрузка);

– установленное расписание выполнения выделенных операций;

*2-я группа:*

– неопределенность времени поступления вагонов на расчетный полигон;

– неопределенность времени завершения выполнения грузовых операций с вагонами.

Условия и факторы первой группы имеют природу констант или напрямую зависят от управления  $u(t)$ , или их воздействие корректируется управлением. То есть по результатам моделирования возможно запланировать изменение количества и способов применения производственных ресурсов, произвести корректировку расписания выделенных операций с целью достижения необходимых параметров эксплуатационной работы. При этом воздействие случайных факторов нивелируется возможно-

стью комплексной подготовки превентивных технических и технологических мер, максимальным уровнем наблюдаемости и управляемости перевозочного процесса на расчетном полигоне в сравнении с другими объектами, находящимися за пределами расчетного полигона.

Условия и факторы второй группы имеют в своей основе фундаментальную неопределенность:

– время поступления вагона на расчетный полигон в общем виде зависит от внешнего управления (в том числе от действий иностранных железнодорожных администраций, операторов подвижного состава, перевозчиков, грузоотправителей); энтропии в системе выполнения грузовых операций с вагонами в адрес станций расчетного полигона; случайных событий (возникающих неисправностей подвижного состава, нерегламентированных задержек, ограничений и запрещений, человеческого фактора в системе управления);

– время завершения выполнения с вагоном грузовых операций (включая места общего пользования, но в меньшей степени) зависит от управления, целей, задач и критериев эффективности работы клиента, что способствует снижению уровня наблюдаемости и управляемости исследуемых процессов.

Характер изменения неопределенности состояния перевозочного процесса при решении задач оперативного планирования в общем виде можно представить графически (рис. 1). Для расчетного железнодорожного полигона источники энтропии исходной для планирования информации укрупненно можно представить в виде совокупности всех внешних по отношению к расчетному полигону факторов и основного внутреннего фактора – сложного управленческого взаимодействия железной дороги и клиентов в процессе выполнения погрузки и выгрузки, что затрудняет достоверное прогнозирование времени освобождения вагонов после завершения грузовых операций.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

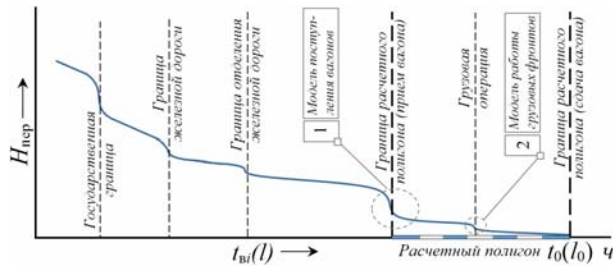


Рис. 1. Изменение энтропии перевозочного процесса при решении задач оперативного планирования

Fig. 1. Change in the entropy of the transportation process at solving the tasks of operational planning

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте подчиняется законам сложных систем [6, 7, 14]. Даже в условиях предоставления достоверных исходных данных на практике оказывается невозможным регулярное точное прогнозирование состояний перевозочного процесса из-за результирующего влияния множества малозначимых и случайных факторов, не нашедших по объективным причинам отражения в алгоритмах модели [9, 10, 17]. При оперативном планировании для одновременного учета неопределенности исходной информации и качества работы прогнозной модели предлагается использовать статистическую оценку [11, 12, 18], основанную на функциях плотности распределения вероятности остатков времени (ошибок прогнозирования), которые определяются сравнением результатов оперативного прогноза моментов времени прибытия вагонов на техническую станцию  $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$  и моментов времени завершения выполнения с вагонами грузовых операций  $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$  с фактически исполненными значениями.

Функция плотности распределения остатков времени  $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$ , в зависимости от наличия резерва пропускной способности на примыкающем железнодорожном участке (насыщенности графика движения поездов), может быть аппроксимирована непрерывной функцией – при низком и среднем уровне использования пропускной способности, кусочно-заданной – при высоком уровне использования пропускной способности с большой долей пассажирских и других приоритетных поездов на графике, дискретной точечной – при полном использовании

пропускной способности с большой долей пассажирских и других приоритетных поездов на графике (рис. 2). Данный факт обусловлен степенью возможности регулирования поездным диспетчером нормативного графика движения в зависимости от уровня его насыщенности. Аналогично, вид функции  $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$  обусловлен уровнем загрузки и степенью соблюдения выполнения установленного расписания в подсистеме выполнения грузовых операций.

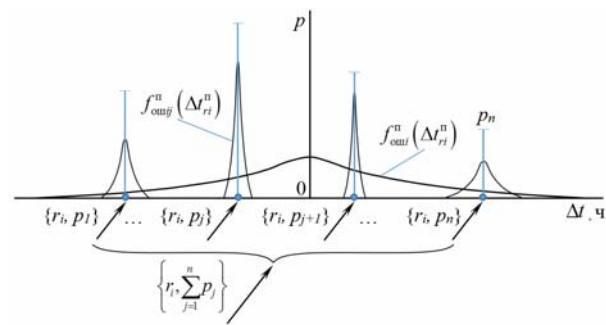


Рис. 2. Основные виды функции плотности распределения остатков времени (ошибок прогнозирования)

Fig. 2. Main types of density function of time residues distribution (predictive errors)

Наиболее сложным случаем является аналитическое представление кусочно-заданных функций плотности распределения остатков времени  $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$  и  $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$ .

Для практической реализации процесса моделирования части кусочно-заданной функции плотности распределения остатков времени выбираются последовательно в порядке убывания соответствующих частям вероятностей, а общее количество используемых частей  $n_{\text{кф}}$  определяется исходя из требования к установленной точности расчетов  $\varepsilon_m$ :

$$\sum_{j=1}^{n_{\text{кф}}} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{\text{оши}j}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)}) d\Delta t_{ri}^{n(r)} \geq 1 - \varepsilon'_m, \quad 0 < \varepsilon'_m < \varepsilon_m, \quad (1)$$

где  $f_{\text{оши}j}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)})$  – используемая в модели функция  $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$  или  $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$ ;  $\varepsilon'$  – вспомогательный параметр, не превышающий по величине  $\varepsilon_m$ .

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

При установлении для практических целей конечных границ кусочно-заданных функций плотности распределения вероятности остатков моделирования ее правая и левая границы устанавливаются исходя из равенства интегралов отбрасываемых частей от установленной границы до соответствующей положительной или отрицательной бесконечности, а границы между соседними частями таких функций устанавливаются на основе решения интегрального уравнения:

$$\int_{\Delta t_{ri}^{n(r)-}}^{+\infty} f_{ошиj}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)}) d\Delta t_{ri}^{n(r)} = \int_{-\infty}^{\Delta t_{ri}^{n(r)+}} f_{ошиj+1}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)}) d\Delta t_{ri}^{n(r)}. \quad (2)$$

Нормировка кусочно-заданной функции плотности распределения вероятностей, каждая часть которой определена в границах  $(\Delta t_{ri}^{n(r)-}, \Delta t_{ri}^{n(r)+})$ , до единицы суммарной площади интегралов частей производится за счет поправки на коэффициент:

$$k_{кз}^{n(r)} = \frac{1}{1 - \sum_{j=1}^{n_{кф}} \int_{\Delta t_{ri}^{n(r)-}}^{\Delta t_{ri}^{n(r)+}} f_{ошиj}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)}) d\Delta t_{ri}^{n(r)}} \leq \frac{1}{1 - \varepsilon_m}. \quad (3)$$

При несоблюдении условия  $k_{кз}^{n(r)} \leq \frac{1}{1 - \varepsilon_m}$ , расчеты с применением формул (1–3) повторяются до выполнения данного условия, которое должно быть достигнуто за счет уменьшения величины  $\varepsilon'_m$  умножением на поправочный коэффициент, не превышающий  $\frac{1}{k_{кз}^{n(r)}(1 - \varepsilon_m)}$ .

Как результат, для железнодорожных станций, участков и узлов в динамических моделях перевозочного процесса [3, 6, 7], учитывающих неопределенность исходной информации, перевозочный процесс для  $i$ -го вагона предлагается представлять в виде набора вариантов возможных цепей технологических операций с переменными параметрами [2, 4, 13, 16]. При этом вероятность реализации для  $i$ -го вагона  $j$ -ой технологической цепи (или вариации параметров технологической цепи) определяется:

$$p_{bij} = \left( \frac{1}{1 - p_{bi}^{ост}} \right) \int_{M[\Delta t_{ri}^n] + (t_{ocj+1}^n - t_{ri}^n)}^{M[\Delta t_{ri}^n] + (t_{ocj+1}^n - t_{ri}^n)} f_{оши}^n(\Delta t_{ri}^n) d\Delta t_{ri}^n \times \\ \times \int_{M[\Delta t_{ri}^r] + (t_{ock+1}^r - t_{ri}^r)}^{M[\Delta t_{ri}^r] + (t_{ock+1}^r - t_{ri}^r)} f_{оши}^r(\Delta t_{ri}^r) d\Delta t_{ri}^r, \quad (4)$$

где  $\frac{1}{1 - p_{bi}^{ост}}$  – нормировочная поправка, связанная с приведением для практических целей бесконечной области определения функций  $f_{оши}^n(\Delta t_{ri}^n)$ ,  $f_{оши}^r(\Delta t_{ri}^r)$  к конечному промежутку;  $M[\Delta t_{ri}^n]$ ,  $M[\Delta t_{ri}^r]$  – математическое ожидание, соответственно, ошибки моделирования времени прибытия  $i$ -го вагона на техническую станцию и времени завершения с ним грузовых операций;  $t_{ocj}^n$ ,  $t_{ocj+1}^n$  – моменты времени, соответствующие особым состояниям динамической модели перевозочного процесса в подсистеме расчета параметров обработки вагонопотока на технической станции по прибытии;  $t_{ock}^r$ ,  $t_{ock+1}^r$  – моменты времени, соответствующие особым состояниям динамической модели перевозочного процесса в подсистеме моделирования обработки вагонопотока после выполнения грузовых операций.

Особые состояния динамической модели перевозочного процесса в подсистемах моделирования обработки вагонопотока на технической станции по прибытии и выполнения грузовых операций определяются, как установленные моменты времени: прибытия поездов, отправления поездов, подач вагонов к грузовым фронтам или на выставочные пути, уборок вагонов на станцию с грузовых фронтов или выставочных путей.

## Результаты

Таким образом, при моделировании процессов накопления вагонов на состав [8, 9, 12] или в ожидании последующей обработки учет неопределенности исходной информации предполагает усовершенствование общепринятой модели накопления (рис. 3) за счет применения

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

математического аппарата теории вероятностей и нечетких множеств.

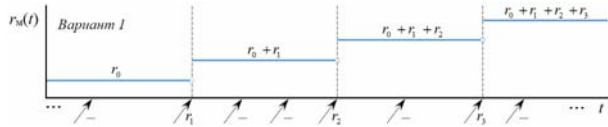


Рис. 3. Модель накопления вагонов в условиях наличия достоверной исходной информации

Fig. 3. Model of cars accumulation in conditions of reliable initial information availability

Представленную модель (рис. 3) предлагается использовать при наличии достоверной информации о времени поступления и продолжительности обработки вагонов. Для приведенных условий характерно применение постоянного расписания в предыдущих технологических цепях по отношению к прогнозируемому процессу и (или) использование короткого горизонта прогноза (в пределах ближайшего периода текущего планирования на 3–6 ч).

Второй вариант модели (рис. 4) предлагает использовать при поступлении вагонов в накопление по постоянному расписанию (устойчивым ниткам графика), но при вероятностном распределении поступления  $i$ -го вагона в накопление по заданным моментам расписания. Такие условия характерны при поступлении вагонов на станцию с участков с большой долей устойчивых ниток графика движения поездов или при высоком уровне использования пропускной способности пассажирскими и другими приоритетными поездами.

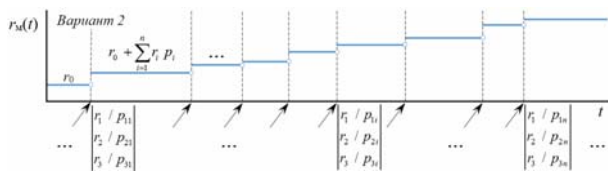


Рис. 4. Модель накопления вагонов в условиях неопределенности исходной информации при поступлении вагонов по постоянному расписанию

Fig. 4. Model of cars accumulation in conditions of initial information uncertainty under entry of cars accordingly to a permanent schedule

В модели накопления вагонов в условиях неопределенности исходной информации при поступлении вагонов по постоянному расписанию (рис. 4) прибытие  $i$ -го вагона планируется

одновременно по нескольким ниткам (технологическим цепям) с определенной вероятностью для каждой. То есть каждой нитке (технологической цепи) соответствует некоторое нечеткое множество  $\{r_i / p_{ij}\}$ , состоящее из вагонов с сопоставленными вероятностями их включения (поступления по нитке).

Третий предлагаемый вариант (рис. 5) является обобщенным представлением процесса накопления вагонов и его возможно применять во всех остальных случаях (когда поступление вагонов описывается непрерывными или кусочно-заданными функциями). Первый и второй варианты являются частными случаями третьего варианта и используются как упрощенные модели.

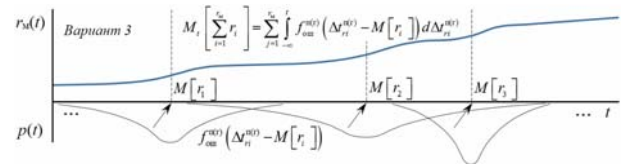


Рис. 5. Модель накопления вагонов в условиях неопределенности исходной информации в общем виде

Fig. 5. Model of cars accumulation of initial information uncertainty in general

При моделировании процессов накопления вагонов по третьему варианту математическое ожидание числа накопившихся вагонов

$M_t \left[ \sum_{i=1}^{r_m} r_i \right]$  в любой момент времени  $t$  пред-

ставляется как сумма интегралов плотности вероятности поступления всех учитываемых в модели вагонов в границах  $(-\infty, t)$ .

Результатом анализа прогнозной модели накопления вагонов (рис. 6) является корректировка ниток расписания  $\{t_{scjk}\}$  за счет возможности создания вариантов  $\{t_{scjk}^{bi}\}$ .

Вариантность представлена следующими альтернативами:

- при обработке вагонопотока по постоянному расписанию варианты графика оцениваются с целью возможного его изменения в долгосрочной перспективе (по отношению к периоду оперативного планирования);
- в случае свободного или диспетчерского

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

расписания рассматриваются две возможные альтернативы:

1) формирование ниток расписания в моменты времени наиболее вероятного накопления вагонов до технологической нормы или технического ограничения (соответствует нитке  $t_{scjk}^{B1}$  на рис. 6) – применяется для расписаний, обеспечивающих общую оптимизацию использования производственных ресурсов;

2) формирование ниток расписания в моменты времени накопления вагонов до технологической нормы (технического ограничения) с заданным уровнем достоверности (соответствует нитке  $t_{scjk}^{B2}$  на рис. 6) – применяется для расписаний, когда наиболее важным фактором является полное использование тяговых ресурсов или существует необходимость обработки (отправления) контролируемых вагонов по заданной нитке.

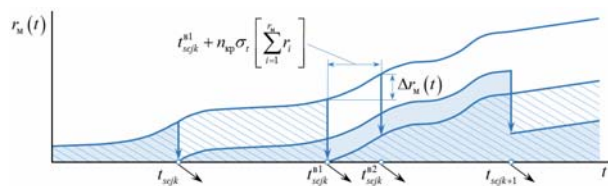


Рис. 6. Разработка вариантов расписания на основе предложенной прогнозной модели накопления вагонов

Fig. 6. Schedule options development on the base of the proposed forecast model of cars accumulation

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы состоит в расширении существующих моделей накопления вагонов для случаев неопределенности исходной информации. В отличие от разработок других авторов [4, 8, 9, 11, 14, 15], предлагаемая модель получена аналитически на основе фундаментальных закономерностей без привлечения эмпирики. Таким образом, значительная часть разработанных ранее детерминированных или

стохастических моделей являются частными случаями предложенной.

Полученные при моделировании предлагаемым способом результаты позволяют повысить качество выходных решений в системе сменного и текущего планирования эксплуатационной работы, увеличив достоверность оперативных планов.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенной методики моделирования в существующих на железнодорожном транспорте системах автоматизированного оперативного планирования эксплуатационной работы, в том числе для оптимизации местных вагонопотоков и решения ряда актуальных задач поездообразования.

Разработанная методика моделирования процессов накопления вагонов нашла отражение в создаваемых с участием автора и внедряемых на Белорусской железной дороге на базе ИАС ПУР ГП динамических моделях, предназначенных для обеспечения оперативно-го планирования перевозочного процесса на основе методов, позволяющих оценивать технологические риски.

### Вывод

Разработана методика построения прогнозных моделей накопления вагонов в процессе моделирования эксплуатационной работы. В методике идентифицированы возможные характеристики входящего вагонопотока и в соответствии с ними представлены адаптированные способы аналитического моделирования процессов накопления вагонов до технического ограничения или технологической нормы, а также в ожидании операции, выполняемой по расписанию. В отличие от существующих, методика позволяет комплексно учитывать влияние случайных процессов. За счет этого могут дополнительно оцениваться технологические риски и оперативно осуществляться необходимые регулировочные мероприятия.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированная система сменно-суточного планирования поездной и грузовой работы Белорусской железной дороги / В. Г. Кузнецов, О. А. Терещенко, Е. А. Федоров [и др.] // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт. – 2015. – № 2 (30). – С. 53–56.
2. Вол, М. Анализ транспортных систем : [сокращ. пер. с англ.] / М. Вол, Б. Мартин ; под ред. И. А. Молодых. – Москва : Транспорт, 1981. – 516 с.
3. Гершвальд, А. С. Оптимизация оперативного управления процессом грузовых перевозок на железнодорожном транспорте / А. С. Гершвальд. – Москва : Интекст, 2001. – 240 с.
4. Грунтов, П. С. Информационно-технологический подход к системе поездообразования / П. С. Грунтов, А. А. Ерофеев // Проблемы и перспективы развития трансп. систем и строит. комплекса : тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. / Белорус. гос. техн. ун-т. – Гомель, 2003. – Ч. II. – С. 17–19.
5. Грунтов, П. С. Прогнозирование показателей работы сортировочных станций методом моделирования на ЭВМ / П. С. Грунтов, В. А. Захаров. – Гомель : БелИИЖТ, 1981. – 60 с.
6. Долгополов, П. В. Удосконалення управління потоками у транспортному вузлі за допомогою апарату нечітких нейронних мереж / П. В. Долгополов, В. В. Петрушов // Східно-Європ. журн. передових технологій. – 2009. – Т. 1., № 3 (37). – С. 40–42.
7. Долгополов, П. В. Удосконалення місцевої роботи залізничного вузла на основі теорії розкладів / П. В. Долгополов, О. О. Бовкун // Східно-Європ. журн. передових технологій. – 2012. – Т. 2, № 11 (56). – С. 30–32.
8. Ерофеев, А. А. Планирование состава образования в системе интеллектуального управления перевозочным процессом / А. А. Ерофеев, Е. А. Федоров // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 12. – С. 16–24. doi: 10.15802/tstt2016/85881.
9. Кудрявцев, В. А. Закономерности состава образования на сортировочных станциях при отправлении поездов по твердому графику движения / В. А. Кудрявцев, А. А. Светашева // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. – 2015. – Вип. 2. – С. 5–14.
10. Кузнецов, В. Г. Комплексная система управления поездной работой на Белорусской железной дороге / В. Г. Кузнецов, А. А. Ерофеев // Проблемы и перспективы развития транспортной системы и строительного комплекса : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. / Белорус. гос. техн. ун-т. – Гомель, 2008. – С. 68–69.
11. Светашев, А. А. Процесс накопления вагонов на сортировочных станциях при твердом графике движения поездов / А. А. Светашев, Н. Ф. Светашева // Научно-техн. вестн. Брянск. гос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 117–123. doi: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-117-123.
12. Терещенко, О. А. Оперативное планирование местной работы железнодорожных участков и узлов с использованием динамической модели перевозочного процесса / О. А. Терещенко // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 12. – С. 80–89. doi: 10.15802/tstt2016/85889.
13. Banks, J. Discrete-event system simulation. Second edition / Jerry Banks, John S. Carson, Barry L. Nelson. – Upper Saddle River, N. J. : Published by Prentice Hall, 1996. – 594 p.
14. Erofeev, A. A. Intelligent Management of the Railway Transportation Process: Object Model / A. A. Erofeev, H. Erofeeva // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2017) : материалы междунар. науч.-техн. конф. (16.02–18.02.2017) / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2017. – С. 281–284.
15. Kazakov, N. Imitating modeling groups of multimodal cargo lines with participation of a sailing charter / N. Kazakov // Transportas (Transport Engineering). – Vilnius, 2006. – Vol. XIV, No. 3. – P. 74–82.
16. Osipov, G. S Fuzzy expert system of shipping companies safety assessment / G. S. Osipov, A. E. Sazonov // European Research. – 2016. – No. 3 (14). – P. 10–11. doi: 10.20861/2410-2873-2016-14-002.
17. Simplified Formulation of the Toll Design Problem / M. Chen, D. Bernstein, S. Chien, K. Mouskos // Transportation Research Record : J. of the Transportation Research Board. – 1999. – Vol. 1667. – P. 88–95. doi: 10.3141/1667-11.
18. Zharikova, M. Threat Assessment Method for Intelligent Disaster Decision Support System / M. Zharikova, V. Sherstjuk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 512. – P. 81–99. doi: 10.1007/978-3-319-45991-2\_6.

О. А. ТЕРЕЩЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Зклад освіти «Білоруський державний університет транспорту», вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +375 (232) 95 21 84, ел. пошта i\_am\_@tut.by, ORCID 0000-0002-5598-9309

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ВАГОНІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

**Мета.** У статті передбачається розглянути розробку методичної основи моделювання процесів накопичення вагонів при вирішенні задач оперативного планування в умовах невизначеності вихідної інформації для оцінки стійкості прийнятого планового сценарію та розрахунку супутніх технологічних ризиків. **Методика.** Рішення досліджуваного завдання засноване на використанні загальнонаукових підходів, апарату теорії ймовірностей та теорії нечітких множин. Для досягнення поставленої мети систематизовано чинники, що впливають на ентропію оперативних планів. Встановлено, що при плануванні експлуатаційної роботи залізничних станцій, ділянок і вузлів найбільш значимими факторами, які зумовлюють невизначеність вихідної інформації, є: а) зовнішні умови стосовно розглянутого залізничного полігону, що виражаються невизначеністю моментів часу надходження вагонів; б) зовнішні важко ідентифіковані цілі функціонування інших учасників логістичного ланцюга (перш за все клієнтів), що виражаються невизначеністю моментів часу завершення вантажних операцій з вагонами. Дані фактори запропоновано враховувати при автоматизованому плануванні за допомогою статистичного аналізу – встановлення і дослідження залишків часу (помилки прогнозування). В результаті запропоновані аналітичні залежності для раціонального уявлення функцій щільності ймовірності розподілу залишків часу у вигляді точкових, кусково-заданих та безперервних аналітичних моделей. Далі представлені розроблені моделі накопичення вагонів, застосування яких залежить від ідентифікованих станів прогнозованого вхідного потоку вагонів у систему накопичення. Крім того, остання запропонована модель є загальним випадком моделі процесів накопичення з довільним рівнем достовірності попередньої інформації при будь-якій структурі вхідного потоку вагонів. На завершення запропонована методика оцінки результатів моделювання накопичення вагонів для оптимізації перевізного процесу в залежності від обраного критерію. **Результати.** Розроблена методика моделювання процесів накопичення вагонів знайшла відображення в створюваних за участю автора та впроваджуваних на Білоруській залізниці на базі ІАС ПУР ВП динамічних моделях. Вони призначені для забезпечення оперативного планування перевізного процесу на основі методів, що дозволяють оцінювати технологічні ризики. **Наукова новизна.** Інноваційна складова роботи обумовлена розширенням існуючих моделей накопичення вагонів для випадків невизначеності вихідної інформації. Таким чином, існуючі раніше детерміновані моделі є окремими випадками запропонованої. Також, на відміну від існуючих, методика дозволяє комплексно враховувати вплив випадкових процесів. За рахунок цього можуть додатково оцінюватися технологічні ризики та оперативно здійснюватися необхідні регулювальні заходи. В цілому, отримані при моделюванні запропонованим способом результати дозволяють підвищити якість вихідних рішень у системі змінно-добового та поточного планування експлуатаційної роботи, збільшивши достовірність оперативних планів. **Практична значимість.** На сьогоднішній день існує сприятлива можливість використання запропонованої методики моделювання в існуючих на залізничному транспорті системах автоматизованого оперативного планування експлуатаційної роботи, в тому числі для оптимізації місцевих вагонопотоків та рішення ряду актуальних завдань поїздоутворення.

**Ключові слова:** оперативне планування; невизначеність інформації; накопичення вагонів; моделювання; технологічні ризики; автоматизація

O. A. TERESHCHENKO<sup>1\*</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Management of Operational Work», Educational Institution «Belarusian State Transport University», Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +375 (232) 95 21 84, e-mail i\_am\_@tut.by, ORCID 0000-0002-5598-9309

## SIMULATION OF CARS ACCUMULATION PROCESSES FOR SOLVING TASKS OF OPERATIONAL PLANNING IN CONDITIONS OF INITIAL INFORMATION UNCERTAINTY

**Purpose.** The article highlights development of the methodological basis for simulation the processes of cars accumulation in solving operational planning problems under conditions of initial information uncertainty for assessing the sustainability of the adopted planning scenario and calculating the associated technological risks. **Methodology.** The solution of the problem under investigation is based on the use of general scientific approaches, the apparatus of probability theory and the theory of fuzzy sets. To achieve this purpose, the factors influencing the entropy of operational plans are systematized. It is established that when planning the operational work of railway stations, sections and nodes, the most significant factors that cause uncertainty in the initial information are: a) external conditions with respect to the railway ground in question, expressed by the uncertainty of the timing of cars arrivals; b) external, hard-to-identify goals for the functioning of other participants in the logistics chain (primarily customers), expressed by the uncertainty of the completion of car loading time. These factors are suggested to be taken into account in automated planning through statistical analysis – determination and study of the remaining time (prediction errors). As a result, analytical dependencies are proposed for rational representation of the probability density functions of the remained time distribution in the form of point, piecewise-defined and continuous analytic models. Further the work presents the developed models of cars accumulation, the application of which depends on the identified states of the predicted incoming car flow to the accumulation system. In addition, the last proposed model is a general case of the accumulation process model with an arbitrary level of reliability of the initial information for any structure of the incoming flow of cars. In conclusion, a technique for estimating the results of simulation the cars accumulation was proposed to optimize the transportation process, depending on the chosen criterion. **Findings.** The developed methodology of simulation of cars accumulation process was reflected in the dynamic models created with the participation of the author and implemented at the Belarusian Railways on the basis of IAS SMD CT. They are designed to provide operational planning of the transportation process on the basis of methods that allow assessing technological risks. **Originality.** The innovative component of the work is based on the expansion of existing car accumulation models for cases of uncertainty of the initial information. Thus, the earlier deterministic models are particular cases of the proposed model. Also, unlike existing ones, the technique allows to take into account the influence of random processes in a complex manner. Due to this, technological risks can be further assessed and the necessary regulatory measures can be implemented promptly. In general, the results obtained by modeling the proposed method allow to improve the quality of output solutions in the system of shift and daily operational planning, increasing the reliability of operational plans. **Practical value.** To date, there is a favorable opportunity to use the proposed methodology of simulation in the automated operational planning systems existing in the railway transport, including the optimization of local railways and the solution of a number of urgent tasks when making up the trains.

**Keywords:** operational planning; uncertainty of information; car accumulation; simulation; technological risks; automation

### REFERENCES

1. Kuznetsov, V. G., Tereshchenko, O. A., Fedorov, Y. A., Starinskaya, N. A., & Sakovich, S. Y. (2015). Avtomatizirovannaya sistema smenno-sutochnogo planirovaniya poyezdnoy i gruzovoy raboty Belorusskoy zheleznoy dorogi. *Bulletin BelGUTa: Science and Transportation*, 2 (30), 53-56.
2. Vol, M., & Martin, B. (1981). *Analiz transportnykh sistem*. Moscow: Transport.
3. Gershvald, A. S. (2001). *Optimizatsiya operativnogo upravleniya protsessom gruzovykh perevozok na zheleznodorozhnom transporte*. Moscow: Intekst.
4. Gruntov, P. S., & Erofeev, A. A. (2003). Informatsionno-tekhnologicheskii podkhod k sisteme poyezdoobrazovaniya. *Proceedings of the International Scientific-Practical Conference «Problems and Prospects of Development of Transport Systems and the Construction of the Complex»*, 2003, Gomel. 17-19. Gomel: BelGUT.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5. Gruntov, P. S., & Zakharov, V. A. (1981). Prognozirovaniye pokazateley raboty sortirovochnykh stantsiy metodom modelirovaniya na EVM. Gomel: BelGUT.
6. Dolhopolov, P. V., & Petrushov, V. V. (2009). Udoskonalennia upravlinnia potokamy u transportnomu vuzli za dopomohoiu aparatu nechitkykh neironnykh mrezh. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3(37)), 40-42.
7. Dolhopolov, P. V., & Bovkun, O. O. (2012). Improvement of local work of railway junction on the basis of time-tables theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (56)), 30-32.
8. Erofeev, A. A., & Fedorov, Y. A. (2016). Planning for the formation of trains in the system of intellectual management of transportation process. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 12, 16-24. doi: 10.15802/tstt2016/85881
9. Kudryavtsev, V. A., & Svetashev, A. A. (2015). Laws of train formation at the railroad yards with train departure under fixed schedule. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2, 5-14.
10. Kuznetsov, V. G., & Erofeev, A. A. (2008). Kompleksnaya sistema upravleniya poezdnoy rabotoy na Belorusskoy zheleznoy doroge. *Proceedings of the II International Scientific-Practical Conference «Problems and Prospects of Development of Transport Systems and the Construction of the Complex»*, 2008, Gomel. 68-69. Gomel: BelGUT.
11. Svetashev, A. A., & Svetasheva, N. F. (2016). The process of accumulation wagons at marshalling yards with a firm timetable trains. *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*, 4, 117-123. doi: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-117-123
12. Tereshchenko, O. A. (2016). Operational planning of local work organization of railway section and junction with use of dynamic model of transportation process. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 12, 80-89. doi: 10.15802/tstt2016/85889
13. Banks, J., Carson, II, J. S., & Barry, L. (1996). *Nelson Discrete-event system simulation* (2nd ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.
14. Erofeev, A. A., & Erofeeva, H. (2017). Intelligent Management of the Railway Transportation Process: Object Model. *Proceedings of the International Conference Open «Semantic Technologies for Intelligent Systems OSTIS-2017»*, February, 16-18, 2017, Minsk. 281-284. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
15. Kazakov, N. (2006). Imitating modeling groups of multimodal cargo lines with participation of a sailing charter. *Transport Engineering*, XIV (3), 74-82.
16. Osipov, G. S., & Sazonov, A. E. (2016). Fuzzy expert system of shipping companies safety assessment. *European Research*, 3 (14), 10-11. doi: 10.20861/2410-2873-2016-14-002
17. Chen, M., Bernstein, D., Chien, S., & Mouskos, K. (1999). Simplified Formulation of the Toll Design Problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1667, 88-95. doi: 10.3141/1667-11
18. Zharikova, M., & Sherstjuk, V. (2016). Threat Assessment Method for Intelligent Disaster Decision Support System. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 512, 81-99. doi: 10.1007/978-3-319-45991-2\_6

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. Д. Н. Козаченко (Україна);  
д.т.н., доц. А. К. Головничем (Республіка Білорусь)

Поступила в редколлегию: 10.02.2017

Принята к печати: 17.05.2017

# ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 629.423.2:621.313.333

H. K. HETMAN<sup>1</sup>, S. L. MARIKUTSA<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

<sup>2\*</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 31, e-mail marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

## SELECTION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE NOMINAL MODE ELECTRIC TRAINS WITH ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE

**Purpose.** Parameters of the nominal mode are related to the most important performance indicators of traction means, therefore, the problems of choosing their optimal values always inevitably arise when forming technical requirements for a new rolling stock. The paper describes the features of solving the above-mentioned problems for electric trains with an asynchronous traction drive in the case of two-zone and three-zone frequency control of power. **Methodology.** Power of nominal mode of the rolling stock should be chosen in such a way that it would be possible to realize a predetermined travel time along in the section or the movement speed. On that basis, and also taking into account the fact that the important operational characteristics of electric trains include the acceleration value during the start-up and acceleration at the design speed, we will formulate the problem of determining the nominal power. In the task for a given range of traction, it is necessary to find such a value of the nominal mode power and the corresponding force value to ensure the ability to carry out transportations with the given level of average speed with minimal energy consumption for traction. At the same time, it is necessary to fulfill the following conditions: a) the speed of the electric train on the section does not exceed the established limits; b) it is possible to realize the given values of accelerations. A more detailed consideration of the problem shows that in real conditions, when the starting acceleration and the mass of the train are given, the problem of determining electric train power is practically reduced to determining the optimal value of the nominal mode speed. **Findings.** The task of choosing the optimal values of the nominal mode speed is solved by determining the electric power consumption with the variation of the possible values of starting speed. Therefore, only those values that ensure the implementation of the given starting and residual accelerations should be taken into account. The work shows that the traction force value increases with the design speed increase and other equal conditions, if the starting speed is increased. **Originality.** Authors developed the methodology for determining the optimal values of the nominal mode parameters of electric trains with an asynchronous traction drive, with two-zone and three-zone frequency power regulation. **Practical value.** The above mentioned methodology can be the basis when forming technical requirements for new rolling stock for Ukraine's railways.

**Keywords:** electric train; starting and residual acceleration; starting speed; motion equation; traction characteristic; power regulation zone; specific force

### Introduction

Parameters of the nominal mode are related to the most important performance indicators of the electric rolling stock. Therefore, the problems of

determining their optimal values always inevitably arise when forming technical requirements for a new rolling stock. For the railways of Ukraine, these tasks are currently particularly relevant in connection with the need to renovate morally and physically obsolete locomotive fleet in conditions

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

of acute shortage of funds, when it is especially important to avoid the acquisition of inefficient equipment.

Determining the parameters of the nominal mode (traction force, speed of movement and power) of traction means is the main objective of the so-called traction supply problems. Review of the papers on this topic is given in [1, 5, 6]. There one can find the ways of solving such problems with regard to freight and passenger electric locomotives, mainly with a collector traction drive.

### Purpose

In the case of electric trains, the tasks of determining the parameters of nominal mode were considered in a smaller volume and only with reference to the collector traction drive [3, 4, 9]. In this article, the features of these traction supply problems for electric trains with an asynchronous traction drive are described.

### Methodology

The nominal mode power should be selected in such a way that it would be possible to realize the predetermined travel time along the section (or movement speed). With such a «blurred» statement of the problem, its solution contains many variants, and when determining the rules for selecting the best ones the work [6] proposes to apply the following indicators for a comparative evaluation of the variants:

- specific power consumption for train traction;
- excess capacity of the required locomotive fleet;
- the mean value of the traction multiplicity required for transportations.

Last two indicators make sense for freight and passenger traffic, as the weight (composition) of trains varies widely.

In the case of electric trains only the first of the above-mentioned indicators is used: electricity consumption, since in the general case, when the specific power is distributed along the length of the train, i.e. which accounts for 1 ton of train weight, it does not depend on train composition. For electric trains, where the traction motors are located in the end cars, the maximum train weight should be taken into account.

Based on the above and taking into account that the acceleration value during starting period (acceleration)  $a_s$  and acceleration at the design speed  $a_r$  (residual acceleration) refers to the important operational characteristics, the problem of determining the nominal power of the electric train is formulated as follows: for the given traction polygon, it is necessary to find such a value of the nominal mode power and corresponding traction value, so that it would be possible to carry out transportations with a given level of average speed with minimum electricity consumption for traction and the following conditions would be met:

- the speed of the train movement in the section does not have to exceed the established limits;
- it is possible to realize the given values of acceleration at start ( $a_s$ ) and the residual one ( $a_r$ ).

A more detailed consideration of the problem shows that in real conditions, when the starting acceleration and the train weight are given, the task of traction supply of electric trains practically reduces to determining the optimal value of the nominal mode speed.

To be convinced of the validity of the foregoing, let us determine the factors defining the nominal mode power.

The traction force in  $N$ , required to realize the given acceleration  $a$ , is determined on the basis of the equation of the train motion used for traction calculations [2, 12] as

$$F_k(v) = W_k(v) + 1000m(1 + \gamma)a, \quad N, \quad (1)$$

where  $F_k(v)$  – tangential traction force (on the rim of the driving wheels) of the motor cars,  $N$ ;  $W_k(v)$  – total movement resistance,  $N$ ;  $m$  – train weight,  $t$ ;  $1 + \gamma$  – inertia coefficient of the rotating masses of the train;  $a$  – acceleration,  $m/s^2$ .

Given that the train movement resistance

$$W_k(v) = 9,81mw_k(v), \quad (2)$$

where  $w_k(v)$  – specific total resistance to train movement,  $N/kN$ .

Taking into account (2), we transform (1) to the form

$$F_k(v) = 9,81m[w_k(v) + 102(1 + \gamma)a]. \quad (3)$$

When measuring the movement speed in

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

(km/h) the nominal mode power is defined as

$$N_n = 0,2778 \cdot 10^{-3} F_{kn} v_n, \text{ kW}, \quad (4)$$

where  $F_{kn}$  – tangential traction force related to one traction motor, N; the index «n» – means the value of the parameter corresponding to the nominal mode.

Substitution of (3) into (4) gives

$$N_n = 2,725 \cdot 10^{-3} m [w_k(v_n) + 102(1 + \gamma)a_s] v_n. \quad (5)$$

Expression (5) shows that the power of nominal mode at the given values  $m$ ,  $a_s$ ,  $(1 + \gamma)$  and  $w_k(v)_n$  dependencies is definitely determined by the value of the optimal mode speed, and thus the problem of choosing the optimal parameters of nominal mode of electric trains reduces to the choice of the movement speed in the nominal power mode from the condition of minimizing the electricity consumption for traction of trains.

To solve the problem, one can use the method proposed in [6]. Its implementation is carried out by successively solving the following tasks:

- determination of control parameters of the train movement equation;
- optimization of train traffic control for minimal electric power consumption;
- determination of the nominal mode speed, corresponding to the minimum power consumption when implementing the given travel time.

To solve the last two of the problems posed above, it is possible to apply the approaches used in solving similar problems for passenger electric locomotives [1, 5, 11]. Therefore, we will dwell only on the problem of determining the control parameters of the motion equation.

Traction calculations are based on the integration of the motion equation (6).

$$\frac{v dv}{ds} = \xi [u - w_o(v) - i(s)], \quad (6)$$

where  $\xi$  – is dimensional coefficient, the value of which depends on the accepted units of measurement of physical quantities;  $u$  – control parameter;  $w_o(v)$  – basic specific net train resistance;  $i$  – the value of the longitudinal path gradient, which is a

function of the path  $i(s)$ .

The value  $w_o(v)$  is determined as

$$w_o(v) = \begin{cases} w'_o(v) & \text{in traction mode;} \\ w_{ox}(v) & \text{in the run-out (idling) mode.} \end{cases} \quad (7)$$

The dependences  $w'_o(v)$  and  $w_{ox}(v)$  are determined by the corresponding dependences obtained on the basis of the experimental data [7, 8, 10].

The control parameter depends on the operation mode of the electric train:  $u > 0$  corresponds to the traction mode;  $u < 0$  – to the braking mode;  $u = 0$  to the run-out mode.

Let us consider the traction drive with a smooth control of the traction power. Then, in the power calculation the control parameters that satisfy the following conditions are adopted:

- traction mode  $0 \leq u \leq \overline{f}_k(v)$ ;
- breaking mode  $\overline{b}_t(v) \leq u \leq 0$ ,

where  $\overline{f}_k(v)$  и  $\overline{b}_t(v)$  – limiting traction and braking characteristics respectively, referred to 1 kN of the train weight.

Let us consider the problem of calculating dependencies  $\overline{f}_k(v)$  for the two most frequently encountered methods of 3-zone (Fig. 1, a) and 2-zone (Fig. 1, b) frequency control of the asynchronous traction drive power for electric trains.

In the case of 3-zone regulation, there is a possibility:

- in the zone 1 ( $0 \leq v \leq v_s$ ) – acceleration with the given starting traction force;
- in zone 2 ( $v_s \leq v \leq v_\alpha$ ) – the realization of the constant traction power;
- in zone 3 ( $v_\alpha \leq v \leq v_c$ ) – the traction power control is inversely proportional to the movement speed.

In the acceleration zone ( $0 \leq v \leq v_s$ ), the starting traction force of thrust in specific units (3)

$$\overline{f}_{ks}(v) = [w_k(v_s) + 102(1 + \gamma)a_s]. \quad (8)$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

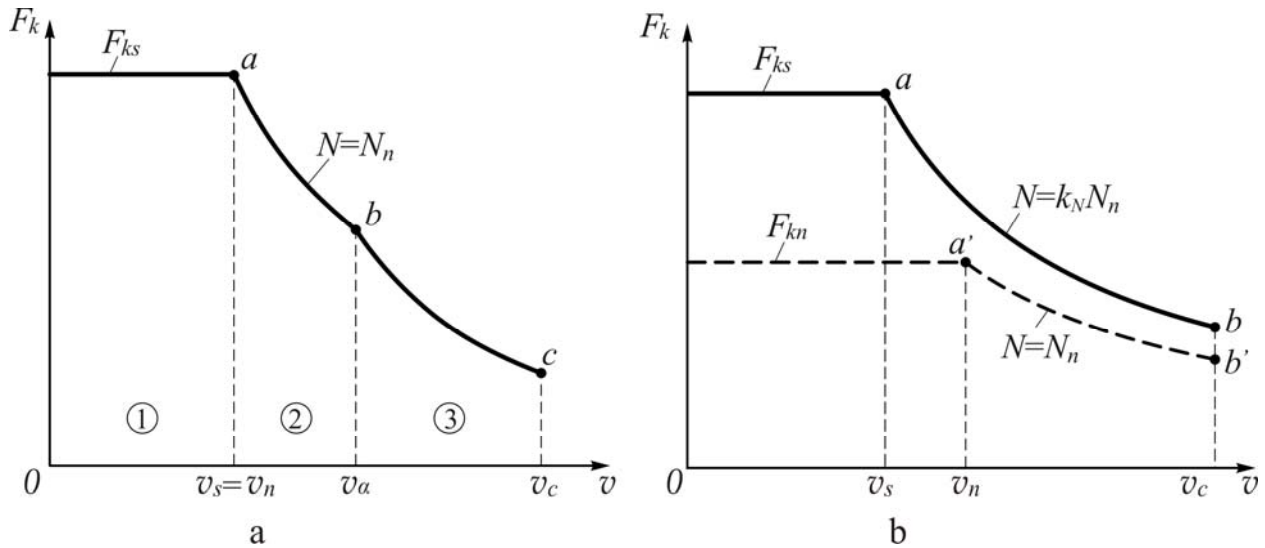


Fig. 1. The limiting traction characteristics of the electric trains, HRCS2 series:

a – the Hyundai-Rotem Company and b – EJ675 of SKODA Vagonka .

In zone 2 ( $v_s \leq v \leq v_\alpha$ )

$$N_s = N_{ab} \Big|_{v=v_s}.$$

Since  $N_s = F_{ks} v_s$  and  $N_{ab} = F_{k(ab)} v$  then

$$F_{k(ab)} = F_{ks} \frac{v_s}{v}. \quad (9)$$

Taking into account (8)

$$\overline{f_{k(ab)}}(v) = [w_k(v_s) + 102(1 + \gamma)a_s] \frac{v_s}{v}. \quad (10)$$

In the 3<sup>rd</sup> regulation zone ( $v_\alpha \leq v \leq v_c$ ) the ultimate traction power

$$N_{bc} = N_\alpha \frac{v_\alpha}{v}.$$

Since

$$N_{bc} = F_{k(bc)} v \text{ or } F_{k(bc)} = N_\alpha \frac{v_\alpha}{v^2}. \quad (11)$$

But since  $N_\alpha = F_{k\alpha} v_\alpha$ , where  $F_{k\alpha}$  – is the value  $F_{k(ab)}$  at  $v = v_\alpha$ , then

$$F_{k(bc)} = F_{k\alpha} \frac{v_\alpha^2}{v^2}. \quad (12)$$

From the (9) we have the following

$$F_{k\alpha} = F_{ks} \frac{v_s}{v_\alpha},$$

that is why

$$F_{k(bc)} = F_{ks} \frac{v_s v_\alpha}{v^2}. \quad (13)$$

We designate  $k_\alpha = \frac{v_\alpha}{v_c}$ , then  $v_\alpha = v_c k_\alpha$  and

$$F_{k(bc)} = F_{ks} \frac{v_s v_c k_\alpha}{v^2}. \quad (14)$$

where  $v_c$  – constructional speed of the train, km/h.

Taking into account the specific quantities, we obtain

$$\overline{f_{k(bc)}}(v) = [w_k(v_s) + 102(1 + \gamma)a_s] \frac{v_s v_c k_\alpha}{v^2}. \quad (15)$$

Let us consider the case of two-zone regulation using booster modes, i.e. when the implementation of loading modes providing for the realization of traction forces exceeding the values corresponding to the nominal mode is provided. This mode of operation is used, for example, on the Skoda electric train. In this case, the traction characteristic corresponds to that shown in the Fig. 1, b.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Let us introduce the designations

$$k_f = \frac{F_{ks}}{F_{kn}}; \quad k_N = \frac{N_s}{N_n}, \quad (16)$$

where  $N_s$  – is the maximal traction force, at  $v = v_s$ .

The limiting traction characteristic for the acceleration section is determined by the expression (8), and  $\overline{f_k}(v)(v)$  – according to the formula (10).

Nominal traction force

$$F_{kn} = \frac{F_{ks}}{k_f}. \quad (17)$$

The value of the nominal mode speed is obtained on the basis of the relation  $\frac{N_s}{N_n} = \frac{F_{ks} v_s}{F_{kn} v_n}$ , taking into account the expressions (16).

$$v_n = \frac{k_f}{k_N} v_s. \quad (18)$$

## Findings

The task of choosing the optimal values of the nominal mode speed  $v_n$  is solved by determining the electric power consumption with the variation of the possible values of the starting speed  $v_s$ , therefore one should take into account only those its values that ensure the implementation of the

given starting  $a_s$  and residual  $a_r$  accelerations at the selected control method.

As it can be seen from the Fig. 1a and Fig. 1b, the value of traction force at the design speed, other things being equal, increases with increasing starting speed. Therefore, in order to exclude variants that do not match the conditions of the problem solution, it is necessary to determine the minimal values  $v_s$  corresponding to the given starting and residual accelerations.

Since the traction force at the design speed:  
– from the one side

$$\overline{f_k}(v_c) = [w_k(v_s) + 102(1 + \gamma)a_s] \frac{v_s k_\alpha}{v_c};$$

– and from the other side

$$\overline{f_k}(v_c) = [w_k(v_c) + 102(1 + \gamma)a_r].$$

Neglecting the dependence of  $w_k$  on  $v_s$ , we obtain

$$v_s^{\min} = \frac{v_c [w_k(v_c) + 102(1 + \gamma)a_r]}{k_\alpha [w_k(v_s) + 102(1 + \gamma)a_s]}. \quad (19)$$

For the case of two zone regulation in the presented expression it should be taken  $k_\alpha = 1$ , ( $v_\alpha = v_c$ ).

In the calculations one should take only the values  $v_s \geq v_s^{\min}$ . Dependencies  $v_s^{\min}(a_s)$  for different values  $a_r$  are shown in the Fig. 2.

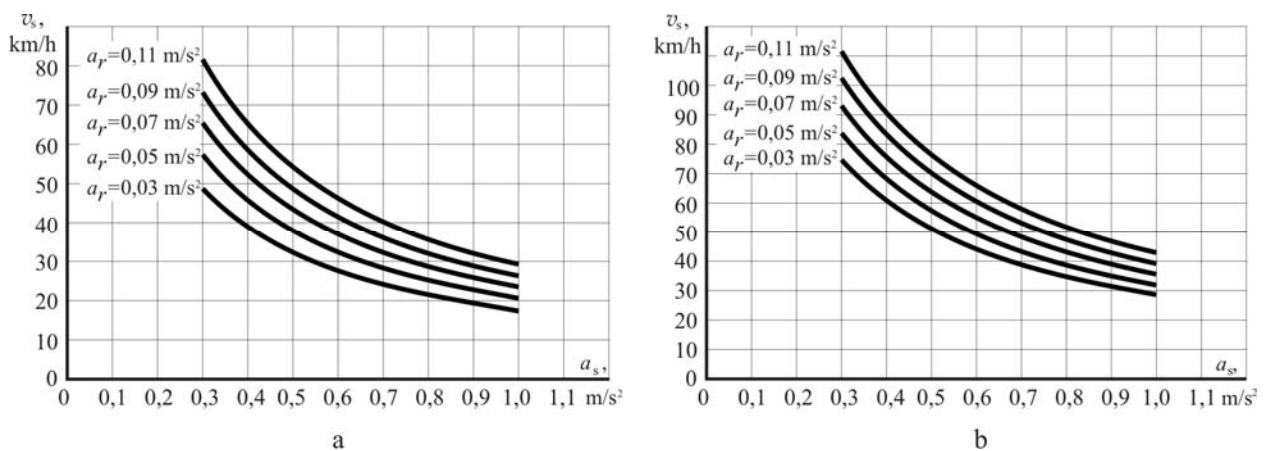


Fig. 2. The family of dependencies of the minimum starting speed on the starting acceleration with the variation of values of residual acceleration and design speed is: a – 160 km/h and b – 200 km/h

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

The value of the starting acceleration at the given train weight determines the tractive effort, and hence the use of the «wheel-rail» contact capabilities to realize the traction creepage. In order to exclude from consideration, the variants, when the traction force cannot be reliably realized according to the adhesion conditions, it is expedient to set the maximum permissible values of the starting acceleration according to the adhesion conditions, i.e. corresponding to the specified design coefficient of adhesion.

Estimated adhesive force

$$F_{ad}(v) = 9,81 \cdot 10^3 m_{pc} \psi_k(v), \text{ N} \quad (20)$$

where  $m_{pc}$  – adhesive weight (weight of power cars), t;  $\psi_k(v)$  – estimated coefficient of adhesion.

Specific value of the adhesion force

$$f_{ad}(v) = 10^3 \frac{m_{pc}}{m} \psi_k(v), \frac{\text{N}}{\text{kN}} \quad (21)$$

The necessary acceleration value is obtained from the well-known law of locomotive traction [2], according to which for the reliable operation of

a wheel-rail vehicle, it is necessary to fulfill the condition

$$\overline{f_k}(v) \leq f_{ad}(v).$$

Based on the expression (8) and (21) we obtain

$$a_{sv} = \frac{10^3 \frac{m_{pc}}{m} \psi_k(v) - w_k(v)}{102(1 + \gamma)}. \quad (22)$$

where  $w_k(v) = w_o(v)$  upon the condition that the electric train moves at the section, i.e.  $i = 0$  ‰.

Obviously, only values  $a_s \leq a_{sv}$  can be taken into account.

The dependences  $a_{sv}(v)$  for the variants of the concentrated and distributed traction are shown in the Fig. 3. They are considered for these electric trains of HRCS2 series by Hyundai-Rotem Company and EJ675 of «SKODA Vagonka». The calculations were performed with the initial data given in the Table 1.

Table 1

**Initial data for calculating the dependencies of the minimum permissible starting acceleration using the conditions of adhesion on the speed of motion  $a_{sv}(v)$ .**

| Electric train range             | Weight, t          |            | The inertia coefficient of the rotating masses of the train, $1 + \gamma$ | Dependence of the adhesion coefficient on the speed $\psi_k(v)$ | Dependence of the total specific movement resistance on the speed, $w_k(v)^2$ |
|----------------------------------|--------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
|                                  | adhesive, $m_{pc}$ | train, $m$ |                                                                           |                                                                 |                                                                               |
| 1                                | 2                  | 3          | 4                                                                         | 5                                                               | 6                                                                             |
| HRCS2<br>(distributed traction)  | 438                | 640        | 1.115                                                                     | $\psi_k(v) = 0,09 + \frac{2,6}{24 + 0,74v}$                     | $w_o(v) = 1,375 + 0,0178v + 0,000097v^2$                                      |
| EJ675<br>(concentrated traction) | 172                | 456        | 1.08                                                                      | $\psi_k(v) = 0,155 + \frac{4,2}{15 + 0,95v}$                    | $w_o(v) = 0,86 + 0,0093v + 0,00029v^2$                                        |

**Notations.** <sup>1</sup> The value of weight is presented with the maximum loading of cars by passengers.

<sup>2</sup> Total specific movement resistance is determined on condition of movement at the section.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

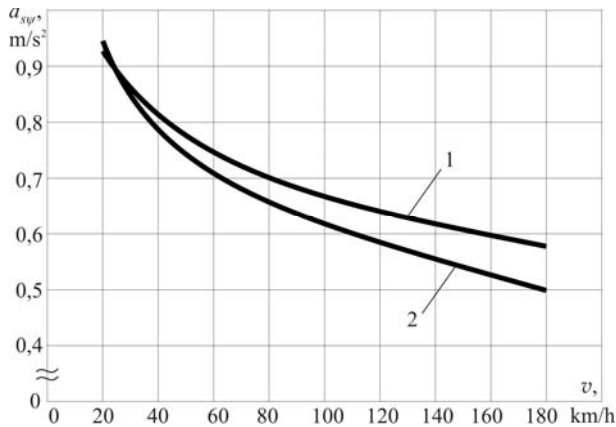


Fig. 3. Dependencies  $a_{sy}(v)$  for the variants of the distributed (curve 1) and concentrated (curve 2) traction

## Originality and Practical Value

Originality consists in developing a methodology for determining the optimum values for the parameters of the nominal mode of electric trains with asynchronous traction drive, with two-zone and three-zone frequency regulation of power.

The resulted methodology can serve as a basis at formation of technical requirements for a new rolling stock for railways of Ukraine.

## Conclusions

The materials presented in the article provide for the implementation of traction calculations (in terms of plotting the motion curves), in solving problems, selecting parameters for the nominal mode of electric trains with asynchronous traction drive.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Арпуль, С. В. Выбор рациональных параметров тягового электроподвижного состава / С. В. Арпуль // Электрификация транспорта. – 2014. – № 8. – С. 66–72.
2. Бабичков, А. М. Тяга поездов и тяговые расчеты : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. М. Бабичков, П. А. Гурский, А. П. Новиков. – Москва : Транспорт, 1971. – 280 с.
3. Бещева, Н. И. Пригородное движение на электрифицированных линиях / Н. И. Бещева // Тр. ВНИИЖТа. – Москва, 1961. – Вып. 223. – 372 с.
4. Бещева, Н. И. Сравнение отдельных видов тяги в пригородном пассажирском движении / Н. И. Бещева // Труды ЦНИИ МПС. – Москва, 1968. – Вып. 358. – 363 с.
5. Гетьман, Г. К. Вибір раціональних параметрів номінального режиму електровозів / Г. К. Гетьман, С. Л. Марікуца // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 96–105. doi: 10.15802/stp2017/92615.
6. Гетьман, Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монография / Г. К. Гетьман. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
7. Гетьман, Г. К. Теорія електричної тяги : підручник : у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – Т. 1. – 578 с.
8. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
9. Розенфельд, В. Е. Электрическая тяга поездов / В. Е. Розенфельд, Ю. Е. Равкин, И. А. Лакштовский. – Москва : Гос. трансп. ж.-д. изд-во, 1940. – 799 с.
10. Fischer, Sz. Traction Energy Consumption of Electric Locomotives and Electric Multiple Units at Speed Restrictions / Sz. Fischer // Acta Technica Jauriensis. – 2015. – Vol. 8, No. 3. – P. 240–256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384.
11. Optimization of Train Operation in Multiple Interstations with Multi-Population Genetic Algorithm / Y. Huang, X. Ma, S. Su, T. Tang // Energies. – 2015. – Vol. 8 (12). – P. 14311–14329. doi: 10.3390/en8121433.
12. Sarsembayev, B. Analyze of Impact of Track Alignment on the Energy Consumption Level / B. Sarsembayev, T. Suleimenov, M. Arpabekov // Intern. J. of Traffic and Transportation Engineering. – 2015. – Vol. 4, No. 2. – P. 45–59. doi: 10.5923/j.ijtte.20150402.02.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Г. К. ГЕТЬМАН<sup>1</sup>, С. Л. МАРИКУЦА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

<sup>2\*</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, ел. пошта marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

## ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ІЗ АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ

**Мета.** Параметри номінального режиму відносяться до найважливіших експлуатаційних показників тягових засобів, тому задачі вибору їх оптимальних значень завжди неминуче виникають при формуванні технічних вимог на новий рухомий склад. У роботі необхідно викласти особливості рішення зазначених задач для електропоїздів із асинхронним тяговим приводом при двозонному та тризонному частотному регулюванні потужності. **Методика.** Потужність номінального режиму електрорухомого складу повинна бути обрана таким чином, щоб забезпечувалася можливість реалізації заданого часу ходу по ділянці або швидкості руху. Виходячи із цього, а також враховуючи, що до важливих експлуатаційних характеристик електропоїздів відноситься величина прискорення в період пуску й прискорення при конструкційній швидкості, сформулюємо задачу визначення номінальної потужності. В задачі для заданого полігона тяги необхідно знайти таке значення потужності номінального режиму й відповідне їй значення сили тяги, щоб забезпечувалася можливість здійснювати перевезення із заданим рівнем середньої швидкості руху при мінімальній витраті електроенергії на тягу. При цьому необхідно, щоб виконувалися умови: а) швидкість руху електропоїзда на ділянці не перевищує встановлених обмежень; б) забезпечується можливість реалізації заданих значень прискорень. Більш детальний розгляд питання показує, що в реальних умовах, коли задані пускове прискорення й маса поїзда, задача визначення потужності електропоїзда практично зводиться до визначення оптимального значення швидкості номінального режиму. **Результати.** Задача вибору оптимальних значень швидкості номінального режиму вирішується шляхом визначення витрати електроенергії при варіації можливих значень пускової швидкості, тому в розрахунки слід приймати тільки ті її значення, які забезпечують реалізацію заданих пускового й залишкового прискорень. У роботі показано, що величина сили тяги при збільшенні конструкційної швидкості й інших рівних умовах зростає, якщо збільшувати пускову швидкість. **Наукова новизна.** Авторами розроблена методика для визначення оптимальних значень параметрів номінального режиму електропоїздів із асинхронним тяговим приводом, при двозонному та тризонному частотному регулюванні потужності. **Практична значимість.** Наведена методика може бути основою при формуванні технічних вимог на новий рухомий склад для залізниць України.

**Ключові слова:** електропоїзд; пускове й залишкове прискорення; пускова швидкість; рівняння руху; тягова характеристика; зона регулювання потужності; питома сила

Г. К. ГЕТЬМАН<sup>1</sup>, С. Л. МАРИКУЦА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта getman-gk@i.ua, ORCID 0000-0002-3471-6096

<sup>2\*</sup>Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, эл. почта marikutsasergei@gmail.com, ORCID 0000-0002-0429-6633

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

**Цель.** Параметры номинального режима относятся к важнейшим эксплуатационным показателям тяговых средств, поэтому задачи выбора их оптимальных значений всегда неизбежно возникают при формировании технических требований на новый подвижной состав. В работе необходимо изложить особенности решения указанных задач для электропоездов с асинхронным тяговым приводом при двухзонном и трехзонном частотном регулировании мощности. **Методика.** Мощность номинального режима электроподвижного состава должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечивалась возможность реализации заданного времени хода по участку или скорости движения. Исходя из этого, а также учитывая, что к важным эксплуатационным характеристикам электропоездов относится величина ускорения в период пуска и ускорения при конструкционной скорости, сформулируем задачу определения номинальной мощности. В задаче для заданного полигона тяги необходимо найти такое значение мощности номинального режима и соответствующее ей значение силы тяги, чтобы обеспечивалась возможность осуществлять перевозки с заданным уровнем средней скорости движения при минимальных затратах электроэнергии на тягу. При этом необходимо чтобы выполнялись условия: а) скорость движения электропоезда на участке не превышает установленных ограничений; б) обеспечивается возможность реализации заданных значений ускорений. Более детальное рассмотрение вопроса показывает, что в реальных условиях, когда задано пусковое ускорение и масса поезда, задача определения мощности электропоезда практически сводится к определению оптимального значения скорости номинального режима. **Результаты.** Задача выбора оптимальных значений скорости номинального режима решается путем определения расхода электроэнергии при вариации возможных значений пусковой скорости, поэтому в расчет следует принимать только те ее значения, которые обеспечивают реализацию заданных пускового и остаточного ускорений. В работе показано, что величина силы тяги при увеличении конструкционной скорости и прочих равных условиях возрастает, если увеличивать пусковую скорость. **Научная новизна.** Авторами разработана методика для определения оптимальных значений параметров номинального режима электропоездов с асинхронным тяговым приводом, при двухзонном и трехзонном частотном регулировании мощности. **Практическая значимость.** Приведенная методика может служить основой при формировании технических требований на новый подвижной состав для железных дорог Украины.

**Ключевые слова:** электропоезд; пусковое и остаточное ускорение; пусковая скорость; уравнение движения; тяговая характеристика; зона регулирования мощности; удельная сила

## REFERENCES

1. Arpul, S. V. (2014). The choice of rational parameters of the traction electric rolling stock. *Electrification of Transport*, 8, 66-72.
2. Babichkov, A. M., Gurskiy, P. A., & Novikov, A. P. (1971). *Tyaga poezdov i tyagovyye raschety*. Moscow: Transport.
3. Beshcheva, N. I. (1961). *Prigorodnoye dvizheniye na elektrifitsirovannykh liniyakh*. Moscow: Railway research institution of railway transport.
4. Beshcheva, N. I. (1968). *Sravneniye otdelnykh vidov tyagi v prigorodnom passazhirskom dvizhenii*. Moscow: Transport.
5. Hetman, H. K., & Marikutsa, S. L. (2017). Selection of rational parameters of the nominal mode of electric locomotives. *Science and Transport Progress*, 1(67), 96-105. doi: 10.15802/stp2017/92615
6. Hetman, H. K. (2008). *Nauchnyye osnovy opredeleniya ratsionalnogo moshchnostnogo ryada tyagovykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
7. Hetman, H. K. (2014). *Teoriia elektrychnoi tiahы* (Vol. 1). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
8. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty*. (1985). Moscow: Transport.
9. Rozenfeld, V. Y., Ravkin, Y. Y., & Lakstovskiy, I. A. (1940). *Elektricheskaya tyaga poyezdov*. Moscow: Transzheldorizdat.
10. Fischer, S. (2015). Traction Energy Consumption of Electric Locomotives and Electric Multiple Units at Speed Restrictions. *Acta Technica Jauriensis*, 8(3), 240-256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384
11. Huang, Y., Ma, X., Su, S., & Tang, T. (2015). Optimization of Train Operation in Multiple Interstations with Multi-Population Genetic Algorithm. *Energies*, 8(12), 14311-14329. doi: 10.3390/en8121433

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

---

12. Sarsembayev, B., Suleimenov, T., & Arpabekov, M. (2015). Analyze of Impact of Track Alignment on the Energy Consumption Level. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4(2), 45-59. doi: 10.5923/j.ijtte.20150402.02

*Prof. A. M. Afanasov, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. O. O. Beihul, D. Sc. (Tech.), (Ukraine)*  
*recommended this article to be published*

Received: Feb. 10, 2017

Accessed: May 17, 2017

УДК 629.423.31:621.313.222.013

А. Е. ДРУБЕЦКИЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 33 55 38, эл. почта drubetskiy.ae@gmail.com, ORCID 0000-0001-5691-0925

## РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Цель.** В исследовании предполагается разработать методику расчета магнитных характеристик некомпенсированных тяговых электродвигателей (ТЭД) при любой степени ослабления возбуждения на базе аппроксимирующего выражения для усовершенствованной универсальной магнитной характеристики (УМХ). Необходимо также осуществить анализ выражений для усовершенствованной УМХ с целью нахождения выражения, наиболее полно удовлетворяющего требованиям разработки методики определения индуктивных параметров ТЭД. **Методика.** Для построения характеристик по усовершенствованной УМХ необходимо для каждой степени ослабления возбуждения определить коэффициент насыщения. Это возможно осуществить только аналитически. Для упрощения аналитического нахождения коэффициента насыщения предложен метод, основанный на решении системы из двух уравнений, одним из которых является сама УМХ, а вторым – уравнение прямой, угловой коэффициент которой пропорционален коэффициенту насыщения. Получающиеся в результате расчетов значения коэффициента насыщения для степеней возбуждения  $\beta < 1$  по сути являются коэффициентами формы магнитной характеристики. Чтобы избавиться от необходимости каждый раз при расчете характеристик определять коэффициенты аппроксимации, предложена форма усовершенствованной УМХ, у которой роль аргумента выполняет магнитодвижущая сила (МДС) обмотки возбуждения. **Результаты.** Доказано, что с помощью усовершенствованной УМХ возможен расчет характеристик некомпенсированных ТЭД для любых степеней ослабления возбуждения. Точность расчета при  $\beta = 1$  не отличается от таковой при расчете по УМХ, предложенной проф. М. Д. Находкиным. Такая же точность сохраняется при степенях возбуждения, отличных от единицы. **Научная новизна.** Предложена аналитическая методика расчета магнитных (скоростных) характеристик некомпенсированных ТЭД для любой степени ослабления возбуждения с помощью усовершенствованной УМХ. Также предложена аналитическая методика определения коэффициента насыщения для усовершенствованной УМХ при любой степени ослабления возбуждения. Благодаря введению в качестве аргумента МДС обмотки возбуждения отпадает необходимость в определении коэффициентов аппроксимации для каждого конкретного ТЭД. **Практическая значимость.** Разработанная методика позволяет производить расчеты магнитных характеристик некомпенсированных ТЭД для любой степени ослабления возбуждения. На ее базе возможна разработка методики определения индуктивных параметров ТЭД, использующей в качестве исходных данных коэффициент насыщения машины.

**Ключевые слова:** универсальная магнитная характеристика; аппроксимация; тяговый электродвигатель; магнитные характеристики

### Введение

Рабочие характеристики тяговых электродвигателей (ТЭД) и их поведение при переходных процессах определяются их магнитными характеристиками [14]. Кроме того, благодаря широкому использованию ЭВМ при расчетах, проектировании и моделировании ТЭД все более актуальными становятся различные методы аппроксимации магнитных характеристик [1, 2, 5, 13, 18–22].

В представленных работах аппроксимация магнитных характеристик вычисляется выражением с одной переменной в виде МДС обмотки возбуждения или тока обмотки возбуждения. Тем не менее, несмотря на всю простоту такого подхода, он оказывается неприменим для некомпенсированных ТЭД в случае, если аппроксимирующее выражение необходимо использовать для режима ослабления возбуждения отличного от того, при котором выполнялась аппроксимация. Это происходит из-за

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

того, что в некомпенсированных ТЭД сильное влияние на основной магнитный поток оказывает реакция якоря [4, 8, 10, 16]. В таком случае необходима методика, позволяющая учесть размагничивающее действие реакции якоря при аппроксимации основного магнитного потока. Этим требованиям полностью соответствует методика, описанная в работе [3]. Данная методика для определения основного магнитного потока требует наличия характеристики намагничивания  $\Phi_d(F_e)$ , т.е. зависимости основного магнитного потока от МДС обмотки возбуждения  $F_e$ , определенной на холостом ходу. Как правило, эта характеристика не приводится в справочной литературе. В этом случае очень удобным для аппроксимации магнитных характеристик является использование коэффициента насыщения  $k_n$  и УМХ [1].

В работе [7] выполнен анализ возможности определения магнитной характеристики ТЭД с учетом размагничивающего действия реакции якоря с использованием достоинства методик, описанных в [3] и [1, 14, 16].

## Цель

Целью данной работы является разработка методики аналитического расчета магнитных характеристик некомпенсированных ТЭД при любой степени ослабления возбуждения на базе аппроксимирующего выражения для УМХ. А также, проведение анализа выражений для усовершенствованной УМХ с целью нахождения выражения, наиболее полно удовлетво-

ряющего требованиям для разработки методики определения индуктивных параметров ТЭД.

## Методика

Как было указано в [7], процесс разработки методики для определения индуктивных параметров по УМХ разделен на пять пунктов, четыре из которых были описаны в [7]. В данной работе рассмотрим пятый пункт «**Определение на базе аппроксимирующего выражения для УМХ универсальных формул для индуктивных параметров машины**».

Для сохранения смысловой структуры статьи сохраним нумерацию пунктов разработки методики, принятую в [7]. Так как освещение всего пункта 5 выходит за объем одной статьи, разобьем его на два подпункта:

5.1. расчет характеристик некомпенсированных ТЭД с помощью усовершенствованной УМХ;

5.2. определение универсальных формул для индуктивных параметров некомпенсированных ТЭД.

В данной работе будет рассмотрен подпункт «**Определение на базе аппроксимирующего выражения для УМХ универсальных формул для индуктивных параметров машины**», а именно:

5.1. **расчет характеристик некомпенсированных ТЭД с помощью усовершенствованной УМХ.**

В работе [7] было получено аппроксимирующее выражение для УМХ применительно к некомпенсированному ТЭД, оно имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{dq}(\tilde{i}_a) = & \frac{p_1}{2} \left[ \frac{1}{0,316} (\beta + 0,316) \arctg(p_2 \tilde{i}_a w_e (\beta + 0,316)) - \frac{1}{0,316} (\beta - 0,316) \arctg(p_2 \tilde{i}_a w_e (\beta - 0,316)) \right] - \\ & - \frac{1}{-3,342 \tilde{i}_a} \ln \left( \frac{1 + 0,007744 (68 \tilde{i}_a (\beta + 0,316))^2}{1 + 0,007744 (68 \tilde{i}_a (\beta - 0,316))^2} \right) + p_3 \tilde{i}_a \beta w_e, \quad (1) \end{aligned}$$

где  $\tilde{\Phi}_{dq}$  и  $\tilde{i}_a$  – основной магнитный поток и ток якоря машины в относительных единицах;  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  – коэффициенты аппроксимации;  $w_e$  – число витков обмотки возбуждения машины, для которой выполняется построение магнитной характеристики;  $\beta$  – степень ослабления возбуждения.

Основные принципы построения магнитных характеристик по усовершенствованной УМХ не отличаются от тех, которые описаны в литературе по проектированию тяговых электрических машин [14, 16]. То есть для определения реальных характеристик машины необходимо определить масштабы для магнитного потока и МДС (тока). Однако, есть существенные раз-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

личия в способах построения реальных характеристик. Различия заключаются в том, что для каждой степени ослабления возбуждения необходимо определить свои масштабы. Также, в случае проектирования новой машины, усовершенствованную УМХ для ослабленного возбуждения невозможно заранее изобразить графически, как это сделано для  $\beta=1$ . Это происходит из-за того, что значения степеней ослабления возбуждения, в том числе и минимальные, определяются в процессе расчета проектируемой машины. Поэтому единственно возможным способом построения характеристик по усовершенствованной УМХ является аналитический.

Чтобы проверить адекватность выражения (1) необходимо выполнить построение магнитных характеристик любого некомпенсированного ТЭД для различных степеней ослабления возбуждения. В качестве примера рассмотрим двигателя НБ-406 и РТ-51Д.

Коэффициенты аппроксимации для НБ-406  $p_1 = -0,6226134558$ ,  $p_2 = -0,1368988514$ ,  $p_3 = 0,0029770886$ .

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{\Phi}_{dq} &= \frac{p_1}{2} \left[ \frac{1}{0,316} (\beta + 0,316) \arctg(p_2 \tilde{i}_a w_e (\beta + 0,316)) - \frac{1}{0,316} (\beta - 0,316) \arctg(p_2 \tilde{i}_a w_e (\beta - 0,316)) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{-3,342 \tilde{i}_a} \ln \left( \frac{1 + 0,007744 (68 \tilde{i}_a (\beta + 0,316))^2}{1 + 0,007744 (68 \tilde{i}_a (\beta - 0,316))^2} \right) \right] + p_3 \tilde{i}_a \beta w_e; \\ \tilde{\Phi}_{dq} &= \frac{0,426}{0,145 k_n} \tilde{i}_a. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Для удобства решения системы (4) можно воспользоваться одним из прикладных математических пакетов программного обеспечения, например, MathCAD.

Координаты точки пересечения УМХ и ПКН для НБ-406 при  $\beta=1$ ,  $\tilde{\Phi}_{dq}(\tilde{i}_a) = 0,883$  и  $\tilde{i}_a = 0,631$  являются также и масштабами для магнитного потока и тока. Определив масштабы, можно рассчитать магнитные характеристики в абсолютных единицах [14, 16].

Отдельно следует рассмотреть расчет магнитных характеристик для ослабленного поля. Здесь следует обратить внимание и на вид усо-

вершенствованной УМХ для ослабленного возбуждения, и на изменения при этом коэффициента насыщения. Вид усовершенствованной УМХ при различных степенях ослабления возбуждения, соответствующих степеням ослабления возбуждения НБ-406, показан на рис. 1. На этом же рисунке указаны точки пересечения УМХ и ПКН для  $\beta=1$  и  $\beta=0,36$ .

$$\tilde{\Phi}_s(\tilde{i}) = \frac{0,426}{0,145} \tilde{i}, \quad (2)$$

С помощью математических преобразований находим, что угловой коэффициент ПКН

$$\frac{0,426}{0,145 k_n}, \quad (3)$$

Далее точка пересечения УМХ и ПКН определяется аналитически, путем решения соответствующей системы из двух уравнений:

Как видно из рис. 1, отношение отрезков  $\frac{ac}{ab} = k_n$  при  $\beta=1$  не равно отношению  $\frac{a'c'}{a'b'}$  при  $\beta=0,36$ , это связано с тем, что в качестве аргумента в выражении (1) принят ток якоря. Чтобы не вносить путаницу в объяснения, от-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ношение абсцисс точек пересечения ПКН и УМХ при любых степенях ослабления возбуждения в дальнейшем будет сохранять название «коэффициент насыщения», хотя, строго говоря, оно таковым не является. Очевидно, что коэффициент насыщения по мере уменьшения  $\beta$  растет. В данном случае были получены такие значения коэффициента насыщения:

- при  $\beta = 0,75$   $k_n = 2,366$ ;
- при  $\beta = 0,55$   $k_n = 2,537$ ;
- при  $\beta = 0,43$   $k_n = 2,85$ ;
- при  $\beta = 0,36$   $k_n = 3,285$ .

Затем для полученных коэффициентов насыщения по системе уравнений (4) определяются масштабы и строятся магнитные характеристики для ослабленного поля [14, 16].

Хотелось бы отметить, что, несмотря на утрату физического значения коэффициента насыщения при  $\beta < 1$ , а именно из отношения МДС обмотки возбуждения к падению магнитного напряжения в воздушном зазоре, он полностью соответствует своему определению как коэффициент формы магнитной характеристики [14].

Магнитные характеристики НБ-406 в абсолютных единицах приведены на рис. 2.

Сплошными линиями на рис. 2 показаны магнитные характеристики, полученные из скоростных характеристик [15], пунктирными линиями – полученные по усовершенствованной УМХ. Некоторое расхождение характеристик при  $\beta = 0,55$  и  $\beta = 0,43$  обусловлено неточным определением коэффициента насыщения в этих режимах (неточность ПТР).

Таким же образом выполнено построение характеристик для двигателя РТ-51Д. Коэффициенты аппроксимации, рассчитанные для (1) при  $\beta = 1$ :  $p_1 = -0,5979980411$ ,  $p_2 = -0,0876789819$ ,  $p_3 = 0,0023917489$ . Заметим, что коэффициенты аппроксимации рассчитываются при  $\beta = 1$  независимо от того, какой режим возбуждения является номинальным для данной машины. Значения коэффициента насыщения при различных степенях ослабления возбуждения:

- при  $\beta = 0,925$   $k_n = 2,61$ ;
- при  $\beta = 0,532$   $k_n = 3,113$ ;
- при  $\beta = 0,32$   $k_n = 4,232$ .

Магнитные характеристики в абсолютных единицах для двигателя РТ-51Д построены на рис. 3.

Как видно, визуализация в процессе расчетов по выражению (1) имеет хорошую наглядность, так как построение ведется в зависимости от тока якоря, который остается неизменным при ослаблении возбуждения. Однако, как видно из примеров расчетов характеристик по выражению (1), для каждой конкретной машины необходимо определять коэффициенты аппроксимации. Такой подход неприемлем для инженерной практики, так как даже при наличии современных прикладных математических программных пакетов нахождение коэффициентов аппроксимации занимает весьма длительное время. Особенно сильно это проявляется при проектировании тяговых электрических машин, когда во время расчета приходится несколько раз уточнять параметры машины. Следовательно, выражению (1) необходимо придать такую форму, при которой отпадает необходимость в определении коэффициентов аппроксимации отдельно для каждой тяговой электрической машины. Для решения этой задачи подходит форма выражения усовершенствованной УМХ, в которой в качестве аргумента выступает МДС обмотки возбуждения.

В работе [7] показано, что исходную формулу для усовершенствованной УМХ, которая является функцией двух переменных, можно привести к функции одной переменной. Исходная формула для усовершенствованной УМХ в абсолютных единицах имеет вид:

$$\Phi_{dq}(F_\phi, F_{aq}^*) = \frac{p_1}{2F_{aq}^*} [F_2 \arctg(p_2 F_2) - F_1 \arctg(p_2 F_1) - \frac{1}{2p_2} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 F_2^2}{1 + p_2^2 F_1^2} \right)] + p_3 F_\phi, \quad (5)$$

где  $F_1 = F_\phi - F_{aq}^*$  и  $F_2 = F_\phi + F_{aq}^*$ ;  $F_\phi$  – МДС обмотки возбуждения;  $F_{aq}^*$  – МДС обмотки якоря, действующая в пределах расчетного полюсного деления.

Применим методы приведения выражения (5) к функции одной переменной, описанные в [7]. Принимая во внимание, что вид полученного выражения в относительных единицах

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

аналогичен виду вираження в абсолютних, по-лучим вираження для усовершенствованной

УМХ с МДС обмотки возбуждения в качестве аргумента:

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{dq}(\tilde{F}_B) = & \frac{P_1}{2 \cdot 0,316} \left[ (\beta + 0,316) \operatorname{arctg}(p_2 \tilde{F}_B (\beta + 0,316)) - (\beta - 0,316) \operatorname{arctg}(p_2 \tilde{F}_B (\beta - 0,316)) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2 \cdot p_2 \tilde{F}_B} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 (\tilde{F}_B (\beta + 0,316))^2}{1 + p_2^2 (\tilde{F}_B (\beta - 0,316))^2} \right) \right] + p_3 \tilde{F}_B \beta, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\tilde{F}_B$  – МДС обмотки возбуждения в относительных единицах.

Коэффициенты аппроксимации для выражения (6) имеют значения  $p_1 = 0,6431392636$ ,  $p_2 = 5,4546969368$ ,  $p_3 = 0,1075124679$  и являются едиными для всех типов некомпенсированных тяговых электродвигателей.

Здесь стоит отметить, что если в качестве аргумента по оси абсцисс откладывается МДС обмотки возбуждения, то изображение семейства характеристик (магнитных или скоростных) для разных степеней ослабления возбуждения является затруднительным. Это происходит из-за того, что невозможно, как в случае с током якоря, для одного и того же значения МДС определить несколько значений магнитного потока.

Чтобы преодолеть это затруднение в методике построения магнитных характеристик по выражению (6) введено допущение, что МДС обмотки возбуждения не изменяется при изменении  $\beta$ , то есть она пропорциональна току якоря, а не возбуждения. В остальном методика расчета характеристик по выражению (6) аналогична той, которая была рассмотрена для выражения (1).

Выполним построение магнитных характеристик по выражению (6) для тяговых двигателей НБ-406 и РТ-51Д. Значения коэффициентов насыщения были определены в предыдущем расчете. На рис. 4 и 5 показаны магнитные характеристики для НБ-406 и РТ-51Д соответственно.

Как видно из рис. 4 и 5 точность расчета по выражению (6) такая же, как и по выражению

(1). Однако, выражение (6), в отличие от выражения (1), может быть применено для всех типов некомпенсированных ТЭД постоянного тока без определения коэффициентов аппроксимации для каждой машины в отдельности.

Очевидно, чтобы получить магнитные характеристики в функции тока якоря необходимо полученную МДС обмотки возбуждения разделить на количество ее витков  $w_e$ .

#### Научная новизна и практическая значимость

В выражении для усовершенствованной УМХ удалось избавиться от необходимости пересчета коэффициентов аппроксимации для каждой конкретной машины. Это стало возможным благодаря замене тока в качестве аргумента на МДС обмотки возбуждения. Таким образом, появилась возможность избавиться от влияния конструктивных особенностей конкретной машины (а именно, влияние количества витков обмотки возбуждения) на результат определения коэффициентов аппроксимации.

#### Выводы

Выполнен анализ аппроксимирующей функции усовершенствованной УМХ для различных аргументов. На базе усовершенствованной УМХ с аргументом в виде МДС обмотки возбуждения возможно выполнить расчет магнитных (скоростных) характеристик без необходимости определять коэффициенты аппроксимации для каждого типа некомпенсированных ТЭД в отдельности.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

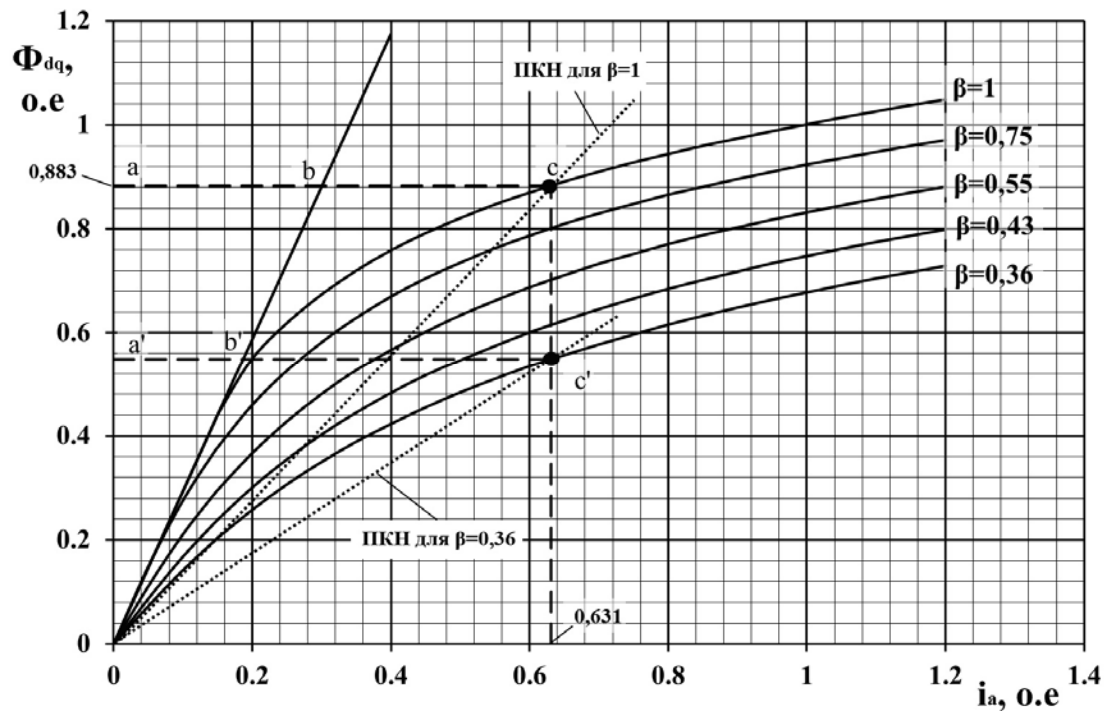


Рис. 1. Вид усовершенствованной УМХ при различных степенях  
ослабления возбуждения для НБ-406

Fig. 1. Type of improved of universal magnetic characteristic at various degrees  
of attenuation of excitation of NB-406

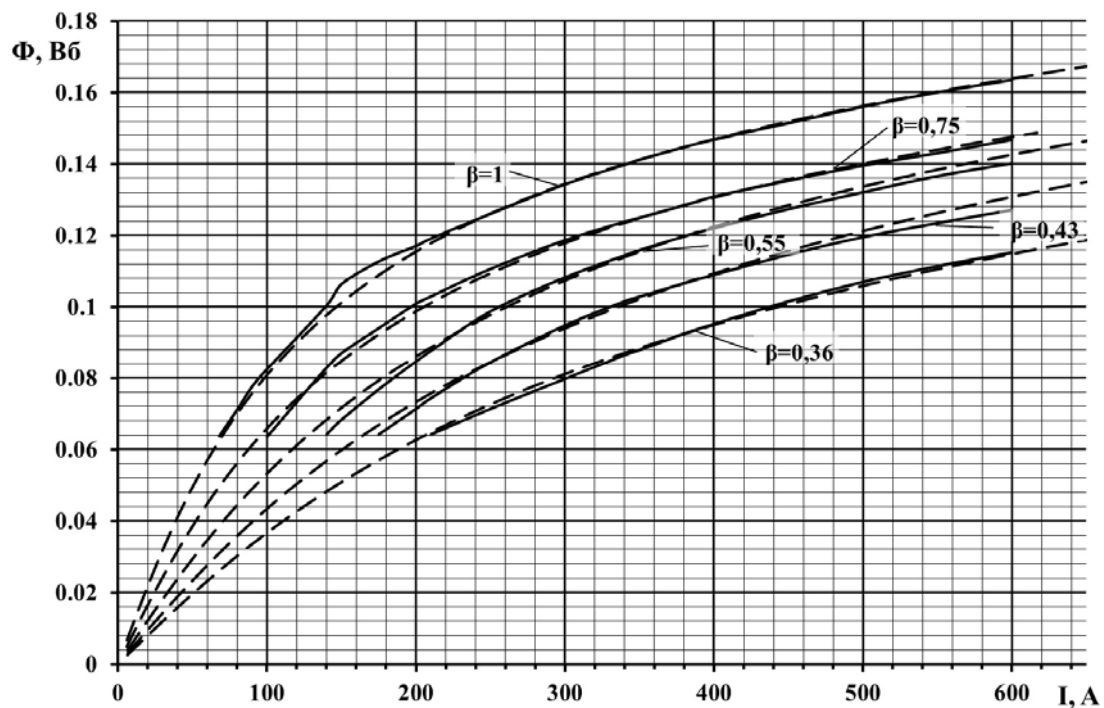


Рис. 2. Магнитные характеристики НБ-406, построенные по выражению (1)

Fig. 2. Magnetic characteristics of NB-406, constructed according to the expression (1)

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

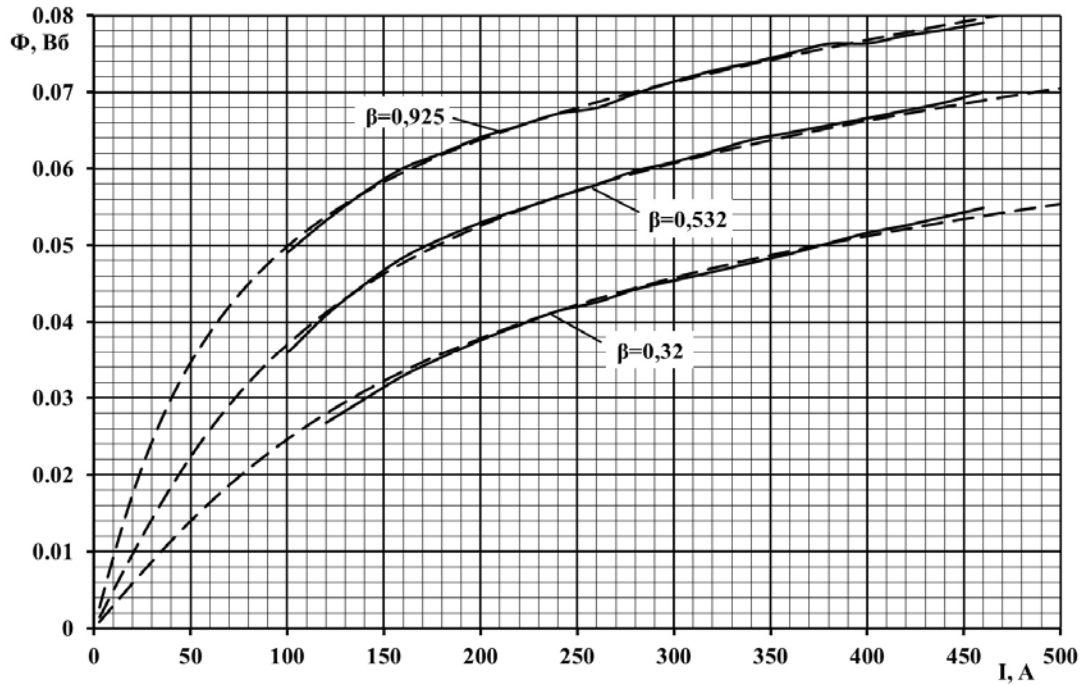


Рис. 3. Магнитные характеристики РТ-51Д, построенные по выражению (1)

Fig. 3. The magnetic characteristics of RT-51D, constructed according to the expression (1)

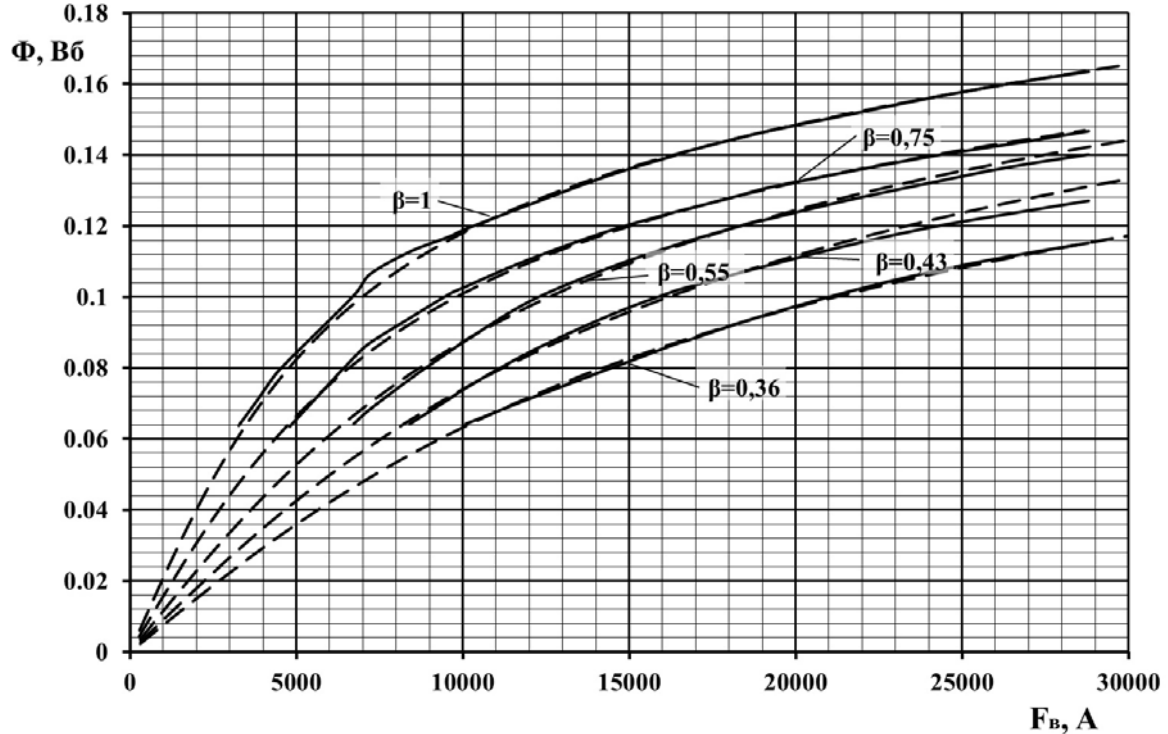


Рис. 4. Магнитные характеристики НБ-406, построенные по выражению (6)

Fig. 4. Magnetic characteristics of NB-406, constructed according to the expression (6)

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

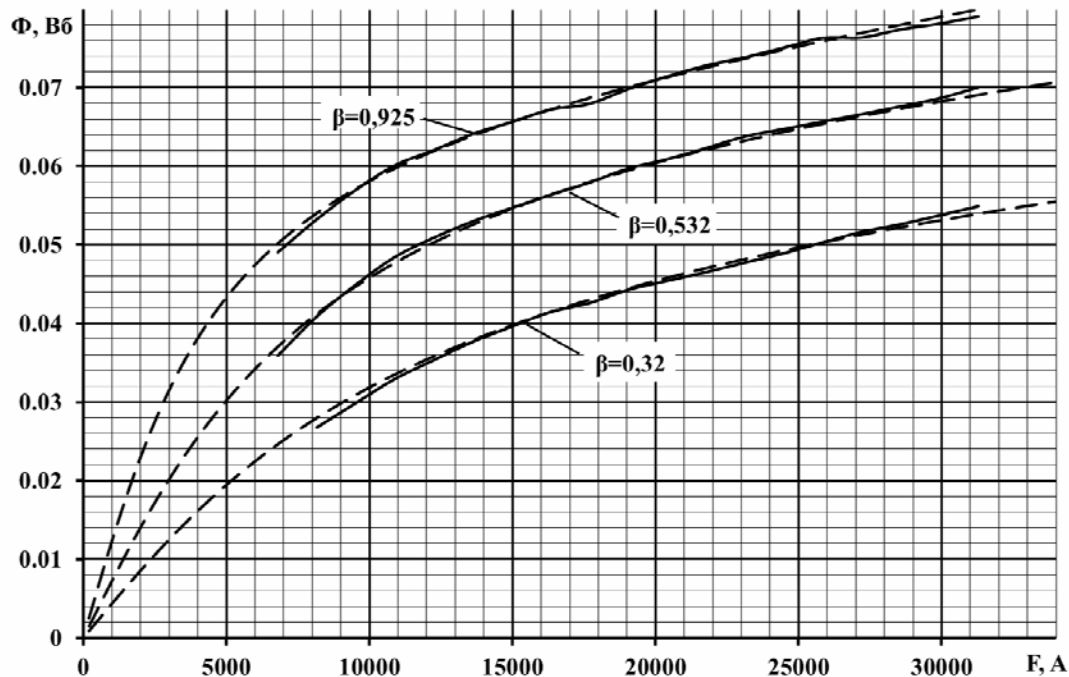


Рис. 5. Магнитные характеристики РТ-51Д, построенные по выражению (6)

Fig. 5. Magnetic characteristics of RT-51D, constructed according to the expression (6)

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасов, А. М. Аппроксимация магнитных характеристик тяговых двигателей электроподвижного состава / А. М. Афанасов // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2012. – № 4. – С. 25–29.
2. Белкина, Е. Н. Анализ способов аппроксимации кривой намагничивания электротехнической стали / Е. Н. Белкина, С. А. Жуков // Инновационная наука. – 2015. – № 5-2. – С. 22–27.
3. Бельман, М. Х. Переходные процессы в микродвигателях постоянного тока при импульсном питании / М. Х. Бельман. – Ленинград : Энергия, 1975. – 184 с.
4. Вольдек, А. И. Электрические машины : учеб. для студ. высш. техн. учеб. заведений / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Ленинград : Энергия, 1978. – 832 с.
5. Гетьман, Г. К. Аналіз аналітичних функцій для апроксимації універсальної магнітної характеристики тягових двигунів постійного та пульсуючого струму / Г. К. Гетьман, С. Л. Марікуца // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 63–71.
6. Гетьман, Г. К. Об использовании универсальной магнитной характеристики для расчета электро механических характеристик тяговых двигателей / Г. К. Гетьман, С. Н. Голик // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 16. – С. 21–25.
7. Друбецкий, А. Е. Аппроксимация универсальной магнитной характеристики для моделирования тяговых электрических машин / А. Е. Друбецкий // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 1 (67). – С. 106–116. doi: 10.15802/stp2017/94031.
8. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины : учеб. для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – Москва : Энергия, 1980. – 928 с.
9. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей : справ. книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – 3-е изд. перераб. и доп. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
10. Костенко, М. П. Электрические машины : учеб. для студ. высш. техн. учеб. заведений : в 2 ч. / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. – Ленинград : Энергия, 1972. – Ч. 1 : Машины постоянного тока. Трансформаторы. – 544 с.
11. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки : підручник : в 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2006. – 336 с.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

12. Матюк, В. Ф. Математические модели кривой намагничивания и петель магнитного гистерезиса. Ч. I. Анализ моделей / В. Ф. Матюк, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2011. – № 2 – С. 3–35.
13. Моделирование тягового электропривода с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения / А. А. Шавелкин, И. А. Костенко, В. А. Герасименко, А. Н. Мовчан // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2016. – № 1 (2). – С. 42–48.
14. Находкин, М. Д. Универсальная магнитная характеристика / М. Д. Находкин, В. С. Хвостов // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 1. – С. 44–48.
15. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
16. Проектирование тяговых электрических машин : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров, М. А. Козорезов. – Москва : Транспорт, 1976. – 624 с.
17. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / под ред. А. И. Тищенко. – Москва : Транспорт, 1976. – 432 с.
18. Discrete-Time Neural Sliding-Mode Block Control for a DC Motor With Controlled Flux / C. E. Castaneda, A. G. Loukianov, E. N. Sanchez, C.-T. Bernardino // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59. – Iss. 2. – P. 1194–1207. doi: 10.1109/TIE.2011.2161246.
19. Castañeda, C. E. Direct current motor control based on high order neural networks using stochastic estimation / C. E. Castañeda, P. Esquivel // The 2010 Intern. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNNI) (18.07–23.07.2010). – Barcelona, Spain, 2010. – P. 1515–1520.
20. Hayek, El. J. Experiences with a traction drive laboratory model / El. J. Hayek, T. J. Sobczyk, G. Skarpetowski // Electromotion. – 2010. – Vol. 17. – Iss. 1. – P. 30–36.
21. Design and Simulation of Heavy Haul Locomotives and Trains / M. Spiriyagin, P. Wolfs, C. Cole [et al.]. – Boca Raton ; London ; New York : Taylor & Francis Group, 2017. – 465 p.
22. Electromechanical Coupled Vibration between Traction Motor and Bogie of High-Speed Train / Z. Zhang, X. Zhao, X. Li [et al.] // Proc. of the 6<sup>th</sup> Intern. Conf. on Mechatronics, Materials, Biotechnology and Environment ICMMBE-2016 (13.08–14.08.2016). – Yinchuan, China, 2016. – P. 153–158. doi: 10.2991/icmmbe-16.2016.30.

А. Ю. ДРУБЕЦЬКИЙ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 33 55 38, ел. пошта drubetskiy.ae@gmail.com, ORCID 0000-0001-5691-0925

## РОЗРАХУНОК МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ ВДОСКОНАЛЕНОЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ МАГНІТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Мета.** У дослідженні передбачається розробити методику розрахунку магнітних характеристик некомпенсованих тягових електродвигунів (ТЕД) для будь-якого ступеня ослаблення збудження на базі апроксимуючих виразів для вдосконаленої універсальної магнітної характеристики (УМХ). Необхідно також провести аналіз виразів для вдосконаленої УМХ із метою знаходження виразу, що найбільш повно задовольняє вимогам розробки методики визначення індуктивних параметрів ТЕД. **Методика.** Для побудови характеристик за вдосконаленою УМХ необхідно для кожного ступеня ослаблення збудження визначити коефіцієнт насичення. Це можливо здійснити тільки аналітично. Для спрощення аналітичного знаходження коефіцієнта насичення запропонований метод, заснований на рішенні системи з двох рівнянь, одним із яких є сама УМХ, а другим – рівняння прямої, кутовий коефіцієнт якої пропорційний коефіцієнту насичення. Значення коефіцієнта насичення, отримані в результаті розрахунків для різних ступенів збудження  $\beta < 1$ , по суті є коефіцієнтами форми магнітної характеристики. Щоб позбутися від необхідності кожного разу при розрахунку характеристик визначати коефіцієнти апроксимації, запропонована форма вдосконаленою УМХ, в якій роль аргументу виконує магніторухомий момент (МРС) обмотки збудження. **Результати.** Доведено, що за допомогою вдосконаленої УМХ можливий розрахунок характеристик некомпенсованих ТЕД для будь-яких ступенів ослаблення збудження. Точність розрахунку при  $\beta = 1$  не відрізняється від такої при розрахунку по УМХ, запропонованій проф. М. Д. Находкіним. Така ж точність зберігається при ступенях збудження, відмінних

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

від одиниці. **Наукова новизна.** Запропонована аналітична методика розрахунку магнітних (швидкісних) характеристик некомпенсованих ТЕД для будь-якого ступеня ослаблення збудження за допомогою вдосконаленої УМХ. Також запропонована аналітична методика визначення коефіцієнта насичення вдосконаленої УМХ для будь-якого ступеня ослаблення збудження. Завдяки введенню в якості аргументу МРС обмотки збудження відпадає необхідність у визначенні коефіцієнтів апроксимації для кожного конкретного ТЕД. **Практична значимість.** Розроблена методика дозволяє проводити розрахунки магнітних характеристик некомпенсованих ТЕД для будь-якого ступеня ослаблення збудження. На її базі можлива розробка методики визначення індуктивних параметрів ТЕД, використовуючи в якості вихідних даних коефіцієнт насичення машини.

**Ключові слова:** універсальна магнітна характеристика; апроксимація; тяговий електродвигун; магнітні характеристики

A. Y. DRUBETSKYI<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electric Rolling Stock of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 33 55 38, e-mail drubetskiy.ae@gmail.com, ORCID 0000-0001-5691-0925

## CALCULATION OF MAGNETIC CHARACTERISTICS OF TRACTION ELECTRIC ENGINE USING THE IMPROVED UNIVERSAL MAGNETIC CHARACTERISTICS

**Purpose.** The article is aimed to develop a technique for calculating the magnetic characteristics of uncompensated traction electric motors (TEM) at any degree of attenuation of excitation based on the approximating expression for improved universal magnetic characteristics (UMC). It is also necessary to conduct an analysis of expressions for improved UMC with the aim of finding an expression that most fully satisfies the requirements for developing a technique for determining the inductive parameters of TEM. **Methodology.** It is necessary to determine the saturation coefficient for each degree of attenuation of the excitation for building the characteristics with the improved UMC. This can only be done analytically. To simplify the analytical finding of the saturation coefficient, the method based on solving a system of two equations is proposed, one of which is UMC itself, and the second one is a straight line whose angular coefficient is proportional to the saturation coefficient. Resulting values of the saturation coefficient for the excitation degrees  $\beta < 1$  are essentially the coefficients of the shape of the magnetic characteristic. To get rid of the need to determine the coefficients of approximation each time in the calculation of characteristics a form of improved UMC is proposed, in which the magnetomotive force (MMF) of the excitation winding serves as the argument's role. **Findings.** Using the improved UMC it is possible to calculate the characteristics of uncompensated TEMs for any degree of attenuation of excitation. The accuracy of the calculation at  $\beta = 1$  does not differ from that in the calculation for UMC, proposed by Prof. M. D. Nakhodkin. The same accuracy is preserved at excitation degrees that are different from unity. **Originality.** An analytical technique for calculating the magnetic (speed) characteristics of uncompensated TEM for any degree of attenuation with the help of an improved UMC is proposed. The analytical technique for determining the saturation coefficient for an improved UMC at any degree of attenuation of excitation is also proposed. Due to the introduction of an excitation winding as an argument, there is no need to determine the approximation coefficients for each specific TEM. **Practical value.** The developed methodology let calculate magnetic characteristics of uncompensated REMs for any degree of attenuation of excitation. On the basis of this technique, it is possible to develop a technique for determining the inductive parameters of the TEM, using the saturation coefficient of the machine as initial data.

**Keywords:** universal magnetic characteristic; approximation; traction motor; magnetic characteristics

## REFERENCES

1. Afanasov, A. M. (2012). Approximation of the magnetic characteristics of the traction motors of electric rolling stock. *Electromagnetic Compatibility and Safety on the Railway Transport*, 4, 25-29.
2. Belkina, Y. N., & Zhukov, S. A. (2015). Analiz sposobov approksimatsii krivoy namagnichivaniya elektrotekhnicheskoy stali. *Innovatsionnaya nauka*, 5 (2), 22-27.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

3. Belman, M. K. (1975). *Perekhodnyye protsessy v mikrodivigatelyakh postoyannogo toka pri impulsnom pitanii*. Leningrad: Energiya.
4. Voldek, A. I. (1978). *Elektricheskiye mashiny* (3rd ed.). Leningrad: Energiya.
5. Hetman, H. K., & Marikutsa, S. L. (2011). The analysis of analytical functions for approximative do-all magnetic characteristic of direct – current and undulated – current traction motors. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 37, 63-71.
6. Hetman, H. K., & Golik, S. M. (2007). About the use of universal magnetic characteristics to calculate the electromechanical characteristics of traction motors. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 16, 21-25.
7. Drubetskyi, A. Y. (2017). Approximation of universal magnetic characteristic for modelling electric traction machines. *Science and Transport Progress*, 1 (67), 106-116. doi: 10.15802/stp2017/94031
8. Ivanov-Smolenskiy, A. V. (1980). *Elektricheskiye mashiny*. Moscow: Energiya.
9. Kalantarov, P. L., & Tseytlin, L. A. (1986). *Raschet induktivnostey: spravochnaya kniga* (3rd ed.). Leningrad: Energoatomizdat.
10. Kostenko, M. P., & Piotrovskiy, L. M. (1972). *Mashiny postoyannogo toka. Transformatory: Elektricheskiye mashiny* (3rd ed.). Leningrad: Energiya.
11. Kostin, M. O., & Sheikina, O. H. (2006). *Teoretychni osnovy elektrotekhniki* (Vol. 1-3). Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Press.
12. Matyuk, V. F., & Osipov, A. A. (2011). The mathematical models of the magnetization curve and the magnetic hysteresis loops, Part 1: Analysis of models. *Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika*, 2, 3-35.
13. Shavelkin, A., Gerasimenko, V., Kostenko, I., & Movchan, A. (2016). Modeling of traction electric drive with DC series motors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1-2(79), 42-48. doi: 10.15587/1729-4061.2016.60322
14. Nakhodkin, M. D., & Khvostov, V. S. (1958). Universalnaya magnitnaya kharakteristika. *Vestnik elektromyshlennosti*, 1, 44-48.
15. All-Soviet Union Research Institute of Railway Transport. (1985). *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty*. Moscow: Transport.
16. Nakhodkin, M. D., Vasilenko, G. V., Bocharov, V. I., & Kozorezov, M. A. (1976). *Proyektirovaniye tyagovykh elektricheskikh mashin*. Moscow: Transport.
17. Tishchenko, A. I. (Ed.). (1976). *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu teplovozem i dizel-poyezdam*. Moscow: Transport.
18. Castaneda, C. E., Loukianov, A. G., Sanchez, E. N., & Castillo-Toledo, B. (2012). Discrete-Time Neural Sliding-Mode Block Control for a DC Motor With Controlled Flux. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (2), 1194-1207. doi: 10.1109/TIE.2011.2161246
19. Castañeda, C. E., & Esquivel, P. (2010). Direct current motor control based on high order neural networks using stochastic estimation. *Proceedings of the 2010 International Joint Conference on Neural Networks IJCNN, July 18-23, 2010, Barcelona, Spain*. 1515-1520. doi: 10.1109/IJCNN.2010.5596331
20. Hayek, El. J., Sobczyk, T. J., & Skarpetowski, G. (2010). Experiences with a traction drive laboratory model. *Electromotion*, 17 (1), 30-36.
21. Spiriyagin, M., Wolfs P., Cole, C., Sun, Y. Q., McClanachan, M., Spiriyagin, V., & McSweeney, T. (2017). *Design and Simulation of Heavy Haul Locomotives and Trains*. New York: Taylor & Francis Group.
22. Zhang, Z., Zhao, X., Li, X., Lin, F., & Yang, Z. (2016). Electromechanical Coupled Vibration between Traction Motor and Bogie of High-Speed Train. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Mechatronics, Materials, Biotechnology and Environment ICMME-2016, August 13-14, 2016, Yinchuan, China*. 153-158. doi: 10.2991/icmme-16.2016.30

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Украина); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцом (Украина)

Поступила в редколлегию: 10.03.2017

Принята к печати: 18.05.2017

## УДК 629.43.016.2(1–21)

К. О. СОРОКА<sup>1\*</sup>, Т. П. ПАВЛЕНКО<sup>2</sup>, Д. О. ЛИЧОВ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. + 38 (097) 499 24 95, ел. пошта kasoroka@ukr.net, ORCID 0000-0001-9091-6861

<sup>2</sup>Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. + 38 (097) 573 44 25, ел. пошта travlenkoskp@gmail.com, ORCID 0000-0002-2356-4066

<sup>3</sup>Каф. «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, тел. + 38 (050) 996 27 86, ел. пошта dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИБОРУ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ РУХУ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

**Мета.** Дослідження передбачає розробку системи автоматизованого вибору оптимальних режимів руху та автоматичного контролю витрат електроенергії засобами електротранспорту з метою забезпечення мінімально можливих витрат енергії. **Методика.** У якості методики застосовуються: 1) математичне моделювання режимів руху засобів наземного електричного транспорту; 2) порівняння результатів моделювання з даними статистичних спостережень; 3) а також розробка системи автоматизованого вибору режимів руху електротранспорту з мінімально можливими затратами електроенергії в умовах виконання графіка та дотримання обмежень, регламентованих правилами руху. **Результати.** Авторами одержана математична залежність витрат електроенергії підприємствами електротранспорту від режимів руху та середньомісячної температури навколишнього середовища. Розроблено проект системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху та автоматизованого контролю витрат електроенергії транспортними засобами у вигляді локальної комп'ютерної мережі, працюючої сумісно з діючою системою супутникової навігації. **Наукова новизна.** Розроблена математична модель розрахунку кривих руху та витрат електроенергії транспортним засобом, яка враховує характеристики тягового двигуна та системи керування, зміну маси при посадці та висадці пасажирів, уклони та радіуси кривих шляху руху, обмеження, що накладаються дорожніми знаками, та інші чинники. Встановлена залежність витрат електроенергії підприємствами електротранспорту від середньомісячної температури навколишнього середовища. **Практична значимість.** Створена математична модель спрощує розрахунки динаміки руху та витрат електроенергії транспортними засобами при їх експлуатації. Вона може знайти використання під час розробки технологічних карт маршрутів, проектуванні та модернізації тягових мереж, розробці засобів енергозбереження. Автоматизована система вибору швидкісного режиму руху полегшує роботу водія транспортного засобу, дозволяє зменшити затрати електроенергії, а також забезпечує автоматизований облік витрат електроенергії. Встановлена залежність витрат електроенергії від температури навколишнього середовища може бути використана для вдосконалення методів нормування роботи підприємств електротранспорту. В результаті виконаних досліджень доведена можливість зменшення витрат електроенергії на 10–45 % при дотриманні раціональних режимів руху. Одержано авторське свідоцтво на винахід системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів міського електричного транспорту.

**Ключові слова:** міський електричний транспорт; енергозбереження; питомі витрати електроенергії; нормування; моделювання руху; режими руху; CAN мережа

### Вступ

В умовах України, коли вартість електроенергії суттєво збільшується, енергозбереження стає однією з основних проблем, яка визначає конкурентну здатність підприємств, їх подальше функціонування. Це відноситься і до міського електричного транспорту. Розрахунки по-

казують, що в 2015 році підприємства електротранспорту за використану електроенергію отримували 12–15 % прибутку, а в 2017 році їм доведеться витратити на оплату електроенергії 75 % прибутку (з урахуванням існуючих розцінок оплати за проїзди, державних субвенцій та дотацій з місцевих бюджетів). Основна частина витрат електроенергії припадає на електричну

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

тягу. Суттєве зменшення цих витрат можливе при виборі раціональних режимів руху транспортних засобів. Залежно від умов конкретного маршруту економія може складати від 10 % до 45 %.

Однак, цією проблемою практично не займаються. У трамваях і тролейбусах відсутні лічильники витрат електроенергії, що не спонукає водіїв обирати економні режими руху, тому водій не знає, в якому режимі йому виконувати рух, щоб витрати енергії були мінімальні. Облік електроенергії ведеться тільки за показниками лічильників на входах депо та на тягових підстанціях, тому для підприємства в цілому виконати аналіз напрямків витрат електроенергії в повній мірі неможливо.

### Методика

Вихідні дані одержані в результаті аналізу офіційних статистичних даних роботи підприємств електротранспорту України [5, 6] і додаткових даних про витрати електроенергії двома трамвайними і двома тролейбусними депо за 2013–2015 роки. Розрахунки витрат електроенергії проведені відповідно до рекомендацій документів [1, 10, 13] у середніх величинах витрат електроенергії на 1 км пробігу транспортного засобу (кВт·год/км) [6] та у величині питомих витрат електроенергії на одиницю транспортної роботи (Вт год/т км брутто) [1]. Оскільки наявні дані не дозволяють виконувати аналіз залежності витрат від режиму руху, то використовували математичне моделювання режимів руху транспортних засобів на вулицях міст. Результати виконаного аналізу використали при розробці проекту автоматизованої системи вибору швидкісного режиму руху засобів міського електротранспорту. Розробка здійснена на основі отриманого патенту на винахід [15], з урахуванням існуючої і впровадженої в ряді міст України системи диспетчерського керування рухом транспортних засобів з використанням GPS трекерів та системи зв'язку в режимі GSM/GPRS. Також виконано аналіз інформаційного забезпечення водія та розроблена система автоматизованого вибору ним економних режимів руху, в умовах виконання графіка та дотримання обмежень, які регламентовані правилами руху.

### Результати

#### 1. Аналіз витрат електроенергії транспортними підприємствами згідно до статистичних даних

В електротранспорті основна доля витрат електроенергії припадає на рух транспортних засобів. Проте, однозначної відповіді на те, скільки електроенергії витрачається на рух, немає. В трамваях та тролейбусах відсутні засоби вимірювання витрат електроенергії. Дотаційний характер міського електротранспорту не спонукає керівництво підприємств до деталізації напрямків витрат і енергозбереження, адже розрахунки за електроенергію здійснюється не із коштів підприємств.

На сайті «Київський трамвайний форум» [5] є орієнтовні дані витрат електроенергії для тролейбуса – 3,3 кВт·год, а для трамвая – 3,2 кВт·год на кілометр шляху. Більш точні дані містяться в «Методических указаниях по планированию, учету расхода электрической энергии трамвайным и троллейбусным транспортом и рекомендации по экономии электроэнергии» [6]. Так, наприклад, для тролейбуса ЗиУ 682, питомі витрати складають 150 Вт·год/т·км брутто, тобто при масі тари тролейбуса рівній 10,05 т і розміщенні в його салоні 91 пасажир витрати електроенергії на 1 км шляху складають 2,46 кВт·год/км. Крім цього, згідно до методики розрахунку, потрібно врахувати витрати на власні потреби у транспортному засобі разом з витратами на нагрівання салону, які залежать від середньорічної температури, та витрати, зумовлені товщиною снігового покриву та нахилом ділянок шляху. До витрат належать також витрати електроенергії на самих підприємствах електротранспорту, а саме: у депо, тягових підстанціях, на тяговій мережі [5].

Як вихідні дані для розрахунку використовувалися результати обліку роботи електротранспорту [6] та додаткові дані офіційного звіту щодо щомісячних сумарних витрат електроенергії чотирьох підприємств електротранспорту одного міста за 2013–2015 роки, а саме: двох трамвайних і двох тролейбусних депо. Як оцінку ефективності роботи підприємств розраховували питомі витрати електроенергії. Причому, використано два показники, а саме: середні витрати електроенергії на 1 км пробігу транспортного засобу (кВт·год/км) та питомі витрати.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Початковий аналіз виконано за показниками середніх витрат електроенергії на 1 км пробігу, оскільки в джерелі [6] об'єм роботи транспортних підприємств України подається як сумар-

ний пробіг. Результати обробки статистичних даних витрат електроенергії на 1 км пробігу представлені на рис. 1.

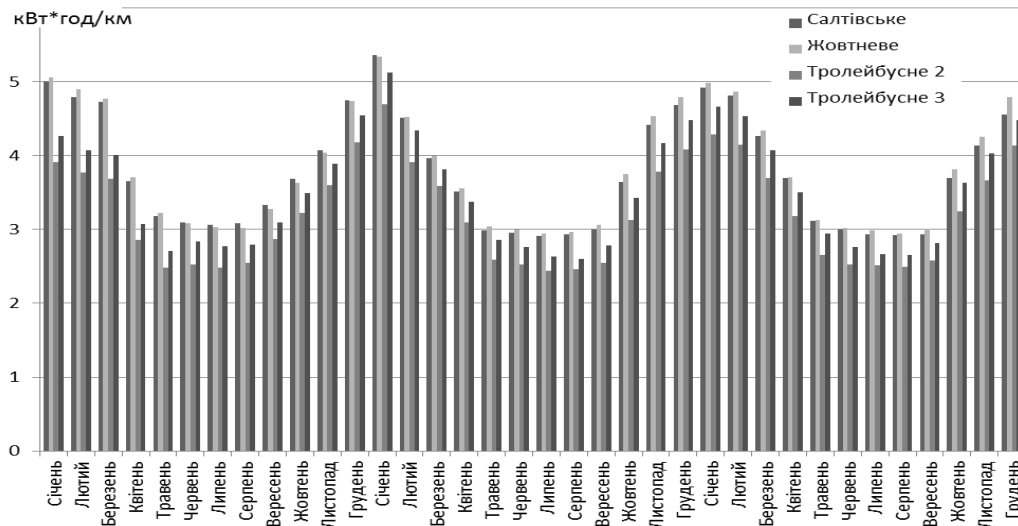


Рис. 1. Середньомісячні витрати електроенергії на 1 км пробігу транспортного засобу

Fig. 1. Average monthly power consumption for 1 km of vehicle run

Аналіз показує збільшення середніх витрат електроенергії в зимові місяці, коли вмикається обігрів салону. Для встановлення залежності величини витрат електроенергії, обумовленої змінами температури, використали дані метеорологічних спостережень, а саме значення середньомісячної температури навколишнього середовища по місту [12, 14]. Графік залежності витрат електроенергії від температури представлено на рис. 2. Розрахунок коефіцієнтів регресійної моделі показав, що між величиною витрат енергії і температурою існує залежність, яка описується таким рівнянням регресії:

$$W(t) = 0,0019t^2 - 0,111t + 4,295, \quad (1)$$

де  $t$  – середньомісячна температура повітря.

Коефіцієнт детермінації регресійної моделі  $R^2$ , який дорівнює  $R^2 = 0,982$ , вказує на її адекватність. Він означає, що 98,2 % варіації витрат електроенергії пояснюються зміною температури, і лише 1,8 % викликано іншими, неврахованими чинниками. Така залежність отримана вперше. Надійність результатів розрахунку підтверджується об'ємом вибірки, а саме: обліком щоденної роботи 400 транспортних

засобів на протязі 3-х років експлуатації, та величиною коефіцієнта детермінації.

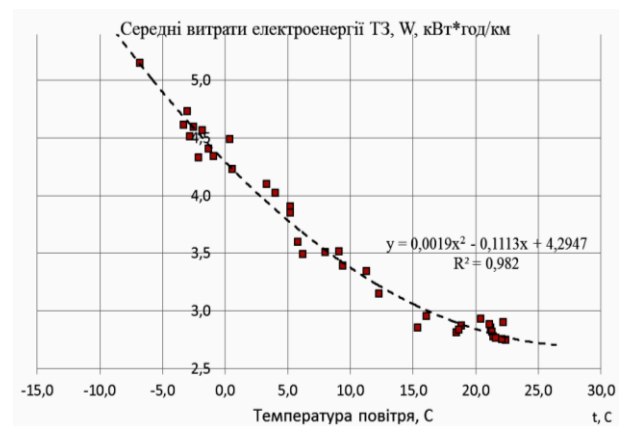


Рис. 2. Графік залежності питомих витрат електроенергії від температури навколишнього середовища

Fig. 2. A dependency graph of the unit cost of electricity on the ambient temperature

Для зменшення втрат електроенергії на підігрів салону необхідно покращити його теплоізоляцію та забезпечити якісну вентиляцію. Проведені дослідження і прийняті заходи, як показано в роботі [18], дозволили отримати се-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

редньорічну економію витрат енергії на опалення та вентиляцію трамваю до 64 %.

Залежність витрат електроенергії від температури використовується під час розрахунків нормативів витрат електроенергії підприємствами електричного транспорту. Згідно до методики розрахунків використовується коефіцієнт впливу температури  $\kappa_t = 0,005$  при лінійній залежності [10]. Одержана залежність (1) є квадратичною, і зміна температури більш суттєво впливає на витрати електроенергії. Цю залежність слід використовувати під час виконання розрахунків норм витрат електроенергії.

Для розрахунку розподілу питомих витрат електроенергії, що припадають на одиницю транспортної роботи (у Вт·год/т·км брутто) визначили середнє річне значення питомих витрат, яке дорівнює 179,78 Вт·год/т·км.

Витрати електроенергії (див. рис. 3) найменші в період від травня по вересень місяць. У цей час нагрів салону відімкнутий, тобто електроенергія використовується тільки на рух транспортного засобу. Середні значення питомих витрат за цей період складають 144,96 Вт·год/т·км. Виходячи з припущення, що витрати на рух протягом року практично не змінюються, визначено, що на нагрів салону витрачається 19,37 % всієї спожитої електроенергії.

Додаткові результати обліку витрат електроенергії на власні потреби, які виконані тільки за 2015 рік, показали, що депо та інші підрозділи електротранспорту на власні потреби витрачають 4,6 % від всієї електроенергії.

Крім цих величин необхідно врахувати витрати в тяговій мережі. За наявними даними це зробити неможливо, оскільки розрахунок проводиться за загальними показниками для всього підприємства. Тому для оцінки цих витрат скористалися нормами стандарту [3], згідно до якого номінальна напруга на струмоприймачі трамваю (тролейбуса) дорівнює 550 В, при величині напруги на шинах тягової підстанції 600 В. Отже, спад напруги в тяговій мережі становить 8,33 %. Спад напруги в процентному відношенні співпадає з величиною втрат електроенергії. У результаті аналізу одержано розподіл витрат електроенергії за напрямками, який приведено на діаграмі рис. 4.

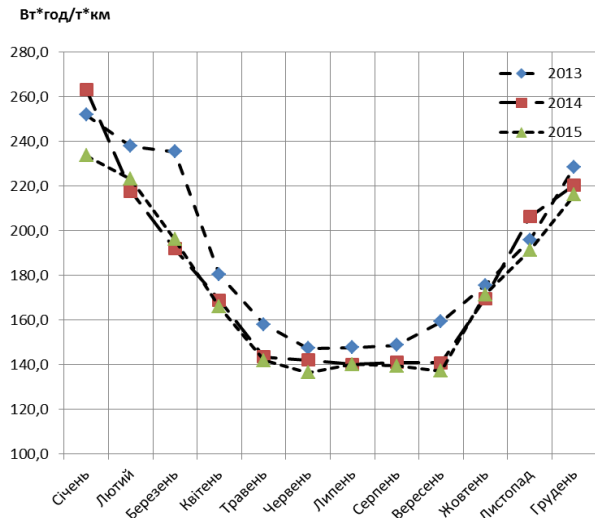


Рис. 3. Зміна питомих витрат електроенергії на рух транспортних засобів за 2013–2015 у Вт·год/т км

Fig. 3. Change of the specific power consumption for vehicular traffic for 2013–2015 in W·h/t km



*a – a*

Питоми витрати електроенергії, Вт·год./т·км



*b – b*

Рис. 4. Розподіл витрати електроенергії підприємствами електротранспорту:

*a* – розподіл витрат в процентах, *b* – витрати у Вт год/т км

Fig. 4. Distribution of electric power consumption of electric transport enterprises:

*a* – cost distribution percentage, *b* – costs in W h/t km

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Як видно з діаграми рис. 4, основна доля витрат – 68,14 % припадає на роботу електроприводу (див. рис. 4, а). Питомі витрати електроенергії на рух транспортних засобів (див. рис. 4, б) складають 122,50 Вт/т·км. Сумарні значення витрат електроенергії на вводах транспортного засобу складають 157,33 Вт·год/т·км.

Для порівняння в табл. 1 вказані величини питомих витрат електроенергії на електричну тягу різними типами рухомого складу. Ці величини прийняті як основна нормативна характеристика, що використовується під час розробки індивідуальних норм витрат електроенергії [10] з врахуванням експлуатаційної швидкості трамваю  $V_e = 15$  км/год і тролейбуса  $V_e = 16$  км/год.

Таблиця 1

**Індивідуальні норми питомих витрат електроенергії засобами електротранспорту**

Table 1

**Individual rules of specific electric power consumption by electric vehicles**

| Питомі витрати електроенергії на одиницю транспортної роботи, Вт·год/т км бруто |         |                       |         |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------|---------|
| Трамвайний вагон                                                                |         | Тролейбус             |         |
| Тип                                                                             | Витрати | Тип                   | Витрати |
| 71-605                                                                          | 86      | ЗіУ-682               | 150     |
| ЛМ-68                                                                           | 86      | ЗіУ-682<br>дв.150 кВт | 168     |
| РВЗ-6М                                                                          | 97      |                       |         |
| Т-3                                                                             | 108     | ЗіУ-683               | 142     |
| Т-4СУ                                                                           | 112     | 14-ТР                 | 140     |
| Т-3М                                                                            | 88      |                       |         |
| 71-608К                                                                         | 100     |                       |         |

Одержані дані знаходяться в межах приведених значень. Вони відображають тільки середні витрати електроенергії, незалежно від виду транспортного засобу (трамвай чи тролейбус) та його типу. Існуюча система обліку, при відсутності лічильників електроенергії на транспортних засобах, не дозволяє розподілити витрати за типом транспортного засобу. Більше того, вона не дозволяє також розділити і витрати різних підприємств, які здійснюють перевезення пасажирів в одному місті. У такій ситуа-

ції практично неможливо розробляти ефективні міри, що спрямовані на енергозбереження.

**2. Результати досліджень витрат електроенергії від режимів руху**

Оскільки основна доля електроенергії витрачається на рух транспортних засобів, то в роботі досліджували залежність витрат від режиму руху. Дослідження впливу індивідуального стилю водіння на споживання енергії тяги на залізничних лініях виконано за допомогою математичної моделі [19]. Для виконання досліджень впливу режимів ведення засобів міського електричного транспорту на витрати електроенергії розроблена математична модель. Основою моделі є рівняння руху [11, 16, 17]. Математична модель дозволяє враховувати цілий ряд чинників, що впливають на рух транспортного засобу, а саме: робота двигуна і його тягові характеристики, втрати електроенергії в колах живлення та керування, втрати енергії на подолання сил опору, характер маршруту руху та ін. У математичній моделі інтегрування рівняння руху здійснюється за методом Рунге-Кутта 4 порядку [8]. Модель розроблена в програмному середовищі електронної таблиці Excel і представлена на рис. 5.

Згідно до математичної моделі задається маса транспортного засобу ( $m$ , кг) з урахуванням наповнення салону. Відповідно до кроку інтегрування  $h$  вводяться характеристики маршруту: шлях руху ( $S_m$ , м); величина ухилу ділянки шляху ( $\alpha$ ) та приведені коефіцієнти радіусів кривих ( $\alpha_R$ ). Відмічаються точки на шляху ( $S_m$ ), де діють обмеження швидкості, розміщені світлофори та дорожні знаки. У моделі формули розрахунку коефіцієнтів інтегрування  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  включають рівняння руху [8], в які входять значення або формули розрахунку сил опору, формули апроксимації механічних і електромеханічних характеристик двигуна, передаточне число трансмісії транспортного засобу. Характеристики тягового двигуна для кожного режиму регулювання при 100, 53 %-ному і т.д. ослабленні магнітного поля (див. рис. 5) введені в різні рядки електронної таблиці за порядком їх зміни. Величина струму  $I$ , А розраховується відповідно до електромеханічної характеристики двигуна.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

|      | $Sm, м$ | $m, кг$ | $\alpha + \alpha_d$ | $v, м/с$ | $k_1$  | $k_2$  | $k_3$  | $k_4$  | $v, км/год$ | $t, с$ | $I, А$ | $P, Вт \cdot год$ |
|------|---------|---------|---------------------|----------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------------|
| Пуск |         |         |                     | 1,20     |        |        |        |        | 4,32        | 1,0    | 270    |                   |
| Пуск | 5,0     | 18450   | 0                   | 1,20     | 0,8824 | 0,6452 | 0,6955 | 0,5586 | 4,32        | 1,8    | 270    | 34                |
| Пуск | 6,0     | 18450   | 0                   | 1,89     | 0,8824 | 0,6452 | 0,6955 | 0,5586 | 6,79        | 2,5    | 270    | 61                |
| Пуск | 7,0     | 18450   | 0                   | 2,57     | 0,5607 | 0,4885 | 0,4967 | 0,4441 | 9,27        | 2,9    | 270    | 80                |
| Пуск | 8,0     | 18450   | 0                   | 3,07     | 0,4105 | 0,3808 | 0,3829 | 0,3579 | 11,05       | 3,3    | 270    | 94                |
| Пуск | 9,0     | 18450   | 0                   | 3,45     | 0,3438 | 0,3264 | 0,3273 | 0,3115 | 12,43       | 3,6    | 270    | 107               |
| Пуск | 10,0    | 18450   | 0                   | 3,78     | 0,3054 | 0,2935 | 0,2940 | 0,2824 | 13,61       | 3,9    | 270    | 118               |
| Пуск | 11,0    | 18450   | 0                   | 4,07     | 0,2787 | 0,2699 | 0,2702 | 0,2612 | 14,66       | 4,1    | 270    | 129               |
| 100% | 12,0    | 18450   | 0                   | 4,34     | 0,6316 | 0,4783 | 0,4868 | 0,4604 | 15,64       | 4,4    | 359    | 140               |
| 100% | 13,0    | 18450   | 0                   | 4,85     | 0,4966 | 0,4004 | 0,4046 | 0,3872 | 17,45       | 4,6    | 356    | 152               |
| 100% | 14,0    | 18450   | 0                   | 5,26     | 0,3187 | 0,2789 | 0,2800 | 0,2723 | 18,95       | 4,8    | 323    | 162               |
| 100% | 15,0    | 18450   | 0                   | 5,55     | 0,2214 | 0,2027 | 0,2031 | 0,1993 | 19,97       | 5,0    | 288    | 171               |
| 100% | 16,0    | 18450   | 0                   | 5,75     | 0,1723 | 0,1616 | 0,1618 | 0,1595 | 20,71       | 5,1    | 259    | 178               |
| 100% | 17,0    | 18450   | 0                   | 5,92     | 0,1436 | 0,1367 | 0,1368 | 0,1352 | 21,30       | 5,3    | 235    | 185               |
| 53%  | 18,0    | 18450   | 0                   | 6,05     | 0,2598 | 0,2353 | 0,2377 | 0,2130 | 21,79       | 5,5    | 315    | 192               |
| 53%  | 19,0    | 18450   | 0                   | 6,29     | 0,2317 | 0,2126 | 0,2143 | 0,1936 | 22,64       | 5,6    | 334    | 200               |

Рис. 5. Математична модель розрахунку кривих руху транспортних засобів

Fig. 5. Mathematical model of calculation for traffic curves of vehicles

Моделювання руху транспортного засобу здійснюється шляхом покрокового інтегрування рівнянь руху. Для цього розрахункові формули електронної таблиці копіюють впродовж шляху. При змін режиму регулювання (для реліктових систем регулювання зміни позиції контролера), послідовно переходять до відповідного рядка електронної таблиці.

Основною проблемою реалізації математичної моделі було вдосконалення методів розрахунку кривих руху. Справа в тому, що існуючі методи тягових розрахунків [11, 17] дозволяють проводити розрахунки тільки по усереднених «питомих» величинах, що віднесені до «ваги» транспортного засобу і не дозволяють враховувати зміну характеру руху при зміні маси транспортного засобу. Крім цього існуючі рівняння руху розраховані на графоаналітичне інтегрування рівнянь і не дозволяють, використати комп'ютерне інтегрування [11].

Для встановлення залежності витрат електроенергії від режиму руху виконано моделювання руху тролейбуса ЗиУ-682 при наявності в його салоні 91 пасажир і русі на горизонтальній ділянці довжиною 600 м.

Результат моделювання в режимах руху «економному» і «швидкому» приведено на рис. 6.

В «економному» режимі руху (див. рис. 6, а) тролейбус розганяється до швидкості достат-

ньої для продовження руху в режимі вибігу, таким чином, щоб гальмування його здійснювалося при швидкості приблизно рівній 15 км/год. У режимі тяги тролейбус рухається на відстані 150 м і з часом досягає швидкості 50 км/год. Подальший його рух відбувається в режимі вибігу без споживання електричної енергії. При такому режимі руху тролейбус споживає струм з електричної мережі тільки на протязі часу розгону (див. рис. 6, в).

Аналогічно виконано моделювання руху на цій же ділянці шляху при режимі максимальної швидкості і прибутті тролейбуса на зупиночний пункт за мінімальний період часу (див. рис. 6, б).

При цьому споживання струму (див. рис. 6, г) здійснюється протягом всього часу руху, тобто до моменту, коли починається гальмування, а саме за 120 м до зупинки. При цьому, величина струму, переважну більшість часу, знаходиться в межах від 160 до 200 А.

Оскільки під час руху тролейбуса трапляються випадки, коли водій повинен зменшити швидкість для виконання безпечних умов руху, або при появі непередбачених перешкод на маршруті, було виконано моделювання таких ситуацій. На рис. 7, б приведений графік зміни швидкості руху в результаті вимушеного гальмування, а на рис. 7, д графік зміни величини струму.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

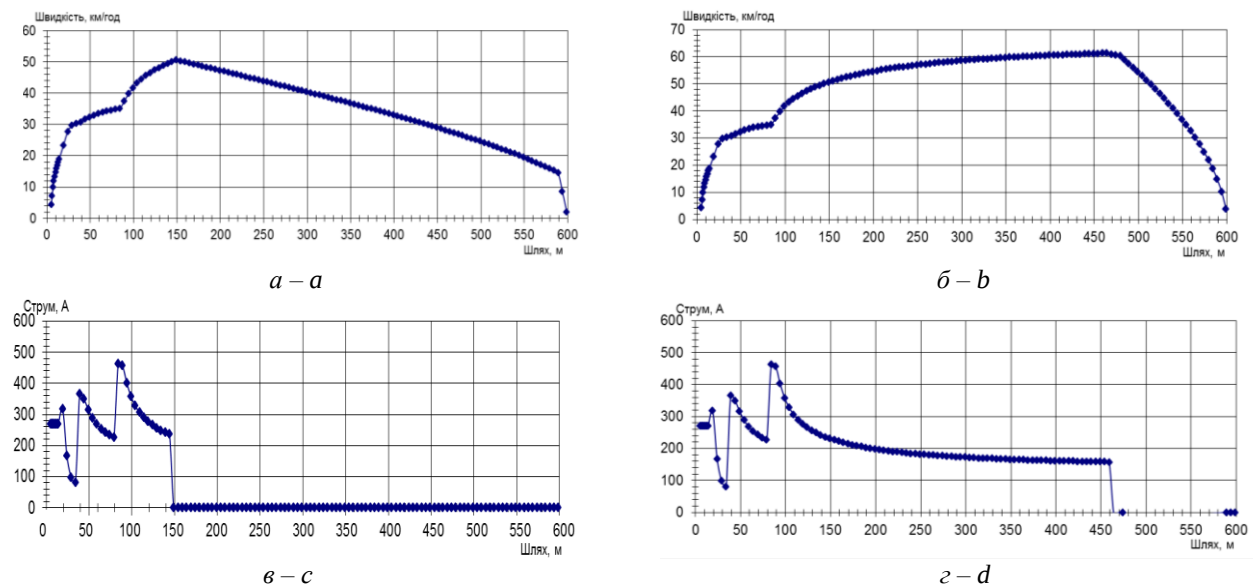


Рис. 6. Результати моделювання руху транспортного засобу:  
 $a$  та  $c$  – в режимі «економічний»;  $b$  та  $d$  – в режимі «швидкий»;  
 $a$  та  $b$  – зміна швидкості впродовж шляху руху;  $c$  та  $d$  – зміна величини струму

Fig. 6. Results of simulation of vehicle movement:  
 $a$  and  $c$  – in the «economical» mode;  $b$  and  $d$  – in the «fast» mode;  
 $a$  and  $b$  – speed change during travel;  $c$  and  $d$  – change in the current value

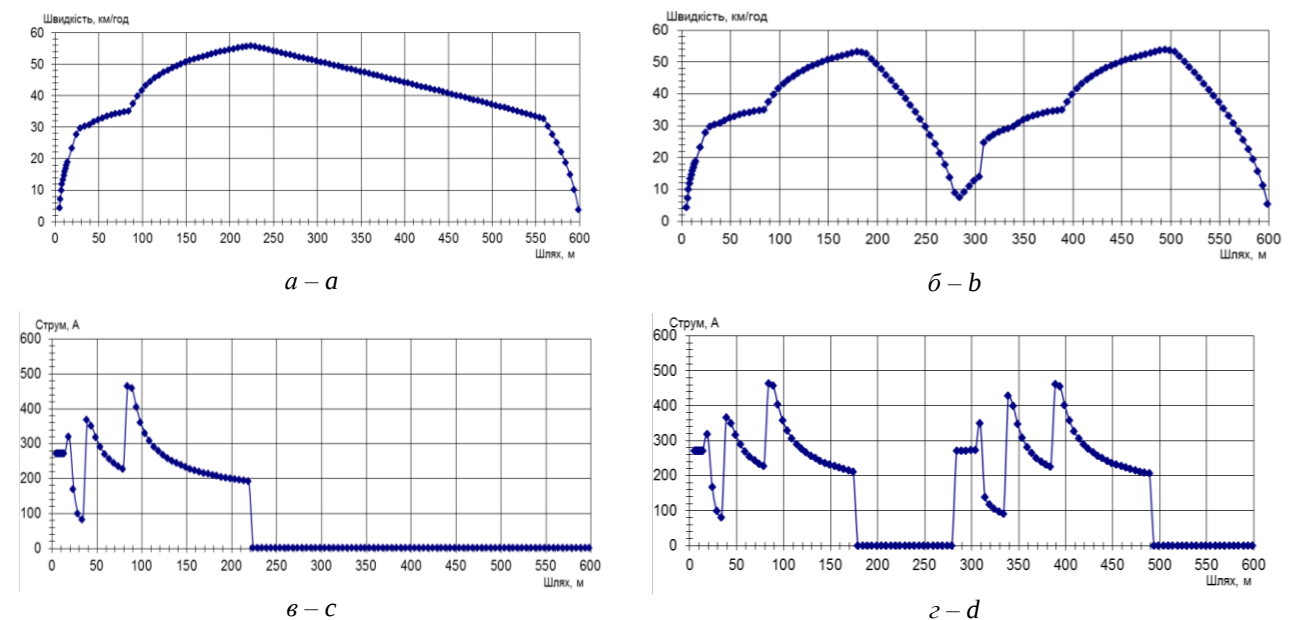


Рис. 7. Результати моделювання руху в різноманітних режимах:  
 $a$ ,  $c$  – проміжному;  $b$ ,  $d$  – з перешкодою;  
 $a$ ,  $b$  – зміна швидкості впродовж шляху руху;  $c$ ,  $d$  – зміна величини струму

Fig. 7. Results of movement simulation in different modes:  
 $a$ ,  $c$  – «intermediate»;  $b$ ,  $d$  – «obstacle»;  
 $a$ ,  $b$  – speed change during travel;  $c$ ,  $d$  – change in the current value

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Також розглянуто третій проміжний варіант, коли рух під струмом продовжується до 220 м, і гальмування розпочинається зі швидкості 30 км/год. Відповідні графіки руху та зміни струму приведені на рис. 7. Проміжний режим забезпечує скорочення часу руху між зупиночними пунктами при помірному споживанні електричної енергії.

Результати моделювання, а саме: час руху та витрати електроенергії транспортним засобом у розглянутих режимах руху приведені в табл. 2.

Приведені в табл. 2 дані показують, що експлуатаційна швидкість в усіх режимах руху перевищує встановлену графіком величину 16 км/год [10, 11], при максимально можливому часу стоянки на зупиночному пункті (від 10 до 45 с).

Таблиця 2

Результати аналізу режимів руху засобів електротранспорту  
(ділянка горизонтальна, довжина 600 м)

Table 2

Results of the analysis of electric vehicles motion modes  
(horizontal section, length 600 m)

| Показник                                   | Режим руху      |                 |                 |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                            | економний       | проміжний       | швидкий         | з перешкодою    |
| Затрати електроенергії, кВт·год            | 0,77<br>(100 %) | 0,96<br>(125 %) | 1,41 (191 %)    | 1,72<br>(223 %) |
| Час проїзду, с                             | 78<br>(142 %)   | 60<br>(111 %)   | 54<br>(100 %)   | 64<br>(118 %)   |
| Середня швидкість на ділянці, км/год       | 28,1            | 36              | 40              | 33,7            |
| Час стоянки на зупинці, с                  | 45              | 45              | 45              | 45              |
| Експлуатаційна швидкість, км/год           | 17,56           | 20,57           | 21,81           | 19,81           |
| Середні витрати електроенергії, кВт·год/км | 1,28<br>(100 %) | 1,60<br>(125 %) | 2,35<br>(183 %) | 2,87<br>224 %   |
| Питомі витрати електроенергії, Вт·год/т·км | 78,73           | 98,16           | 144,17          | 175,87          |

Питомі витрати електроенергії в розглянутих режимах руху суттєво відрізняються. Найменші витрати при економному режимі складають 78,73 Вт·год/т·км, що менше від приведених в табл. 1 значень для цього ж типу транспортного засобу. Витрати електроенергії при «швидкому» режимі руху в порівнянні до «економного» збільшені майже в 2 рази (на 191 %). Якщо за основу взяти режим руху «швидкий», то при виборі економного режиму руху питомі витрати електроенергії зменшуються на величину:

$$\Delta P = \frac{P_{ш} - P_{е}}{P_{ш}} 100 \% = 45 \%,$$

де  $P_{ш}$ ,  $P_{е}$  – питомі витрати в режимах «швидкий» та «економний» відповідно.

Ця величина є максимально можливою економією енергоресурсів. Але в реальній практиці діє ряд чинників, які впливають на транспортні засоби і досягнути такої економії неможливо. Тому, з урахуванням чинників, взята реальна величина економії, яка дорівнює 10 %. Для впровадження заходів енергозбереження на підприємствах електротранспорту слід розробляти технологічні карти маршрутів, в яких вказується режим руху на окремих ділянках [7]. Для розробки таких технологічних карт можна використовувати запропоновану математичну модель.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Але слід зауважити, що математична модель дещо спрощена. В ній замість 18 позицій регулювання, як в тролейбусі ЗиУ-682, розглядається тільки 6 позицій.

Математична модель розроблена для дискретної системи керування. У разі використання електронних систем регулювання неперервної дії, до моделі потрібно ввести параметри регулювання, при яких змінюються механічні та електромеханічні характеристики двигуна.

*3. Розробка системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів електротранспорту з метою зменшення витрат електроенергії*

Робота водія наземного міського електротранспорту на маршруті досить напружена і вимагає від нього надзвичайної уваги. Водій зобов'язаний виконувати графік руху при дотриманні усіх правил дорожнього руху в досить складній дорожній ситуації. Йому часто доводиться виконувати невласливі йому функції, такі, наприклад, як збір оплати за проїзд. Тому, в умовах складної дорожньої ситуації здійснити вибір режиму руху з мінімальними витратами електроенергії йому досить важко, адже практики вибору економних режимів руху він не має.

Для реалізації економних режимів руху потрібна система, яка б прораховувала варіанти можливого продовження руху і забезпечувала потрібною інформацією водія. Цей вибір потрібно здійснювати в умовах дотримання графіка руху, правил руху і всіх обмежень на ділянці шляху.

Системи автоматизованого ведення транспортних засобів широко впроваджуються в метрополітені, на залізниці. Проте, у міському електротранспорті розробка таких систем пов'язана з рядом труднощів, а саме:

- визначенням місця розміщення транспортного засобу на маршруті в кожен поточний момент руху;
- постійною зміною кількості пасажирів від зупинки до зупинки, що призводить до зміни маси транспортного засобу (майже в 2 рази) та характеру його руху;
- складністю маршруту руху (ділянки з різним ухилом, з поворотами, перехрестями, з розміщенням світлофорів уздовж маршруту, обмежувальні дорожні знаки);

– виникненням непередбачуваних подій, що впливають на рух транспортного засобу, які потрібно враховувати в складній дорожній обстановці.

З урахуванням цих особливостей руху наземного електротранспорту була розроблена «Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху міського електротранспорту з метою економії електроенергії». На розроблену систему одержано патент на винахід. Основою функціонування системи є бортовий комп'ютер транспортного засобу, який розраховує можливі режими руху, обирає оптимальний і підказує водію, якого режиму руху потрібно дотримуватись. Блок-схема автоматизованої системи приведена на рис. 8.

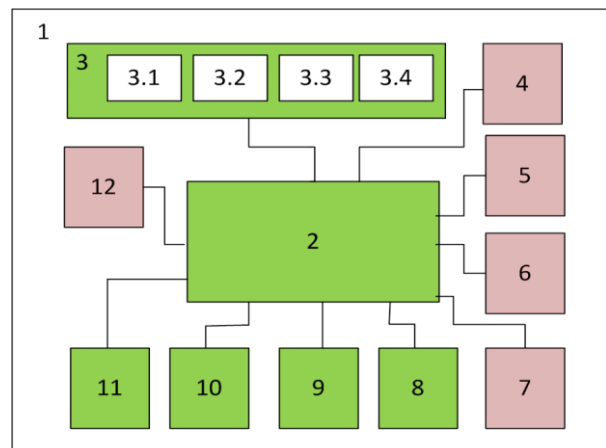


Рис. 8. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху наземного електричного транспортного засобу з метою економії електроенергії

Fig. 8. Computer-aided selection of speed mode of traffic of the ground electric vehicles in order to save the electricity

Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху (див. рис. 8, п. 1), містить встановлений на кожному транспортному засобі 1 бортовий комп'ютер 2, до якого підключено блок пам'яті 3. У блок пам'яті 3 занесено: 3.1 – графік руху; 3.2 – технологічна карта маршруту; 3.3 – цифрова карта міста (маршруту); 3.4 – програма розрахунку оптимального режиму руху. Система працює наступним чином: трекер 8 супутникової навігації (GPS, ГЛОНАСС) визначає координату та швидкість транспортного засобу. Блок вимірювання швидкості та шляху від зупинки 4 уточнює покази трекера. Ці дані поступають в комп'ютер 2,

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

який порівнює їх з графіком руху (технологічною картою маршруту). У разі виявлення відхилення комп'ютер прораховує режим руху до наступної зупинки, а в разі необхідності – і до кінця маршруту, і подає повідомлення про розрахований режим руху водію в звуковій або візуальній формі. Водій має можливість дотримуватися рекомендованого режиму руху або самостійно його обирати. Крім цього, система містить блок 5 вимірювальних приладів струму і напруги; а також блок 6 реєстрації кількості пасажирів; блок 7 – датчик закриття дверей; блок 9 – формування сигналів, які передаються на диспетчерський пункт; блок – 10 прийомо-передатчик GSM/GPRS; блок 11 – гарнітура водія; блок 12 – дисплей.

Запропонована автоматизована система встановлюється на борту транспортного засобу. Вона контролює режим руху відповідно до технологічної карти маршруту. У разі виявлення відхилення режиму руху від рекомендованого система дає повідомлення водію і автоматично

прораховує можливі варіанти продовження руху до наступної зупинки. З можливих варіантів вибирається режим, який відповідає графіку, при мінімально можливих затратах електричної енергії. Якщо до першої зупинки скорегувати відставання від графіка руху неможливо, система продовжує розрахунки до декількох наступних зупинок таким чином, щоб до кінцевої зупинки прибути точно у визначений графіком момент часу.

Система також забезпечує передачу на диспетчерський пункт даних про виконаний рух і витрати електричної енергії та інші дані, які потрібні для контролю роботи транспортного засобу на маршруті.

Для реалізації системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху запропоновано проект локальної CAN мережі транспортного засобу. CAN мережа може бути побудована за ієрархією як «загальна шина», що показано на рис. 9.

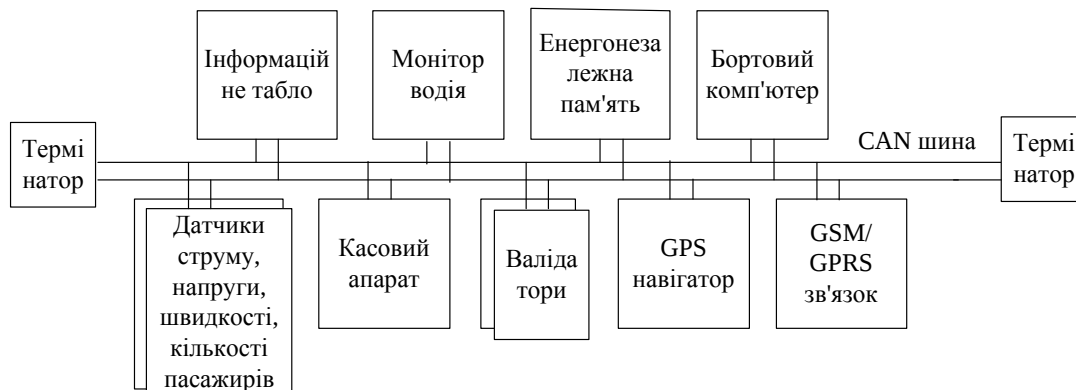


Рис. 9. Схема системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху, побудована на основі локальної мережі транспортного засобу

Fig. 9. Scheme of the automated selection system of speed mode of motion based on local network of electric vehicle

Система створюється самостійно, або як доповнення до існуючої мережі транспортного засобу. Такі комп'ютерні мережі встановлюють на транспортних засобах як автомобільну електроніку, і вони є основою системи діагностики, керування обладнанням транспортного засобу та диспетчерського керування рухом [4, 20]. Комп'ютер чи безпосередньо трекер GPS передає інформаційні пакети, як правило, з періодом 10 с (або при проїзді 50 м). У ці пакети

включають дані про параметри спожитої електроенергії. З метою зменшення обсягів інформації дані про використану електроенергію можна передавати через більші інтервали часу, наприклад на зупиночних пунктах, або по закінченню проїзду маршрутом. З метою забезпечення прийняття заходів енергозбереження, покази датчиків струму та напруги на вводах транспортного засобу можна записувати в енергонезалежну пам'ять бортового комп'ютера поряд

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

з інформацією про режим руху, яка використовується під час аналізу транспортних подій на маршруті руху. Запис може проводитися циклічно (при загальній довжині одного запису порядку 1 год). Для впровадження запропонованої системи потрібно виконати доробку програмного забезпечення комп'ютера транспортного засобу та диспетчерського центру. Одержана таким чином інформація про енергоспоживання повинна бути використана при фінансових розрахунках, коли в одному місці перевізниками є декілька підприємств електротранспорту. Крім цього, вона може бути використана під час розробки заходів енергозбереження.

**Наукова новизна та практична значимість**

Встановлено стохастичну залежність між величиною витрат енергії підприємствами електротранспорту і температурою навколишнього середовища, яка описується квадратичним рівнянням регресії (1), у протипагу прийнятої в нормативних документах [1, 10] лінійної залежності. Адекватність регресійної моделі підтверджена значним об'ємом вибірки та значенням коефіцієнта детермінації  $R^2 = 0,982$ . Рекомендується використовувати цю залежність при вдосконаленні методів нормування витрат електроенергії на міському електротранспорті.

Розроблена математична модель динаміки засобів електротранспорту, яка, на відміну від відомих методів тягових розрахунків, має більшу точність, дозволяє виконувати розрахунки з урахуванням характеристик тягового двигуна та системи керування, зміни маси при посадці та висадці пасажирів, уклонів та радіусів кривих колії руху, обмежень, що накладаються дорожніми знаками, та інших чинників.

На основі використання CAN мережі транспортного засобу розроблений проект системи автоматизованого вибору швидкісного режиму, який дозволяє обрати оптимальний за затратами електроенергії режим руху, з урахуванням місцезнаходження та швидкості транспортного засобу в кожен момент часу, при умові дотримання встановленого графіка руху.

Практична значимість створеної математичної моделі полягає у спрощенні і збільшенні

точності розрахунків режимів руху і витрат електроенергії транспортними засобами. Рекомендується її використання під час розробки технологічних карт маршрутів, проектуванні і модернізації тягових мереж та у розробці засобів енергозбереження.

Запропонована автоматизована система вибору швидкісного режиму руху полегшує роботу водія транспортного засобу, дозволяє зменшити затрати електроенергії, а також забезпечує автоматизований облік витрат електроенергії.

У результаті виконаних досліджень доведено можливість зменшення витрат електроенергії на 10 % – 45 % при дотриманні раціональних режимів руху.

Одержано авторське свідоцтво на винахід системи автоматизованого вибору швидкісного режиму руху засобів міського електричного транспорту.

**Висновки**

1. Отримано регресійну залежність витрат електроенергії підприємствами електротранспорту від середньомісячної температури навколишнього середовища, яка суттєво відрізняється від рекомендованої в нормативній документації.

2. Показано, що існуюча система обліку електроенергії на міському електротранспорті має суттєві недоліки і не дозволяє ефективно розробляти та впроваджувати заходи енергозбереження.

3. Розроблена математична модель динаміки засобів електротранспорту, яка враховує вплив ряду чинників та забезпечує більшу точність, ніж відомі методи тягових розрахунків.

4. Показано, що вибір оптимальних режимів може привести до зниження енергозатрат на 10–45 %.

5. Розроблена система автоматизованого вибору швидкісного режиму трамваю та тролейбуса дозволяє зменшити затрати електроенергії та автоматизувати облік витрат електроенергії засобами наземного електричного транспорту, що є основою перспективних розробок і прийняття додаткових практичних рішень, спрямованих на енергозбереження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галузеві комунальні норми ГКН 02.07.005–2001. Витрати електроенергії трамвайними вагонами та тролейбусами. Нормативи. Методи розрахунку / Г. П. Щербина, Л. В. Збарський, Е. І. Карпушин, В. Б. Будниченко, В. Х. Далека, В. В. Кривуля. – Чинний від 2001–01–01. – Київ : Держбуд України, 2001. – 23 с.
2. Гетьман, Г. К. Визначення витрат електроенергії на тягу поїздів при розв'язанні задач тягового забезпечення / Г. К. Гетьман, С. М. Голик // Проблемы и перспективы развития ж.-д. трансп. : тез. LXVI Междунар. науч.-практ. конф. (11.05–12.05.2006) / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2006. – С. 115.
3. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений (с изменением № 1). – Введ. 1996–03–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1996. – 3 с.
4. Карпенко, Е. Возможности CAN протокола [Електронний ресурс] / Е. Карпенко. – Промышленные сети. – 1998. – № 4. – С. 16–20. – Режим доступа: <http://www.cta.ru/cms/f/326789.pdf>. – Назва з екрана. – Перевірено : 16.05.2017.
5. Киевский трамвайный форум. Расход электроэнергии в трамваях [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://forums.mashke.org/cgi-bin/forum.cgi>. – Назва з екрана. – Перевірено : 16.05.2017.
6. Корпорація підприємств міського електротранспорту України «Укрелектротранс» [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://korpmet.org.ua>. – Назва з екрана. – Перевірено : 16.05.2017.
7. Кульбашна, Н. І. Нові підходи щодо складання раціональних режимів водіння рухомого складу по маршрутах / Н. І. Кульбашна, А. Г. Тарновецька, О. І. Балас // Проблеми та перспективи розвитку техн. засобів трансп. та систем автоматизації : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (1.10–3.10.2014) / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2014. – С. 84–85.
8. Кутнів, М. В. Чисельні методи : навч. посіб. / М. В. Кутнів. – Львів : Растр-7, 2010. – 288 с.
9. Логвінова, Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, М. О. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 110–113.
10. Методические указания по планированию, учету расхода электрической энергии трамвайным и троллейбусным транспортом и рекомендации по экономии электроэнергии : Р-29-284702-0365-96 / М-во трансп. Рос. Федерации, 1996. – 22 с.
11. Основи електричної тяги : навч. посіб. / В. Х. Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко [та ін.] ; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНАМГ, 2012. – 312 с.
12. Пат. 110877 Україна, МПК В 60 W 50/08; В 60 W 50/00. Система автоматизованого вибору швидкісного режиму руху наземного електричного транспортного засобу / Сорока Костянтин Олексійович, Личов Дмитро Олександрович ; заявник та патентовласник Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – u201603772 ; заявл. 25.10.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.
13. Погода и климат. Климатический монитор. Харьков [Електронний ресурс]. – Режим доступа: [www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34300](http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34300). – Назва з екрана. – Перевірено : 16.05.2017.
14. Правила експлуатації міського електричного транспорту : навч. посіб. / В. Х. Далека, В. Б. Будниченко, В. І. Коваленко [та ін.] ; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2014. – 447 с.
15. СНиП 23-01-99. Строительная климатология : утв. 11.06.99 г. № 45 с изм. № 1. – Москва : Госстрой России, 2002.
16. Сорока, К. О. Змістовна модель та рівняння руху електричного транспорту / К. О. Сорока, Д. О. Личов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 97–106. doi: 10.15802/stp2015/46056.
17. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров ; под ред. И. П. Исаева. – Москва : Транспорт, 1995. – 294 с.
18. Beusen, B. Energy savings in light rail through the optimization of heating and ventilation / B. Beusen, B. Degraeuwe, P. Debeuf // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2013. – Vol. 23. – P. 50–54. doi: 10.1016/j.trd.2013.03.005.
19. Individual driving style impact on traction energy consumption in railway lines: A simulation model / A. Capasso, R. Lamedica, F. M. Gatta [et al.] // Intern. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (22.06–24.06.2016) : Conf. Paper. – Anacapri, Italy, 2016. – P. 665–670. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525929.
20. Heinzelman, W. B. Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks : Ph.D Thesis / W. B. Heinzelmaan / Massachusetts Institute of Technology. – Boston, 2000. – 154 p.

К. А. СОРОКА<sup>1\*</sup>, Т. П. ПАВЛЕНКО<sup>2</sup>, Д. А. ЛЫЧОВ<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. + 38 (097) 499 24 95, эл. почта kasoroka@ukr.net, ORCID 0000-0001-9091-6861

<sup>2</sup>Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (097) 573 44 25, эл. почта khpavlenko@yandex.ru, ORCID 0000-0002-2356-4066

<sup>3</sup>Каф. «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (050) 996 27 86, эл. почта dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С ЦЕЛЮ УМЕНЬШЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Цель.** Исследование предполагает разработку системы автоматизированного выбора оптимальных режимов движения и автоматического контроля расхода электроэнергии средствами электротранспорта с целью обеспечения минимально возможных затрат энергии. **Методика.** В качестве методики используются: 1) математическое моделирование режимов движения средств наземного электрического транспорта; 2) сравнение результатов моделирования с данными статистических наблюдений; 3) разработка системы автоматизированного выбора режимов движения электротранспорта с минимально возможными затратами электроэнергии в условиях выполнения графика и соблюдения ограничений, регламентированных правилами движения. **Результаты.** Авторами получена математическая зависимость расхода электроэнергии предприятиями электротранспорта от режимов движения и среднемесячной температуры окружающей среды. Разработан проект системы автоматизированного выбора скоростного режима движения и автоматизированного контроля расхода электроэнергии транспортными средствами в виде локальной компьютерной сети, работающей совместно с действующей системой спутниковой навигации. **Научная новизна.** Разработана математическая модель расчета кривых движения и расхода электроэнергии транспортным средством, учитывающая характеристики тягового двигателя и системы управления, изменение массы при посадке и высадке пассажиров, уклоны и радиусы кривых пути движения, ограничения, накладываемые дорожными знаками, и другие факторы. Установлена зависимость расхода электроэнергии предприятиями электротранспорта от среднемесячной температуры окружающей среды. **Практическая значимость.** Созданная математическая модель упрощает расчеты динамики движения и расхода электроэнергии транспортными средствами при их эксплуатации. Она может найти применение при разработке технологических карт маршрутов, проектировании и модернизации тяговых сетей, разработке средств энергосбережения. Автоматизированная система выбора скоростного режима движения облегчает работу водителя транспортного средства, позволяет уменьшить затраты электроэнергии, а также обеспечивает автоматизированный учет расходов электроэнергии. Установленная зависимость расхода электроэнергии от температуры окружающей среды может быть использована для совершенствования методов нормирования работы предприятий электротранспорта. В результате выполненных исследований доказана возможность уменьшения затрат электроэнергии на 10–45 % при соблюдении рациональных режимов движения. Получено авторское свидетельство на изобретение системы автоматизированного выбора скоростного режима движения средств городского электрического транспорта.

**Ключевые слова:** городской электрический транспорт; энергосбережение; удельный расход электроэнергии; нормирование; моделирование движения; режимы движения, CAN сеть

K. O. SOROKA<sup>1\*</sup>, T. P. PAVLENKO<sup>2</sup>, D. A. LYCHOV<sup>3</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Electric Transport», Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. N. Beketov, Marshal Bazhanov, St. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 499 24 95, e-mail kasoroka@ukr.net, ORCID 0000-0001-9091-6861<sup>2</sup>Dep. «Electric Transport», Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. N. Beketov, Marshal Bazhanov, St. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (097) 573 44 25, e-mail khpavlenko@yandex.ru, ORCID 0000-0002-2356-4066<sup>3</sup>Dep. «Electric Transport», Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. N. Beketov, Marshal Bazhanov, St. 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (050) 996 27 86, e-mail dimalychov@gmail.com, ORCID 0000-0002-3231-5985

## SYSTEM FOR AUTOMATIC SELECTION OF THE SPEED RATE OF ELECTRIC VEHICLES FOR REDUCING THE POWER CONSUMPTION

**Purpose.** The work is aimed to design a system for automatic selection of the optimal traffic modes and automatic monitoring of the electric energy consumption by electric transport. This automatic system should provide for the minimum energy expenses. **Methodology.** Current methodologies: 1) mathematical modeling of traffic modes of ground electric vehicles; 2) comparison of modelling results with the statistical monitoring; 3) system development for automatic choice of traffic modes of electric transport with minimal electrical energy consumptions taking into account the given route schedules and the limitations imposed by the general traffic rules. **Findings.** The authors obtained a mathematical dependency of the energy consumption by electric transport enterprises on the monthly averaged environment temperature was obtained. A system which allows for an automatic selection of the speed limit and provides automatic monitoring of the electrical energy consumption by electric vehicles was proposed in the form of local network, which works together with existing GPS system. **Originality.** A mathematical model for calculating the motion curves and energy consumption of electric vehicles has been developed. This model takes into account the characteristic values of the motor engine and the steering system, the change of the mass when loading or unloading passengers, the slopes and radii of the roads, the limitations given by the general traffic rules, and other factors. The dependency of the energy consumption on the averaged monthly environment temperature for public electric transport companies has been calculated. **Practical value.** The developed mathematical model simplifies the calculations of the traffic dynamics and energy consumption. It can be used for calculating the routing maps, for design and upgrade of the power networks, for development of the electricity saving measures. The system simplifies the work of the vehicle driver and allows reducing the energy consumption, also provides for an automatic energy cost monitoring. The calculated dependency of the energy consumption on the environment temperature may be used for an improvement of methods which regulate the work of the public electric transport companies. It has been proved that there is a possibility for reducing electrical energy consumption by 10% to 45% using the efficient motion regimes. Author's certificate was obtained for the invention of the system for an automatic selection of the velocity regime for a public electric transport vehicle.

**Keywords:** public electric transport; energy saving; specific energy consumption; standardization; motion modeling; traffic modeling; traffic regimes; CAN network

## REFERENCES

1. Vytraty elektroenerhii tramvainymy vahonamy ta troleibusamy. Normatyvy. Metod rozrakhunku, HKN-02.07.005-2001 (2001).
2. Hetman, H. K., & Golik, S. M. (2006). Vyznachennia vytrat elektroenerhii na tiahу poizdiv pry rozv'iazanni zadach tiahovoho zabezpechennia. *Proceedings of the 66 International Conference «The Issues and Prospects of Railway Transport Development», May, 11-12, 2006, Dnipropetrovsk*. 115. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
3. Transport elektrifitsirovannyi s pitaniem ot kontaktnoy seti. Ryad napryazheniy, GOST 6962-75 (1996).
4. Karpenko, Y. (1998). Features of the CAN-Protocol. *Contemporary Technologies in Automation*, 4, 16-20. Retrieved from <http://www.cta.ru/cms/f/326789.pdf>
5. Kievskiy tramvaynyy forum. Raskhod elektroenergii v tramvayakh. (n.d.) Retrieved from <http://forums.mashke.org/cgi-bin/forum.cgi>
6. Sait korporatsii «Ukrelektotrans». (n.d.) Retrieved from <http://korpmet.org.ua>
7. Kulbashna, N. I., Tarnovetska, A. H., & Balas, O. Y. (2014). Novi pidkhody shchodo skladannia ratsionalnykh rezhymiv vodinnia rukhomoho skladu po marshrutakh. *Proceedings of the International Conference Problem*

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- ta perspektyvy rozvytku tekhnichnykh zasobiv transportu ta system avtomatyzatsii, October, 01-03, 2014, Kharkiv. 84-85. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.*
8. Kutniv, M. V. (2010). *Chyselni metody*. Lviv: Rastr-7 Publ.
  9. Logvinova, N. A., Bosiy, D. O., & Polyah, O. M. (2012). Reduced operating costs by train traffic optimization. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 42, 110-113.
  10. Ministry of Transport of the Russian Federation. (1996). *Metodicheskiye ukazaniya po planirovaniyu, uchetu raskhoda elektricheskoy energii tramvaynym i trolleybusnym transportom i rekomendatsii po ekonomii elektroenergii*, R-29-284702-0365-96.
  11. Daleka, V. K., Pushkov, P. M., Andriichenko, V. P., & Minieieva, Y. V. (2012). *Osnovy elektrychnoi tiahly*. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.
  12. Soroka, K. O., & Lychov, D. A. (2016). *UA Patent No. 110877*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT).
  13. *Pogoda i klimat. Pogoda v Kharkove*. (n.d.) Retrieved from [www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34300](http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34300)
  14. Daleka, V. K., Budnychenko, V. B., Kovalenko, V. I., Khvorost, M. V., & Isaiev, L. O. (2014). *Pravyla ekspluatatsii miskoho elektrychnoho transportu*. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.
  15. Building Climatology, SNiP 23-01-99 (2002).
  16. Soroka, K. O., & Lychov, D. A. (2015). The content model and the equations of motion of electric vehicle. *Science and Transport Progress*, 3 (57), 97-106. doi: 10.15802/stp2015/46056
  17. Rozenfeld, V. Y., Isaev, I. P., Sidorov, N. N., & Ozerov, M. I. (1995). *Teoriya elektricheskoy tyagi*. Moscow: Transport.
  18. Beusen, B., Degraeuwe, B., & Debeuf, P. (2013). Energy savings in light rail through the optimization of heating and ventilation. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, 23, 50-54. doi: 10.1016/j.trd.2013.03.005
  19. Capasso, A., Lamedica, R., Gatta, F.M., Geri, A., Maccioni, M., Ruvio, A., Guidi Buffarini, G., & Carones, N. (2016). Individual driving style impact on traction energy consumption in railway lines: A simulation model. *Proceedings of the Intern. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), June, 22-24, 2016, Anacapri, Italy*. 665-670. doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525929
  20. Heinzelman, W. B. (2000). *Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks*. (PhD Thesis). Massachusetts Institute of Technology.

*Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Україна); д.т.н., проф. Я. В. Щербаком (Україна)*

Надійшла до редколегії: 20.01.2017

Прийнята до друку: 27.04.2017

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 621.436:631.37

А. Ф. ГОЛОВЧУК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автомобілі», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 764 26 47, ел. пошта [golovchuk.a@i.ua](mailto:golovchuk.a@i.ua), ORCID 0000-0003-0562-2629

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**Мета.** В науковій статті необхідно вирішити наступні задачі: 1) уточнення математичної моделі для визначення тягово-динамічних, паливно-економічних та екологічних показників мобільних енергетичних засобів; 2) розробку методики теоретичних досліджень системи автоматичного регулювання, статичних та динамічних характеристик автотракторного дизеля з газотурбінним наддувом та мобільного енергетичного засобу. **Методика.** У роботі досліджуються робочі процеси автотранспортних засобів та машинно-тракторних агрегатів шляхом математичного моделювання та розробки відповідних алгоритмів і програм для розрахунків цих процесів в умовах реальної експлуатації. Для теоретичних досліджень розроблена система рівнянь, яка описує нелінійну математичну модель системи автоматичного регулювання частоти обертання автотракторного дизеля. Окрім диференціальних рівнянь першого та другого порядку, в математичному моделюванні робочих процесів тягово-транспортних засобів використані рівняння, які описують експериментальні характеристики автоматичного регулятора, паливного насоса високого тиску, турбокомпресора і дизеля, а також механічні втрати двигуна та зовнішнє навантаження енергетичного засобу. **Результати.** Розроблена математична модель дає можливість визначити ефективність нових конструктивних, експлуатаційних та технологічних впроваджень, а також різних заходів щодо покращення паливно-економічних та екологічних показників автотранспортних засобів та машинно-тракторних агрегатів в експлуатаційних умовах. **Наукова новизна.** Вперше розроблена математична модель «Тракторист–машинно-тракторний агрегат–дорога (поле)», яка дозволяє проводити дослідження тракторних транспортних агрегатів за їздовим циклом із урахуванням процесу вирушення, розгону та сталого руху мобільного енергетичного засобу з переключенням передач. **Практична значимість.** В умовах затяжної економічної кризи, при відсутності необхідного обладнання, приладів та паливно-мастильних матеріалів, порівняльні дослідження мобільних енергетичних засобів можна провести завдяки розробленим математичним моделям із відповідними алгоритмами та програмами, які доведені до практичного використання. На ці комп'ютерні програми Український інститут інтелектуальної власності видав свідоцтва про реєстрацію авторського права за № 49285, № 49286 та № 49287 від 22 травня 2013 року.

**Ключові слова:** мобільні енергетичні засоби; математичні моделі; алгоритми та програми; статичні й тягово-динамічні характеристики; паливна економічність; токсичність; автотранспортні засоби; машинно-тракторні агрегати

#### Вступ

Проблеми економії паливно-мастильних матеріалів та захисту довкілля від забруднення токсичними продуктами згоряння пального автотракторних двигунів сьогодні дуже актуаль-

ні. При зниженні витрати пального тягово-транспортними засобами зменшуються викиди шкідливих речовин в атмосферу, що покращує екологічну ситуацію в державі. Підвищення економічності мобільних енергетичних засобів – важливе завдання по економії паливно-енергетичних ресурсів України. Одним з на-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

прямів зниження експлуатаційної витрати пального двигунами автотракторних засобів і машинно-тракторних агрегатів є оптимізація системи автоматичного регулювання швидкості в залежності від умов роботи мобільних енергетичних засобів.

Для проведення досліджень статичних, тягово-динамічних, паливно-економічних та екологічних показників мобільних енергетичних засобів нами запропонована нелінійна математична модель з розробленими алгоритмами та програмами.

### Мета і задачі

Метою роботи є вирішення актуальної проблеми паливної економічності і зниження димоутворення автотранспортних засобів (АТЗ) і машинно-тракторних агрегатів (МТА) шляхом правильного вибору способу регулювання швидкості дизеля і в залежності від умов роботи мобільно-енергетичного засобу (МЕЗ).

Для досягнення цієї мети необхідно було розробити математичні моделі, алгоритми і програми для розрахункових досліджень статичних, тягово-динамічних, техніко-економічних та екологічних показників МЕЗ в експлуатаційних умовах.

### Результати

Покращення паливної економічності автотракторних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) – важлива задача економії паливно-енергетичних ресурсів. Одним з напрямків зниження експлуатаційної витрати палива ДВЗ мобільних енергетичних машин вважається оптимізація системи автоматичного регулювання швидкості в залежності від умов роботи автотранспортних засобів чи машинно-тракторних агрегатів [4, 14, 16–18].

Правильний вибір способу регулювання швидкості дизеля в залежності від умов роботи автомобіля чи машинно-тракторного агрегату дозволить покращити їх тягово-динамічні, паливно-економічні та токсичні характеристики.

Для дослідження статичних, тягово-динамічних, техніко-економічних та екологічних показників мобільних енергетичних засобів (МЕЗ) нами розроблено три математичні моделі

та алгоритми і програми для розрахунків цих показників.

Перша математична модель системи автоматичного регулювання частоти (САРЧ) обертання дизеля з газотурбінним наддувом розроблена для побудови і аналізу швидкісних характеристик паливного насоса високого тиску (ПНВТ) і САРЧ дизеля [11], друга – для розрахунків динамічних характеристик САРЧ дизеля [12], третя модель «Водій (тракторист) – МЕЗ – дорога (поле)» дає змогу проводити дослідження системи автоматичного регулювання дизелів з урахуванням процесів рушання, розгону і руху мобільного енергетичного засобу з переключенням передач по їздовому циклу [3, 10, 13].

Для математичного моделювання процесів рушання, розгону та сталого руху мобільного енергетичного засобу, розроблена функціональна блок-схема, яка складається з трьох блоків: водій (тракторист); тягово-транспортний засіб; дорога (поле). У першому блоці – водій (тракторист) – визначається режим руху МЕЗ та керуюча дія оператора тягово-транспортного засобу. Другий блок – тяговий транспортний засіб – складається з п'яти ланок, які описуються відповідними рівняннями, а саме: універсальний регулятор частоти обертання колінчатого вала двигуна; паливний насос високого тиску; дизель; трансмісія, яка об'єднує в собі зчеплення, коробку передач (КП), головну і кінцеву передачі; ходову частину трактора та причіпної машини. У третьому блоці – дорога (поле) – визначається покриття дороги та його стан, фізико-механічні властивості ґрунту та опір руху тягово-транспортного засобу в залежності від навантаження і режиму руху.

Оператор тягово-транспортного засобу діє на педаль управління регулятором ПНВТ, на педаль управління зчепленням і на важіль перемикавання передач КП у залежності від поточного значення частоти обертання вала дизеля, вала зчеплення і поточного значення часу виконання робочого процесу.

У момент включення трактористом (водієм) вищої передачі ( $t = t_{\text{поч}} + \Delta t_{\text{пер}}$ ) частота обертання колінчатого вала дизеля більша частоти обертання веденого вала зчеплення, і при цьому зчеплення починає включатися плавно за залежністю:

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

$$\varphi = \frac{t - t_{\text{поч}} - \Delta t_{\text{пер}}}{\Delta t_{\text{зч}}}, \quad (1)$$

де  $\varphi$  – положення педалі управління зчепленням, яке характеризується безрозмірним параметром, що змінюється у межах від 0 до 1;  $t$  – поточне значення часу;  $t_{\text{поч}}$  – початкове значення часу;  $\Delta t_{\text{пер}}$  – час переключення передачі КП;  $\Delta t_{\text{зч}}$  – час робочого ходу педалі управління зчепленням, тобто час повного включення зчеплення.

Положення педалі зчеплення при двох крайніх положеннях визначається за умови  $\varphi = 0$ , що відповідає повністю розведеним дискам зчеплення, крутний момент при цьому не передається;  $\varphi = 1$  – відповідає повністю зведеним дискам зчеплення, при цьому момент тертя зчеплення максимальний.

Система рівнянь, яка описує нелінійну математичну модель САРЧ дизеля з турбонаддувом, має п'ять диференціальних рівнянь, з яких чотири – першого порядку і одне – другого порядку, а також алгебраїчні рівняння, які описують статичні характеристики дизеля і його агрегати. Частина алгебраїчних рівнянь являється аналітичними залежностями між параметрами, а частина – описує опитні характеристики регулятора, ПНВТ, турбокомпресора і двигуна, які апроксимовані методами найменших квадратів поліномами другої і третьої степені [1, 6, 8, 9, 15].

Математична модель для розрахунків динамічних характеристик дизеля з універсальним регулятором описується системою рівнянь. Рівняння руху дизеля як динамічної ланки приведено до виду Коші і можна записати:

$$\frac{dn_d}{dt} = \frac{30}{\pi I_d} \times \left[ M_i(q_u, p_k) - M_m(n_d) - M_{nv}(n_d, H_{nv}) \right], \quad (2)$$

де  $I_d$  – момент інерції двигуна;  $n_d$  – частота обертання колінчастого валу двигуна;  $M_i$  – індикаторний крутний момент;  $q_u$  – циклова подача пального;  $p_k$  – тиск надувного повітря;  $M_m$  – момент механічних затрат;  $M_{nv}$  – момент

зовнішнього навантаження;  $H_{nv}$  – координата задатчика навантаження.

Індикаторний крутний момент дизеля описується рівнянням:

$$M_i = \frac{H_n i}{\pi \tau} q_u \eta_i, \quad (3)$$

де  $H_n$  – нижча теплота згоряння пального;  $i$  – кількість циліндрів;  $\tau$  – тактність дизеля;  $\pi = 3,14$ ;  $\eta_i$  – індикаторний ККД дизеля.

Крутний момент двигуна визначається як

$$M_e = M_i - M_m. \quad (4)$$

Момент механічних затрат  $M_m$  визначається експериментально і описується рівнянням:

$$M_m = \alpha_{m1} + \alpha_{m2} \cdot n_d, \quad (5)$$

де  $\alpha_{m1}$ ,  $\alpha_{m2}$  – постійні коефіцієнти;  $n_d$  – частота обертання колінчастого валу дизеля.

Момент зовнішнього навантаження  $M_{nv}$  при стендовому дослідженні двигуна описується рівнянням:

$$M_{nv} = \alpha_{nv1} H_{nv} (n_d - \alpha_{nv2} H_{nv})^2, \quad (6)$$

а при русі мобільного енергетичного засобу:

$$M_{nv} = (\alpha_{nv1} + \alpha_{nv2} + n_d^2) H_{nv}, \quad (7)$$

де  $\alpha_{nv1}$ ,  $\alpha_{nv2}$  – постійні коефіцієнти;  $H_{nv}$  – координата задатчика навантаження.

Рівняння динамічної рівноваги ротора турбокомпресора описується в такому вигляді:

$$\frac{dn_{mk}}{dt} = \frac{30}{\pi I_{mk}} \times \left[ M_m(G_{zm}, L_{ma}, n_{mk}, K_E) - M_k(G_k, L_{ka}, n_{mk}, \eta_{ka}) \right], \quad (8)$$

де  $M_m$ ,  $M_k$  – крутні моменти турбіни і компресора відповідно;

$$M_m = \frac{30 G_{zm} L_{ma} \eta_m K_E}{\pi n_{mk}}; \quad (9)$$

$$M_k = \frac{30 G_k L_{ka}}{\pi n_{mk} \eta_{ka}}, \quad (10)$$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

де  $L_{ma}$  – адіабатична робота розширення одного кг відпрацьованих газів у турбіні, Дж/кг;  $L_{ka}$  – адіабатична робота стискування 1 кг повітря в компресорі, Дж/кг;  $\eta_m$  – ККД турбіни;  $K_E$  – поправочний коефіцієнт;  $n_{mk}$  – частота обертання вала турбокомпресора;  $I_{mk}$  – момент інерції турбокомпресора;  $G_{zm}$  – витрата відпрацьованих газів через турбіну;  $G_k$  – подача повітря компресором;  $\eta_{ka}$  – адіабатичний ККД компресора.

Рівняння динамічної рівноваги муфти чутливого елемента регулятора записується в такому вигляді:

$$m_p \frac{d^2 z}{dt^2} + \nu_p \frac{dz}{dt} + E_j(Z_{z.aj}, Z) = P_u(n_n, Z), \quad (11)$$

де  $m_p$ ,  $\nu_p$  – приведені до муфти регулятора маса і коефіцієнти тертя регулятора.

Підтримуюча сила регулятора  $P_u = P_u(n_n, Z)$  описується рівнянням:

$$P_u = (\alpha_{u1} + \alpha_{u2} \cdot Z) \cdot n_n^2, \quad (12)$$

де  $\alpha_{u1}$ ,  $\alpha_{u2}$  – постійні коефіцієнти апроксимації;  $n_n$  – частота обертання кулачного вала ПНВТ;  $Z$  – координата муфти регулятора.

Відновлююча сила  $E_j = E_j(Z_{z.aj}, Z)$  залежить від попередньої деформації пружини регулятора і координати муфти регулятора і розраховується в залежності від інтервалу швидкісної характеристики, у межах якого знаходиться муфта регулятора.

Рівняння циклової подачі ПНВТ описується рівнянням, яке апроксимоване за експериментальними залежностями:

$$q = b_1 + b_2 \cdot n_n + b_3 \cdot h_n + b_4 \cdot n_n^2 + b_5 \cdot h_n^2 + b_6 \cdot n_n \cdot h_n, \quad (13)$$

де  $b_1, \dots, b_6$  – постійні коефіцієнти апроксимації;  $h_n$  – осьова координата дозаторів ПНВТ.

Димність (оптична щільність) відпрацьованих газів визначається як

$$N = \frac{b_{k1} \alpha + b_{k2}}{\alpha + b_{k3}}, \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{G_e}{\ell_0 G_n}, \quad (15)$$

$$G_n = 60 n_d i_u U_H q_u, \quad (16)$$

де  $b_{k1}$ ,  $b_{k2}$ ,  $b_{k3}$  – коефіцієнти апроксимації;  $G_e$  – витрата повітря;  $\alpha$  – коефіцієнт лишку повітря;  $\ell_0$  – кількість повітря теоретично необхідного для повного згоряння 1 кг пального;  $G_n$  – погодинна витрата пального;  $i_u$  – число циліндрів дизеля;  $U_H$  – передавальне число.

Масовий викид сажі з відпрацьованими газами розраховується за формулою [5]:

$$G_c = a \cdot N^2 \cdot \left( 1 - \frac{b \cdot G_{\Pi}}{3600 \cdot G_e} \right) \frac{3600 \cdot G_e}{\rho_n}, \quad (17)$$

де  $a$ ,  $b$  – постійні коефіцієнти;  $\rho_n$  – щільність повітря.

Крутний момент двигуна  $M_e$ , який перетворюється в трансмісії і передається безпосередньо на осі ведучих коліс енергетичного засобу визначається як

$$M_k = M_e \cdot U_{mp.i_{k\pi}} \cdot \eta_{mp}, \quad (18)$$

де  $M_k$  – ведучий момент від двигуна;  $M_e$  – крутний момент двигуна;  $U_{mp.i_{k\pi}}$  – загальне передавальне число трансмісії на  $i_{k\pi}$ -й включеній передачі коробки передач;  $\eta_{mp}$  – механічний ККД трансмісії МЕЗ.

Визначення моменту зовнішнього навантаження і моменту інерції мобільного енергетичного засобу проводиться в такій послідовності.

Момент зовнішнього навантаження, який передається на колінчастий вал двигуна при русі тягово-транспортного засобу визначається за [5]:

$$M_{нав} = \frac{M_{on}}{U_{mp.i_{k\pi}} \cdot \eta_{mp}} = \frac{\sum P_{on} r_k}{U_{mp.i_{k\pi}} \cdot \eta_{mp}}, \quad (19)$$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

де  $\sum P_{on}$  – сумарна сила;  $M_{on}$  – момент опору АТЗ чи МТА;  $r_k$  – радіус колеса тягово-транспортного засобу.

Сумарна сила опору руху МТА чи АТЗ з причепом визначається за формулою:

$$\sum P_{on} = P_f \pm P_i \pm P_j + P_w + P_{kp}, \quad (20)$$

де  $P_f = P_{f1} \pm P_{f2}$  – сила опору перекошування автомобіля чи трактора з причіпною машиною;  $P_i$  – сила опору підйому;  $P_j$  – сила опору розгону (сила інерції);  $P_w$  – сила опору повітря;  $P_{kp}$  – сила тяги на гаці, яка паралельна поверхні шляху.

При буксировці автомобілем чи трактором причепа  $P_{kp} = P_{f2}$ . При математичному моделюванні рушання, розгону і сталого руху МТА приймалося, що при  $V \leq 10$   $P_w = 0$ , крім того, кожен причіп збільшує коефіцієнт опору повітря на 25 %.

При виконанні МТА польових робіт момент зовнішнього навантаження транспортного агрегату змінюється на момент навантаження від сили опору робочих органів ґрунтообробних машин і силу опору кочення трактора і причіпної машини:

$$M_{нав} = M_{мо} + M_f, \quad (21)$$

де  $M_{мо}$  – момент, який створюється силою опору робочих органів ґрунтообробної машини, який приведений до колінчастого валу двигуна;  $M_f$  – момент опору коченню трактора і причіпної машини, який приведений до колінчастого валу двигуна.

При цьому рівняння (19) через момент зовнішнього навантаження можна виразити:

$$M_{нав} = \frac{M_{он}}{U_{тр.ікл.} \eta_{тр}} = \frac{(P_{kp} + P_f) r_k}{U_{тр.ікл.} \eta_{тр}}, \quad (22)$$

де  $P_{kp}$  – сила опору ґрунтообробної машини (сила тяги на крію трактора);  $P_f$  – сила опору коченню машинно-тракторного агрегату.

Сила опору ґрунтообробної машини визначається за рівнянням:

$$P_{kp} = K_c \cdot B \cdot h \cdot i, \quad (23)$$

де  $K_c$  – питомий опір робочого органу ґрунтообробної машини;  $B$  – ширина захвату робочого органу машини;  $h$  – глибина обробки ґрунту;  $i$  – кількість робочих органів ґрунтообробної машини.

Швидкість руху мобільного енергетичного засобу

$$V = \frac{3,6\pi \cdot n_k \cdot r_k}{30} = 0,377 \frac{n_{зч} \cdot r_k}{U_{тр.ікл.}} (1 - \delta), \quad (24)$$

де  $n_k$  – частота обертання колеса автомобіля чи трактора;  $n_{зч}$  – частота обертання вала зчеплення;  $\delta$  – коефіцієнт буксування ведучих коліс МЕЗ.

Витрата пального на 100 км шляху:

$$G_{n100} = \frac{G_n}{V}. \quad (25)$$

Викиди сажі на 100 км шляху:

$$G_{c100} = \frac{G_c}{V}. \quad (26)$$

Диференціальне рівняння трансмісії тягово-транспортного засобу описується як

$$\frac{dn_{зч}}{dt} = \frac{30}{\pi I_{зч}} (M_{зч} - M_{нав}), \quad (27)$$

де  $I_{зч}$  – момент інерції зчеплення;  $M_{зч}$  – момент на валу зчеплення.

При математичному моделюванні системи «Тракторист – МТА – поле» при виконанні тракторним агрегатом ґрунтообробних операцій, наприклад, оранки, важливо врахувати випадкові коливання моменту навантаження  $M_{нав}$ . Для врахування випадкових процесів змінних  $M_{нав}$  при розрахунках на математичній моделі доцільно використати методику математичного моделювання псевдовипадкового процесу коливань моменту навантажень, який передається на колінчастий вал двигуна [7].

Момент інерції двигуна, трансмісії енергетичного засобу з причіпною машиною, які приведені до колінчастого вала дизеля  $I_{ов}$ , визначаються з умов рівності кінетичної енергії всіх

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

оберткових і поступально рухомих мас тягово-транспортного засобу:

$$I_o = I_{\partial\partial} + G_{MEZ} \left( \frac{r_k}{U_{mp.i_{KП}}} \right)^2 + \sum_{i=1}^4 \frac{I_k}{U_{mp.i_{KП}}^2} + \sum_{i=1}^4 \frac{I_{np}}{U_{mp.i_{KП}}} \left( \frac{r_k}{r_{np}} \right)^2, \quad (28)$$

де  $I_o$  – момент інерції всіх оберткових і поступально рухомих мас мобільного енергетичного засобу, який приведений до колінчастого валу двигуна;  $G_{MEZ}$  – експлуатаційна маса мобільного енергетичного засобу;  $I_k$  – момент інерції колеса МЕЗ;  $I_{np}$  – момент інерції причепа чи причіпної машини;  $U_{mp.i_{KП}}$  – загальне передавальне число трансмісії на  $i_{KП}$ -й включеній передачі коробки передач;  $r_k$  – радіус колеса МЕЗ;  $r_{np}$  – радіус колеса причепа.

Для проведення обчислювальних досліджень статичних і тягово-динамічних характеристик автотракторних дизелів, паливно-економічних, динамічних і екологічних показників МЕЗ з універсальним регулятором розроблені відповідні алгоритми і програми. Ці математичні моделі дозволяють проводити з високою точністю порівняльні дослідження різних варіантів систем автоматичного регулювання дизеля з однаковою повторюваністю режимів роботи двигуна і автотранспортного засобу або машинно-тракторного агрегату.

Це дуже важливо сьогодні, коли порівняльні дослідження мобільних енергетичних засобів в експлуатаційних умовах по паливній економічності, динамічним і екологічним показникам являються складним організаційно-технічним завданням з причини відсутності необхідного обладнання, приладів і паливно-мастильних матеріалів. Розроблена математична модель системи «водій – мобільний енергетичний засіб – дорога (поле)» дає змогу проводити дослідження системи автоматичного регулювання (САР) дизелів мобільного енергетичного засобу по їздовому циклу.

Адекватність математичної моделі підтверджується збігом розрахункових та експериментальних характеристик і кривих перехідних процесів дизелів і машинно-тракторного агре-

гату при виконанні польових і транспортних робіт. Досліджуваний універсальний регулятор на транспортних роботах дозволяє економити 6–8 % пального.

Таким чином, математична модель тягово-динамічних процесів мобільних енергетичних засобів для досліджень системи автоматичного регулювання частоти обертання дизеля з газотурбінним наддувом складається з системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь у вигляді функціональних залежностей, які дають можливість досліджувати АТЗ чи МТА в умовах реальної експлуатації та по їздовому циклу.

### Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає у розробці методики дослідницького їздового циклу з урахуванням найбільш характерних режимів руху машинно-тракторного агрегату в умовах реальної експлуатації. На розроблені математичні моделі, алгоритми і програми для теоретичних досліджень статичних, динамічних, паливно-економічних показників МТА і АТЗ державна служба інтелектуальної власності України видала свідоцтва про реєстрацію авторського права [11–13].

### Висновки

1. Для дослідження статичних, тягово-динамічних, техніко-економічних та екологічних показників мобільних енергетичних засобів розроблено три математичні моделі та алгоритми і програми, які доведені до практичного використання. Першою математичною моделлю [11] розраховуються швидкісні характеристики ПНВТ з універсальним регулятором і дизеля з газо-турбінним наддувом, другою [12] – розраховуються динамічні показники перехідних процесів у дизелі з турбонаддувом, а завдяки третій моделі [13] проводяться розрахунки процесів рушання, розгону та сталого руху машинно-тракторного агрегату з переключенням передач по їздовому циклу.

2. Удосконалена математична модель для визначення паливної економічності та екологічних показників АТЗ і МТА за їздовим циклом враховує статичні і динамічні характеристики

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

автотракторного ДВЗ та його агрегатів, а також МЕЗ в умовах реальної експлуатації.

3. Розроблена математична модель дає можливість визначити ефективність нових конструктивних, експлуатаційних та технологічних впроваджень, а також різних заходів щодо покращення паливно-економічних та екологічних

показників АТЗ і МТА в експлуатаційних умовах.

4. Використання розроблених математичних моделей сьогодні є актуальним і перспективним при вирішенні нагальних проблем економії паливно-енергетичних ресурсів та екологічної безпеки України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрусенко, С. И. К расчету переходных процессов в САР дизелей на ЭЦВМ / С. И. Андрусенко, К. Е. Долганов // Тр. ЦНИТА. – Ленинград, 1974. – Вып. 61. – С. 27–31.
2. Гутаревич, Ю. Ф. Охрана окружающей среды от загрязнения выбросами двигателей / Ю. Ф. Гутаревич. – Киев : Урожай, 1989. – 224 с.
3. Ковбасенко, С. В. До питання дослідження показників руху легкових та вантажних автомобілів за їздовими циклами за допомогою математичної моделі / С. В. Ковбасенко, О. С. Андрухін, С. Ю. Гутаревич // Вісн. нац. трансп. ун-ту : наук.-техн. зб. / Нац. трансп. ун-т. – Київ, 2012. – Вип. 25. – С. 221–225.
4. Крутов, В. И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект / В. И. Крутов. – Москва : Машиностроение, 1978. – 472 с.
5. Кутьков, Г. М. Тяговая динамика тракторов / Г. М. Кутьков. – Москва : Машиностроение, 1989. – 215 с.
6. Лукьянченко, Б. С. Метод расчёта на ЭЦВМ разгона дизелей с газотурбинным наддувом / Б. С. Лукьянченко // Двигателестроение. – 1987. – № 11. – С. 13–15.
7. Математическое моделирование псевдослучайного процесса колебаний момента сопротивления, действующего на коленчатый вал тракторного дизеля / К. Е. Долганов, А. С. Бурко, В. И. Романюк, С. А. Ковалев // Двигателестроение. – 1986. – № 2. – С. 21–24.
8. Математическая модель двигателя 6 ЧН 13/14 как объекта регулирования по частоте вращения коленчатого вала / В. В. Минцев, А. И. Зайцев, А. Б. Ландышев, А. Н. Маслов // Двигателестроение. – 1990. – № 12. – С. 21–24.
9. Назаренко, О. О. Теоретичне дослідження режимів роботи машинно-тракторних агрегатів / О. О. Назаренко, О. С. Пушка // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. / Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Кіровоград, 2015. – Вип. 45, ч. 1. – С. 232–239.
10. Сахно, В. П. Математична модель для визначення показників паливної економічності автомобіля з двигунами різної потужності при виконанні міського їздового циклу / В. П. Сахно, О. А. Копач // Вісн. нац. трансп. ун-ту : наук.-техн. зб. / Нац. трансп. ун-т. – Київ, 2012. – Вип. 25. – С. 181–185.
11. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49285 (Україна). Комп'ютерна програма «Математична модель розрахунку динамічних показників перехідних процесів дизеля з турбінним наддувом» / А. Ф. Головчук ; заявл. 22.05.13. – 1 с.
12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49286 (Україна). Комп'ютерна програма «Математична модель розрахунку параметрів зовнішньої швидкісної характеристики дизеля з газотурбінним наддувом» / А. Ф. Головчук ; заявл. 22.05.13. – 1 с.
13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49287 (Україна). Комп'ютерна програма «Математична модель розрахунку процесів рушання, розгону та руху машинно-тракторного агрегату» / А. Ф. Головчук ; заявл. 22.05.13. – 1 с.
14. Топливная экономичность и динамика автобуса с регуляторами различных типов / Л. В. Крайнык, Р. В. Пелехатый, А. А. Токарев [и др.] // Автомобильная промышленность. – 1982. – № 2. – С. 13–15.
15. Третьяк, М. В. Універсальна модель гібридного тягово-транспортного засобу (ТТЗ) сільськогосподарського призначення / М. В. Третьяк // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 57–60.
16. Экспериментальная оценка скоростных и топливно-экономических свойств большегрузного автопоезда с двумя вариантами топливного насоса / Ю. Г. Котиков, А. Э. Горев, Б. В. Мамин, А. А. Шестаков // Двигателестроение. – 1982. – № 10. – С. 46–47.
17. Gross, R. Is diesel exhaust deadly / R. Gross // Commercial Carrier J. – 1985. – No. 8. – P. 63–67.
18. Jante, A. Über Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen. Band 2 / A. Jante, K. Hofman. – Berlin : VEB Verlag Technik, 1959. – 740 p.

А. Ф. ГОЛОВЧУК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автомобілі», Запорізький національний технічний університет, ул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 764 26 47, ел. пошта golovchuk.a@i.ua, ORCID 0000-0003-0562-2629

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**Цель.** В научной статье необходимо решить следующие задачи: 1) уточнение математической модели для определения тягово-динамических, топливно-экономических и экологических показателей мобильных энергетических средств; 2) разработку методики теоретических исследований системы автоматического регулирования, статических и динамических характеристик автотракторного дизеля с газотурбинным наддувом и мобильного энергетического средства. **Методика.** В работе исследуются рабочие процессы автотранспортных средств и машинно-тракторных агрегатов путем математического моделирования и разработки алгоритмов и программ для расчетов этих процессов в условиях реальной эксплуатации. Для теоретических исследований разработана система уравнений, которая описывает нелинейную математическую модель системы автоматического регулирования частоты вращения автотракторного дизеля. Кроме дифференциальных уравнений первого и второго порядка, в математическом моделировании рабочих процессов тягово-транспортных средств использованы уравнения, которые описывают опытные характеристики автоматического регулятора, топливного насоса высокого давления, турбокомпрессора и двигателя, а также моменты механических потерь двигателя и внешнюю нагрузку. **Результаты.** Разработанная математическая модель позволяет определить эффективность новых конструктивных, эксплуатационных и технологических разработок, а также различных мероприятий по улучшению топливно-экономических и экологических показателей автотранспортных средств и машинно-тракторных агрегатов в эксплуатационных условиях. **Научная новизна.** Впервые разработана математическая модель «Тракторист–машинно-тракторный агрегат–дорога (поле)», которая позволяет проводить исследования транспортных тракторных агрегатов по ездовым циклам с учетом процессов трогания и разгонов мобильного энергетического средства с переключением передач. **Практическая значимость.** В условиях затяжного экономического кризиса, при отсутствии необходимого оборудования, приборов и топливно-смазочных материалов, сравнительные исследования мобильных энергетических средств возможно провести благодаря разработанным математическим моделям с соответствующими алгоритмами и программами, которые доведены до практического использования. На эти компьютерные программы Укрпатент выдал свидетельства о регистрации авторских прав № 49285, № 49286 и № 49287 от 22 мая 2013 года.

**Ключевые слова:** мобильные энергетические средства; математические модели; алгоритмы и программы; статические и тягово-динамические характеристики; топливная экономичность; токсичность; автотранспортные средства; машинно-тракторные агрегаты

A. F. GOLOVCHUK<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automobiles», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (061) 764 26 47, e-mail golovchuk.a@i.ua, ORCID 0000-0003-0562-2629

## MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE INDICATORS OF TRACTIVE VEHICLES

**Purpose.** The research paper involves solving of the following tasks: 1) refinement of the mathematical model for determining the traction and dynamic, fuel and economic, environmental indicators of mobile energy facilities; 2) methodology development of theoretical studies of automatic control systems, static and dynamic characteristics automotive-tractor diesel with a gas turbine supercharger and a mobile power facility. **Methodology.** The work studies the working processes of vehicles and machine-tractor aggregates by mathematical simulation and the development of algorithms and programs for the calculation of these processes in actual operational conditions. The system of equations has been developed for theoretical research. It describes a nonlinear mathematical model of the automatic control system of an automotive-tractor diesel rotating frequency. In addition to the differential equations

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

of the first and second order, equations are used in mathematical simulation of working processes of traction vehicles. These equations describe experimental characteristics of an automatic regulator, a high-pressure fuel pump, a turbocharger and an engine, as well as moments of engine mechanical losses and an external load. **Findings.** The developed mathematical model allows determining the effectiveness of new design, operational and technological developments, as well as various measures in order to improve the fuel-economic and environmental performances of vehicles and machine-tractor aggregates in operating conditions. **Originality.** For the first time, the mathematical model "Tractor driver – machine-tractor aggregate – road (field)" was developed. It allows conducting research of transport tractor aggregates by driving cycles, taking into account the processes of starting and speeding up the mobile-power sources with gear shift. **Practical value.** In conditions of a protracted economic crisis, in the absence of the necessary equipment, instruments, combustible and lubrication materials, comparative research of mobile power sources can be carried out thanks to the developed mathematical models with corresponding algorithms and programs that are brought to practical use. For these computer programs State Intellectual Property Service of Ukraine issued Certificates on registration of copyright No. 49285, No. 49286, No. 49287 of May 22, 2013.

**Keywords:** mobile power sources; mathematical models; algorithms and programs; static and traction-dynamic characteristics; fuel economy; toxicity; motor vehicles; machine and tractor aggregate

## REFERENCES

1. Andrusenko, S. I., & Dolganov, K. Y. (1974). K raschetu perekhodnykh protsessov v SAR dizeley na ETsVM. *Trudy TsNITA*, 61, 27-31.
2. Gutarevich, Y. F. (1989). *Okhrana okruzhayushchey sredy ot zagryazneniya vybrosami dvigateley*. Kyiv: Urozhay.
3. Kovbasenko, S. V., Andriukhina, O. S., & Hutarevych, S. Y. (2012). Do pyttannya doslidzhennia pokaznykiv rukhu lehkovykh ta vantazhnykh avtomobiliv za yizdovymy tsyklamy za dopomohoiu matematychnoi modeli. *The National Transport University Bulletin*, 25, 221-225.
4. Krutov, V. I. (1978). *Dvigatel vnutrennego sgoraniya kak reguliruemyy obekt*. Moscow: Mashinostroenie.
5. Kutkov, G. M. (1989). *Tyagovaya dinamika traktorov*. Moscow: Mashinostroenie.
6. Lukyanchenko, B. S. (1987). Metod rascheta na ETsVM razgona dizeley s gazoturbinnym nadduvam. *Dvigatolestroyeniye*, 11, 13-15.
7. Dolganov, K. Y., Burko, A. S., Romanyuk, V. I., & Kovalev, S. A. (1986). Matematicheskoye modelirovaniye psevdosluchaynogo protsessa kolebaniy momenta soprotivleniya, deystvuyushchego na kolenchatyy val traktornogo dizelya. *Dvigatolestroyeniye*, 2, 21-24.
8. Mintsev, V. V., Zaytsev, A. I., Landyshev, A. B., & Maslov, A. N. (1990). Matematicheskaya model dvigatelya 6 ChN 13/14 kak obekta regulirovaniya po chastote vrashcheniya kolenchatogo vala. *Dvigatolestroyeniye*, 12, 21-24.
9. Nazarenko, O. O., & Pushka, O. S. (2015). Theoretical research of operating modes of machine-tractor aggregates. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, 45 (1), 232-239.
10. Sakhno, V. P., & Kopach, O. A. (2012). Matematychna model dlia vyznachennia pokaznykiv palyvnoi ekonomichnosti avtomobilia z dvyhunamy riznoi potuzhnosti pry vykonanni miskoho yizdovoho tsyклу. *The National Transport University Bulletin*, 25, 181-185.
11. Golovchuk, A. F. (2013). *UA Registration Certificate of copyright for a work No. 49285*. State Intellectual Property Service of Ukraine.
12. Golovchuk, A. F. (2013). *UA Registration Certificate of copyright for a work No. 49286*. State Intellectual Property Service of Ukraine.
13. Golovchuk, A. F. (2013). *UA Registration Certificate of copyright for a work No. 49287*. State Intellectual Property Service of Ukraine.
14. Kraynyk, L. V., Pelekhatyy, R. V., Tokarev, A. A., Smirnov I. V., & Nagornyak G. A. (1982). Toplivnaya ekonomichnost i dinamika avtobusa s regulyatorami razlichnykh tipov. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2, 13-15.
15. Tretiak, M. V. (2013). Universal model of hybrid vehicle for agricultural purposes. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 3, 57-60.
16. Kotikov, Y. G., Gorev, A. E., Mamin, B. V., & Shestakov, A. A. (1982). Eksperimentalnaya otsenka skorostnykh i toplivno-ekonomicheskikh svoystv bolshegruznogo avtopoyezda s dvumya variantami toplivnogo nasosa. *Dvigatolestroyeniye*, 10, 46-47.
17. Gross, R. (1985). Is diesel exhaust deadly. *Commercial Carrier Journal*, 8, 63-67.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

---

18. Jante, A., Hofman K. (1959). *Über Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen. Band 2*. Berlin: VEB Verlag Technik.

*Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. В. І. Шинкаренком (Україна), д.т.н., проф. Г. Ф. Бабушкіним (Україна)*

Надійшла до редколегії: 17.02.2017

Прийнята до друку: 18.05.2017

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.793.7

Ю. Г. ЧАБАК<sup>1</sup>, Т. В. ПАСТУХОВА<sup>2</sup>, В. Г. ЕФРЕМЕНКО<sup>3\*</sup>, И. А. ВАКУЛЕНКО<sup>4</sup>,  
И. А. ВОЛОСЕНКО<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта julia.chabak25@gmail.com, ORCID 0000-0003-4913-2680

<sup>2</sup>Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта kozarevskaya89@mail.ru, ORCID 0000-0002-0352-9220

<sup>3\*</sup>Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

<sup>4</sup>Каф «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел.+38 (056) 373 15 56, эл. почта dnuzt\_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>5</sup>Каф. «Физика», Приазовский государственный технический университет, ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, эл. почта ira\_volosenko@mail.ru, ORCID 0000-0002-9659-0089

### КОМПОЗИЦИОННОЕ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫТИЕ «СТАЛЬ P18/ЧУГУН 230X28Г3»

**Цель.** В данной научной работе необходимо провести исследование композиционного покрытия, полученного импульсно-плазменной обработкой с применением катодов из высокоуглеродистых сплавов, содержащих повышенное количество карбидообразующих элементов. **Методика.** Покрытие наносили с применением электротермического аксиального плазменного ускорителя при следующих рабочих параметрах: напряжение, подаваемое на электроды – 4,0 кВ; амплитуда тока – 18 кА; расстояние между электродами ~ 50 мм. Обработку проводили по схеме: пять импульсов с электродом из стали P18 + пять импульсов с электродом из чугуна 230X28Г3. После импульсно-плазменной обработки следовала термообработка напыленных образцов: выдержка при 950 °С в течение 2 ч. с последующим охлаждением в масле. При исследовании структуры покрытия использованы оптическая (Nikon Eclipse L150) и электронная (JEOL JSM-6510) микроскопия, энергодисперсионная спектроскопия (X-Act, Oxford Instruments), измерение микротвердости (FM-300 Future-Tech Corp.). **Результаты.** Показано, что в результате импульсно-плазменной обработки с применением различных электродов формируется слоистое покрытие «сталь P18/чугун 230X28Г3» толщиной 110–130 мкм. Выполнен анализ микротвердости покрытия до и после постплазменной термической обработки; показано, что в результате закалки твердость покрытия повышается с 4 900–7 300 МПа до 10 500–13 500 МПа (слой «P18») и 12 000–16 500 МПа (слой «230X28Г3»). **Научная новизна.** Авторами проанализировано распределение легирующих элементов в пределах покрытия, выявлено наличие переходного диффузионного слоя пониженной твердости с переменным содержанием вольфрама и хрома между слоями «P18» и «230X28Г3». Установлено, что после нанесения слоя в покрытии формируется пересыщенный твердый раствор, который при постплазменной термической обработке распадается с образованием 45–70 % карбидов различной формы, что приводит к резкому повышению микротвердости покрытия после закалки. Количество карбидов в слоях пропорционально концентрации углерода и карбидообразующих элементов в катод, использованном для нанесения конкретного слоя. **Практическая значимость.** Показана возможность формирования композиционного импульсно-плазменного слоистого покрытия с переменным по сечению химическим составом и микротвердостью за счет варьирования материала катода и применения постплазменной термообработки.

**Ключевые слова:** импульсно-плазменная обработка; покрытие; микроструктура; карбиды; микротвердость

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**Введение**

Нанесение защитных покрытий преследует цель повышения эксплуатационной долговечности деталей машин и инструмента, используемых в условиях трения, абразивного изнашивания, коррозии и других внешних воздействий. Получение защитных покрытий на поверхности обеспечивается различными технологиями, среди которых выделяется импульсно-плазменная обработка (ИПО) [5, 6, 15]. ИПО позволяет совмещать модифицирование металлической поверхности с нанесением покрытий различного состава и свойств [7, 12]. Для проведения ИПО используют различные устройства, генерирующие плазменные импульсы [4, 9, 13, 16]. К числу таких генераторов относится электротермический аксиальный плазменный ускоритель (ЭАПУ) [10, 11, 14]. Формирование покрытия при ИПО обеспечивается за счет переноса вещества, формирующего плазменный поток. В случае использования ЭАПУ в этом процессе участвуют электроды, стенки и среда разрядной камеры, которые при возникновении импульсного разряда парят и оплавляются, вынося атомы, ионы, микрокапли в плазменный поток, вытекающий из камеры ускорителя. Несмотря на различные влияющие факторы, химический состав и свойства покрытия в основном определяются теплофизическими свойствами (температура плавления, электропроводность, теплопроводность) материала электродов и состоянием среды в межэлектродном промежутке [17]. В работах [2, 3, 7] описаны свойства однослойных ИПО-покрытий, полученных с использованием различных катодов (графит, вольфрам, титан, сталь Р18). В то же время не исследована возможность получения композиционных многослойных покрытий за счет попеременного использования различных катодов. Такие покрытия представляются перспективными с учетом возможности улучшения их свойств за счет взаимодействия легирующих компонентов слоев между собой. Строение композиционных слоев, полученных с помощью ИПО, остается неизученным, что требует проведения дополнительных исследований.

**Цель**

Целью работы явилось исследование композиционного покрытия, полученного импульсно-

плазменной обработкой с применением катодов из сплавов, содержащих повышенное количество карбидообразующих элементов.

**Методика**

Получение импульсно-плазменного покрытия осуществляли с помощью ЭАПУ, конструкция и принципы работы которого подробно описаны в работах [10, 11]. ИПО проводили при таких параметрах: напряжение зарядки накопителя энергии емкостью 1,5 мФ, подаваемое на электроды – 4,0 кВ; амплитуда тока – 18 кА; расстояние между электродами ~50 мм; расстояние от торца ЭАПУ до поверхности образца – 30 мм. В качестве катодов служили стержни диаметром 5 мм из чугуна 230Х28ГЗ (2,34 % С; 27,39 % Cr; 3,13 % Mn; 1,26 % Si; 0,20 % Ti) и стали Р18. Покрытие наносили на образцы размерами 10х10х25 мм из белого чугуна, содержащего 14,6 % Cr [8]. ИПО проводили по схеме: пять импульсов с электродом Р18 + пять импульсов с электродом 230Х28ГЗ. После ИПО следовала термическая обработка: выдержка при 950 °С (2 ч) с защитой поверхности карбюризатором с последующим охлаждением в масле.

Микроструктуру изучали с помощью оптического микроскопа Eclipse L150 (Nikon) и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-6510 (JEOL), с использованием методик количественной металлографии [1]. Фазовый химический состав исследовали с применением энергодисперсионного спектрометра X-Act (Oxford Instruments). Микротвердость измеряли с помощью микротвердомера FM-300 (Future-Tech Corp.) при нагрузке 50 г.

**Результаты**

Металлографический анализ показал, что в результате ИПО на поверхности образца сформировалось покрытие толщиной 110–130 мкм (рис.1, а).

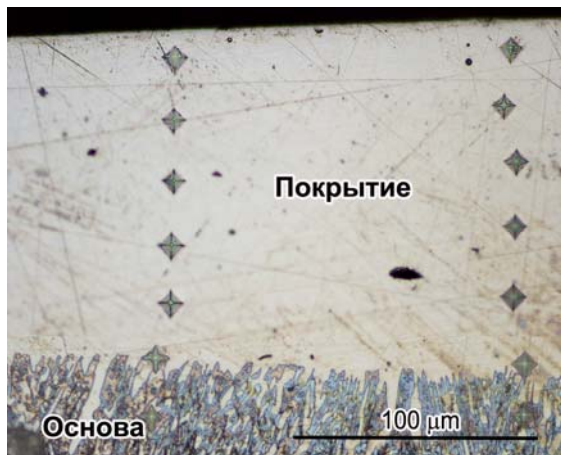
Покрытие выделяется однородностью и пониженной вытравливаемостью на фоне основы. Оно плавно сопрягается с подложкой, четко выраженная граница между ними отсутствует, что указывает на формирование металлической межатомной связи на границе раздела. В пределах покрытия наблюдаются отдельные поры.

Микротвердость покрытия в исходном (до термической обработки) состоянии находится

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

примерно на одном уровне по всему сечению, варьируясь в пределах 4 900–7 300 МПа (рис. 2).

Характер микроструктуры покрытия претерпел кардинальное изменение после дополнительной термической обработки. Как следует из рис. 1, б, в пределах покрытия сформировалась четко выраженная композиционная структура, состоящая из светлого верхнего слоя толщиной 55–70 мкм и более темного нижнего слоя (45–55 мкм), прилегающего к основе.



а – а



б – б

Рис. 1. Микроструктура покрытия:  
а – после нанесения; б – после дополнительной термической обработки

Fig. 1. Microstructure of the coating:  
а – after deposition; б – after post heat treatment

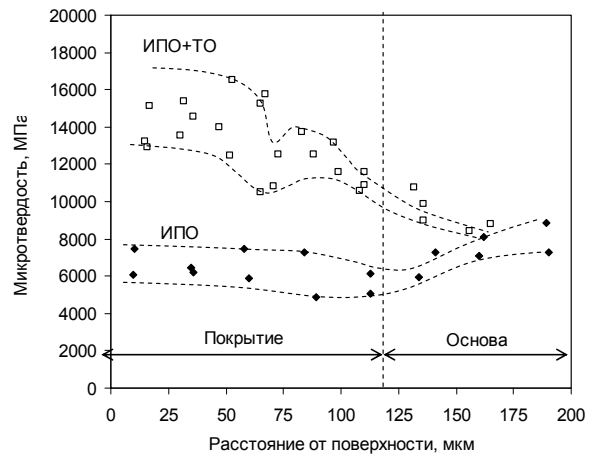


Рис. 2. Изменение микротвердости по сечению покрытия

Fig. 2. Microhardness profile in cross section of the coating

В пределах каждого из слоев структура резко не однородна, видны мелкие белые включения, хорошо различимые на фоне темной матрицы. Исследования, проведенные на сканирующем электронном микроскопе, показали, что в структуре верхнего слоя присутствуют карбиды в виде сплошной сетки толщиной 1–5 мкм по границам зерен (рис. 3, а); объемная доля этих карбидов достигает 60–70 %.

Нижний слой отличается наличием крупных включений блочного типа сечением 5–20 мкм, не связанных в сплошную сетку (рис. 3, б). Между крупными включениями, а также внутри них, находятся дисперсные включения зернистой формы средним диаметром 1–3 мкм. Общая доля включений во втором слое составляет 45–51 %. Нижний слой менее однороден; в нем находятся отдельные крупные включения, а вдоль границы с верхним слоем присутствует темная зона, практически свободная от включений.

Термическая обработка привела к резкому (примерно в 2,5 раза) повышению микротвердости покрытия относительно исходного (ИПО) состояния. Из рис. 2, б следует, что верхний слой обладает большей твердостью (12 000–16 500 МПа) по сравнению с нижним слоем (10 500–13 500 МПа). Между ними залегает зона пониженной твердости (10 000–12 300 МПа).

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

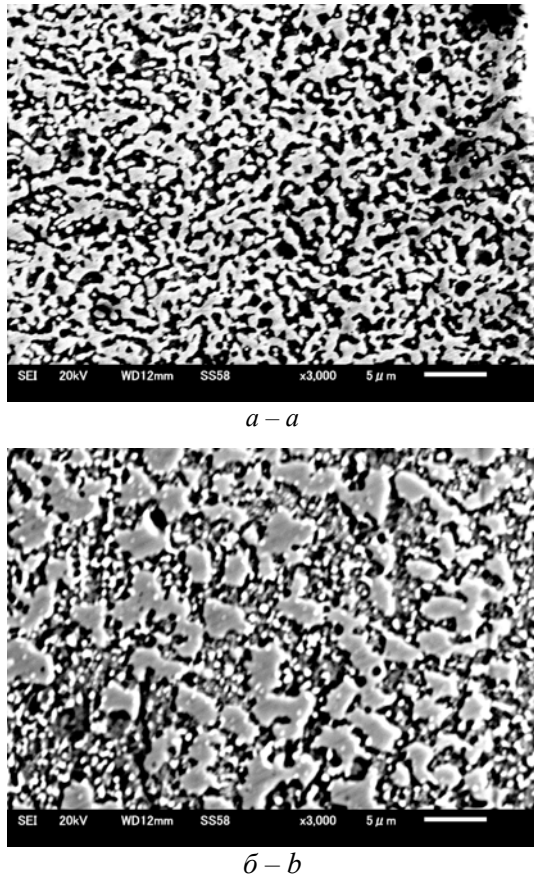


Рис. 3. СЭМ-изображения микроструктуры покрытия:

*a* – верхний (светлый) слой,  
*b* – нижний (темный) слой

Fig. 3. The SEM-images of the coating microstructure:  
*a* – upper (light) layer, *b* – lower (dark) layer

Идентификацию слоев провели с помощью энергодисперсионного анализа в режиме «mapping», результаты которого представлены на рис. 4 в виде изображений участка поверхности в рефлексах различных химических элементов. Концентрация элементов на изображениях соответствует цвету участка согласно принятой шкале, показанной слева на каждом рисунке. Распределение хрома (рис. 4, *a*) свидетельствует о том, что он сосредоточен, в основном, во внешней части покрытия, в то же время в нижнем слое хром присутствует лишь в отдельных точечных областях, по размерам соответствующих крупным включениям (см. рис. 1, *b*).

Между верхним (богатым хромом) и нижним слоями отмечается переходная диффузионная зона со средним содержанием хрома.

Вольфрам практически полностью сосредоточен в нижнем слое (рис. 4, *b*). Его концентрация плавно снижается по мере продвижения от границы «покрытие/подложка» к поверхности. Это является следствием диффузии атомов вольфрама в верхний слой на глубину примерно 10–15 мкм. В верхнем слое количество железа меньше, чем в нижнем (рис. 4, *z*), при этом по мере приближения к основе концентрация железа уменьшается, а вольфрама – растет. Марганец в основном сосредоточен в верхнем слое (рис. 4, *d*).

Анализ представленных результатов показывает, что импульсно-плазменное покрытие состоит из двух четко выраженных слоев. Внутренний слой, прилегающий к основе, образован при использовании катода из стали P18. Об этом свидетельствует обогащение данного слоя вольфрамом и железом при обеднении хромом и марганцем. В свою очередь, наружный слой сформирован за счет плазменного переноса вещества чугунного катода (230X28ГЗ), что привело к насыщению данного слоя хромом и марганцем.

Присутствие указанных карбидообразующих элементов в составе слоев обусловило формирование большого количества карбидов. Объемная доля карбидов в наружном слое выше, чем во внутреннем, что объясняется более высоким содержанием углерода и хрома в катоде 230X28ГЗ, использованном для нанесения этого слоя. Карбиды, сформировавшиеся во внутреннем слое, были идентифицированы ранее [7] как  $M_6C$  (крупные блочные) и  $M_2C$  (мелкие зернистые). Эти карбиды обогащены вольфрамом вследствие использования катода из стали P18. Различное количество карбидов в слоях объясняется разным уровнем их микротвердости.

Сразу после нанесения покрытие не содержало карбидов, находясь в состоянии перенасыщенного твердого раствора, возникшего в результате сверхбыстрой кристаллизации микрокапель металла. Судя по микротвердости (4 900–7 300 МПа), структура сформированного покрытия состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Дополнительная термическая обработка вызвала распад пересыщенного раствора с выделением карбидов. Можно полагать, что обеднение аустенита по углероду, приведя к повышению мартенситной точки  $M_n$ , способст-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

вовало мартенситному превращению при за-  
калке. Выделение карбидов, в совокупности с  
формированием мартенситных элементов, обу-

ловило резкое увеличение микротвердости  
покрытия до уровня, близкого к уровню карби-  
дов  $M_7C_3$  и  $M_6C$  (13 000–18 000 МПа).

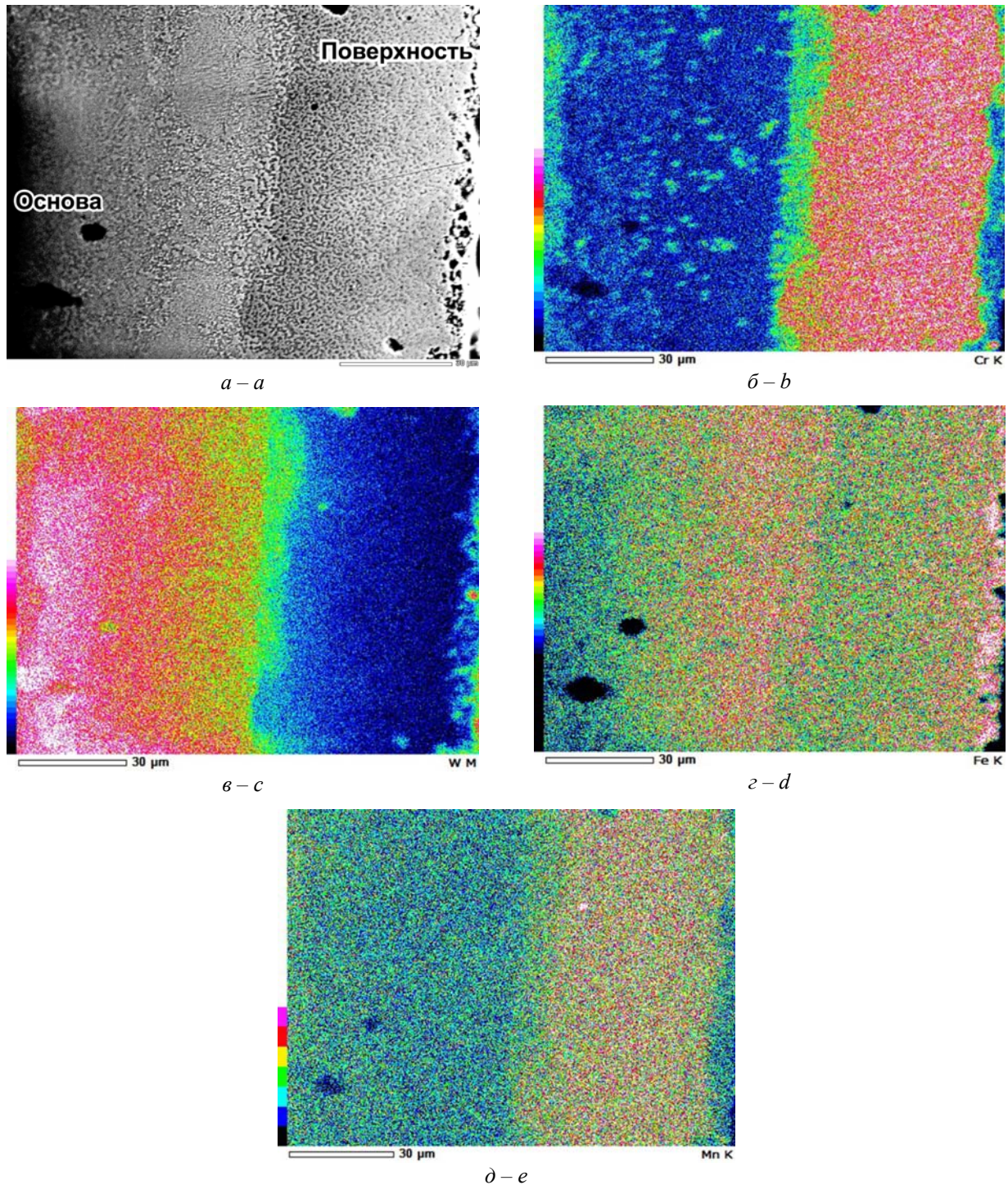


Рис. 4. Распределение химических элементов в покрытии:  
*a* – микроструктура, *b* – хром, *c* – вольфрам, *d* – железо, *e* – марганец

Fig. 4. The distribution of chemical elements within the coating:  
*a* – microstructure, *b* – chromium, *c* – tungsten, *d* – iron, *e* – manganese

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Необходимо отметить, что в ходе ИПО наблюдаемое сплавление указанных слоев сопровождается формированием переходной диффузионной зоны с переменным химическим составом по сечению. Образование этой зоны произошло при нанесении покрытия, однако определенное влияние могла оказать и встречная диффузия элементов в процессе выдержки под закалку. В связи с пониженной концентрацией хрома и вольфрама диффузионная зона содержит мало карбидов (темная зона на границе слоев (см. рис. 1, б), что уменьшает микротвердость покрытия на границе слоев. Таким образом, в результате ИПО и термической обработки на поверхности формируется покрытие с градиентом структур, отличающихся комплексом свойств. Это является эффективным препятствием возникновению трещин при эксплуатации изделий. Достижимый эффект обусловлен повышенной адгезией покрытия с основой и способностью его металла к перераспределению внутренних напряжений.

#### Научная новизна и практическая значимость

Показано, что в случае комбинирования материала катода в электротермическом плазменном ускорителе при ИПО возможно формирование слоистого композиционного покрытия с различной микроструктурой и микротвердостью. Установлено, что применение катодов из высокоуглеродистых сплавов, легированных вольфрамом и/или хромом, позволяет управлять процессом формирования покрытия, содержащим большое количество специальных

карбидов. Впервые исследовано распределение химических элементов (Cr, W, Mn, Fe) по сечению слоев, показана возможность формирования диффузионной зоны между слоями. Проведение высокотемпературной выдержки вызвано необходимостью распада пересыщенного твердого раствора, сформированного сверхбыстрой кристаллизацией при импульсной плазменной обработке. Выполнение (в общей сложности) десяти импульсов обеспечило получение покрытия толщиной 110–130 мкм.

#### Выводы

1. Использование различных катодов (сталь Р18 и чугун 230Х28ГЗ) при импульсной плазменной обработке позволяет получить композиционное покрытие с микротвердостью 10 000–16 500 МПа.

2. Термическая обработка (за счет выделения карбидов в покрытие) обеспечивает повышение его микротвердости более чем в 2–2,5 раза по сравнению с ИПО.

3. Количество карбидов в слоях покрытия пропорционально концентрации углерода и карбидообразующих элементов в катоде, использованном для нанесения конкретного слоя.

#### Благодарность

Авторы статьи выражают признательность профессору Kazumichi Shimizu за помощь в выполнении металлофизических исследований в лабораториях Muroan Institute of Technology (Япония).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вакуленко, І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві / І. О. Вакуленко. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2010. – 124 с.
2. Влияние материала катода и режимов импульсно-плазменной обработки на микроструктуру и микротвердость поверхности высокохромистого чугуна / Ю. Г. Чабак, В. И. Федун, Б. В. Ефременко [и др.] // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. пр. / Приазов. держ. техн. ун-т. – Маріуполь, 2016. – Вип. 32. – С. 72–79.
3. Влияние параметров импульсно-плазменной обработки на структурообразование и свойства стали 40Х / А. П. Чейлях, Ю. Ю. Куцомеля, В. И. Федун, М. А. Рябикина // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 73. – С. 235–239.
4. Лебедев, А. Д. Импульсные ускорители плазмы высокого давления / А. Д. Лебедев, Б. А. Урюков. – Новосибирск : СО АН СССР, ин-т теплофизики, 1990. – 280 с.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

5. Погребняк, А. Д. Модифицирование и легирование alpha-Fe с помощью воздействия высокоскоростной импульсной плазменной струи / А. Д. Погребняк, Ю. Н. Тюрин, А. П. Кобзев // Письма в журнал технической физики. – 2001. – Т. 27, вып. 15. – С. 1–8.
6. Тюрин, Ю. Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин, М. Л. Жадкевич. – Київ : Наук. думка, 2008. – 215 с.
7. Фазово-структурный состав и свойства покрытия, полученного импульсно-плазменной обработкой с использованием эродированного катода из стали P18 / Ю. Г. Чабак, В. И. Федун, К. Шимидзу [и др.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2016. – № 4. – P. 100–106.
8. Чабак, Ю. Г. Структурные изменения в комплекснолегированном белом чугуна при дестабилизирующем нагреве / Ю. Г. Чабак, В. Г. Ефременко, Р. Р. Станишевский // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 38. – С. 229–232.
9. Deposition and characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator / M. Kovaleva, Yu. Tyurin, N. Vasilik [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 232. – P. 719–725. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.086.
10. Formation mechanism of the metallic nanostructures using pulsed axial electrothermal plasma accelerator / Yu. E. Kolyada, V. I. Fedun [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2013. – № 4 (86). – P. 297–300.
11. Kolyada, Yu. E. Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in scientific researches / Yu. E. Kolyada, V. I. Fedun // Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2015. – № 4 – P. 325–330.
12. Ozbek, Y. Y. Surface behavior of AISI 4140 modified with the pulsed-plasma technique / Y. Y. Ozbek, M. Durman // Materials and Technology. – 2015. – Vol. 49, No. 3. – P. 441–445. doi: 10.17222/mit.2013.219.
13. Phase changes in steels irradiated with intense pulsed plasma beams / B. Sartowska, J. Piekoszewski, L. Waliś [et al.] // Vacuum. – 2003. – Vol. 70. – Iss. 2–3. – P. 285–291. doi: 10.1016/S0042-207X(02)00656-5.
14. Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in the technologies / Yu. E. Kolyada, A. A. Bizyukov, O. N. Bulanchuk, V. I. Fedun // Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Electronics and New Acceleration Methods». – 2015. – № 4. – P. 319–324.
15. Studies and characterization of quasi-stationary compression plasma flows generated by gas-discharge and erosive plasma accelerators / V. M. Astashynski, S. I. Ananin, V. V. Askerko [et al.] // Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade. – 2007. – No. 82. – P. 23–33.
16. The influence of the coating thickness on the phase and element composition of a Ti coating/steel system surface layer treated by a compression plasma flow / N. N. Cherenda, V. Uglov, M. G. Poluyanov [et al.] // Plasma Processes and Polymers. – 2009. – Vol. 6, No. 1. – P. 178–182. doi: 10.1002/ppap.200930507.
17. Vakulenko, I. O. Influence of chemical compounds of the forming of welding arc / I. O. Vakulenko, S. O. Plitchenko, D. V. Makarevich // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5. – P. 92–100. doi: 10.15802/stp2014/30824.

Ю. Г. ЧАБАК<sup>1</sup>, Т. В. ПАСТУХОВА<sup>2</sup>, В. Г. ЄФРЕМЕНКО<sup>3\*</sup>, І. О. ВАКУЛЕНКО<sup>4</sup>,  
І. О. ВОЛОСЕНКО<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта julia.chabak25@gmail.com, ORCID 0000-0003-4913-2680

<sup>2</sup>Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта kozarevskaya89@mail.ru, ORCID 0000-0002-0352-9220

<sup>3\*</sup>Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

<sup>4</sup>Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта dnuzt\_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>5</sup>Каф. «Фізика», Приазовський державний технічний університет, вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (0629) 44 61 31, ел. пошта ira\_volosenko@mail.ru, ORCID 0000-0002-9659-0089

## КОМПОЗИЦІЙНЕ ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВЕ ПОКРИТТЯ «СТАЛЬ P18/ЧАВУН 230X28ГЗ»

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**Мета.** В даній науковій роботі необхідно провести дослідження композиційного покриття, отриманого імпульсно-плазмовою обробкою з застосуванням катодів із високовуглецевих сплавів, що містять підвищену кількість карбідоутворюючих елементів. **Методика.** Покриття наносили із застосуванням електротермічного аксіального плазмового прискорювача при наступних робочих параметрах: напруга, що подається на електроди, – 4,0 кВ; амплітуда струму – 18 кА; відстань між електродами ~ 50 мм. Обробку проводили за схемою: п'ять імпульсів із електродами зі сталі P18 + п'ять імпульсів із електродами з чавуну 230X28Г3. Після імпульсно-плазмової обробки слідувала термообробка напилених зразків: витримка при 950 °С протягом 2 год. із наступним охолодженням у маслі. При дослідженні структури покриття використані оптична (Nikon Eclipse L150) та електронна (JEOL JSM-6510) мікроскопія, енергодисперсійна спектроскопія (X-Act, Oxford Instruments), вимірювання мікротвердості (FM-300 Future-Tech Corp.). **Результати.** Показано, що в результаті імпульсно-плазмової обробки з застосуванням різних електродів формується шарувате покриття «сталі P18/чавун 230X28Г3» товщиною 110–130 мкм. Виконано аналіз мікротвердості покриття до і після постплазмової термічної обробки; показано, що в результаті гартування твердість покриття підвищується з 4 900–7 300 МПа до 10 500–13 500 МПа (шар «P18») та 12 000–16 500 МПа (шар). **Наукова новизна.** Авторами проаналізовано розподіл легуючих елементів у межах покриття, виявлено наявність перехідного дифузійного шару зниженої твердості з перемінним вмістом вольфраму і хрому між шарами «P18» та «230X28Г3». Встановлено, що після нанесення шару в покритті формується пересичений твердий розчин, який при постплазмовій термічній обробці розпадається з утворенням 45–70 % карбідів різної форми, що призводить до різкого підвищення мікротвердості покриття після гартування. Кількість карбідів у шарах пропорційна концентрації вуглецю і карбідоутворюючих елементів у катоді, який використано для нанесення конкретного шару. **Практична значимість.** Показана можливість формування композиційного імпульсно-плазмового шаруватого покриття зі змінним по перетину хімічним складом та мікротвердістю за рахунок варіювання матеріалом катода і застосування постплазмової термообробки.

*Ключові слова:* імпульсно-плазмова обробка; покриття; мікроструктура; карбіди; мікротвердість

Y. G. CHABAK<sup>1</sup>, T. V. PASTUKHOVA<sup>2</sup>, V. G. EFREMEENKO<sup>3\*</sup>, I. O. VAKULENKO<sup>4</sup>,  
I. A. VOLOSENKO<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail julia.chabak25@gmail.com, ORCID 0000-0003-4913-2680

<sup>2</sup>Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail kozarevskaya89@mail.ru, ORCID 0000-0002-0352-9220

<sup>3</sup>Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail vgefremenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-4537-6939

<sup>4\*</sup>Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.+38 (056) 373 15 56, e-mail dnuzt\_textmat@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

<sup>5</sup>Dep. «Physics», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (0629) 44 61 31, e-mail ira\_volosenko@mail.ru, ORCID 0000-0002-9659-0089

## COMPOSITE IMPULSED-PLASMA COATING «STEEL T1/CAST IRON CR28MN3»

**Purpose.** The article is aimed to investigate the structure of the composite coating obtained by pulse-plasma treatment using cathodes of high-carbon material with higher amount of carbide-forming elements. **Methodology.** The coating was produced using electrothermal axial plasma accelerator with the following operating parameters: voltage applied to the electrodes is 4.0 kV; amplitude of the current is 18 kA; distance between electrodes of about 50 mm. The treatment was carried out according to the scheme: five pulses with electrode of steel T1 + five pulses with electrode of cast iron Cr28Mn3. The pulsed plasma treatment was followed by heat treatment as holding at 950°C for 2 hours, followed by oil cooling. Optical (Nikon Eclipse L150) and electron (JEOL JSM-6510) microscopy, energy dispersive spectroscopy (X-Act, Oxford Instruments), the microhardness measurement (FM-300 Future-Tech Corp.) were used for microstructure studying. **Findings.** It is shown that pulsed-plasma treatment using various electrodes resulted in formation of laminated coating «P18 steel/cast iron 230Cr28Mn3» of 110-130 microns thick. The analysis of micro-hardness coating before and after the post-plasma heat treatment is carried out. It is found that quenching resulted in increase of coating microhardness from

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

4 900–7 300 MPa to 10 500–13 500 MPa (layer «T1») and 12000–16500 MPa (layer «230Cr28Mn3»). **Originality.** The distribution of the alloying elements within the coating is studied. The diffusion transition layer having variable tungsten and chromium content was revealed between the layer «T1» and layer «230Cr28Mn3». It was shown that after plasma deposition an oversaturated solid solution is being formed in the coating. During post-heat treatment it decomposes with the precipitation of 45-70 % carbides of different shape resulting in sharp increase of microhardness. Carbides amount is proportional to content of carbon and carbide-forming elements in the electrode used for certain layer deposition. **Practical value.** It was shown the possibility of the formation of a composite layered pulsed-plasma coating with variable chemical composition and micro-hardness in cross-section by means of varying the cathode material and by use of post-plasma heat treatment.

**Keywords:** pulsed-plasma treatment; coating; microstructure; carbides; microhardness

## REFERENCES

1. Vakulenko, I. O. (2010). *Strukturnyi analiz v materialoznavstvi*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi.
2. Chabak, Yu. G., Fedun, V. I., Efremenko, B. V., Zurnadzhi, V. I., Dzherenova, A. V., & Volosenko, I. A. (2016). Cathode material and pulsed plasma treatment influence on the microstructure and microhardness of high-chromium cast iron surface. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 32, 72-79.
3. Cheiliakh, A. P., Kutsomelya, Y. Y., Fedun, V. I., & Ryabikina, M. A. (2014). The influence of parameters of pulse-plasma treatment on structure and properties of steel 40Cr. *Stroitelstvo, materialovedeniye, mashinostroeniye*, 73, 235-239.
4. Lebedev, A. D., & Uryukov, B. A. (1990). *Impulsnyye uskoriteli plazmy vysokogo davleniya*. Novosibirsk: Institute of Thermophysics SB RAS.
5. Pogrebnyak, A. D., Tyurin, Y. N., & Kobzev, A. P. (2001). Modifitsirovaniye i legirovaniye alpha-Fe s pomoshchyu vozdeystviya vysokoskorostnoy impulsnoy plazmennoy strui. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 27(15), 1-8.
6. Tyurin, Y. N., & Zhadkevich, M. L. (2008). *Plazmennyye uprochnyayushchiye tekhnologii*. Kyiv: Naukova dumka.
7. Chabak, Yu. G., Fedun, V. I., Shimizu, K., Efremenko, V. G., & Zurnadzhy, V. I. (2016). Phase-Structural Composition of coating obtained by pulsed plasma treatment using eroded cathode of T1 high speed steel. *Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 4, 100-106.
8. Chabak, Yu. G., Efremenko, V. G., & Stanishevskyi, R. R. (2011). Structural changes in the complex-white cast iron at destabilizing heating. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 38, 229-232.
9. Kovaleva, M., Tyurin, Y., Vasilik, N., Kolisnichenko, O., Prozorova, M., Arsenko, M., & Danshina, E. (2013). Deposition and characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator. *Surface and Coatings Technology*, 232, 719-725. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.06.086
10. Kolyada, Y. E., Fedun, V. I., Tyutyunnikov, V. I., Savinkov, N. A., & Kapustin, A. E. (2013). Formation mechanism of the metallic nanostructures using pulsed axial electrothermal plasma accelerator. *Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 4(86), 297-300.
11. Kolyada, Y. E., & Fedun, V. I. (2015). Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in scientific researches. *Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 4(98), 325-330.
12. Ozbek, Y. Y., & Durman, M. (2015). Surface behavior of AISI 4140 modified with the pulsed-plasma technique. *Materials and Technology*, 49(3), 441-445. doi: 10.17222/mit.2013.219
13. Sartowska, B., Piekoszewski, J., Walis, L., Kopcewicz, M., Werner, Z., Stanislawski, J., & Prokert, F. (2003). Phase changes in steels irradiated with intense pulsed plasma beams. *Vacuum*, 70(1-2), 285-291. doi: 10.1016/S0042-207X(02)00656-5
14. Kolyada, Y. E., Bizyukov, A. A., Bulanchuk, O. N., & Fedun, V. I. (2015). Pulse electrothermal plasma accelerators and its application in the technologies. *Problems of Atomic Science and Technology: Plasma Electronics and New Acceleration Methods*, 4, 319-324.
15. Astashynski, V. M., Ananin, S. I., Askerko, V. V., Kostyukevich, E. A., Kuzmitski, A. M., Mishchuk, A. A., & Puric, J. (2007). Studies and characterization of quasi-stationary compression plasma flows generated by gas-discharge and erosive plasma accelerators. *Publications of the Astronomical Observatory of Belgrade*, 82, 23-33.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

16. Cherenda, N. N., Uglov, V. V., Poluyanov, M. G., Astashynski, V. M., Kuzmitski, A. M., Pogrebnjak, A. D., & Stritzker, B. (2009). The influence of the coating thickness on the phase and element composition of a Ti coating/steel system surface layer treated by a compression plasma flow. *Plasma Processes and Polymers*, 6(1), 178-182. doi: 10.1002/ppap.200930507
17. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., & Makarevich, D. V. (2014). Influence of chemical compounds of the forming of welding arc. *Science and Transport Progress*, 5(53), 92-100. doi: 10.15802/stp2014/30824

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Н. Матвиенко (Украина); д.т.н., проф. В. А. Заблудовским (Украина)*

Поступила в редколлегию: 02.02.2017

Принята к печати: 11.05.2017

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.74.042-047.42

П. Г. АНОФРИЕВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, эл. почта anofriev@mail.ru, ORCID 0000-0001-7997-3523

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

**Цель.** Основной целью экспериментальных исследований является установка адекватности разработанных математических моделей колебаний машины и фактических параметров вибрации машины. Практически все литейные машины для производства прокатных валков имеют уникальные конструкции и рабочие характеристики, поэтому дополнительная цель настоящей работы предполагает сопоставление уровня вибрации литейной машины с требованиями действующих стандартов вибрационной активности новых технологических машин. С целью установки дефектов изготовления, ошибок монтажа вращающихся деталей машины и их влияния на динамику машины предусматривается выполнение частотного анализа колебаний машины. **Методика.** Измерение параметров вибрации было выполнено на подвижных частях роликовых опор машины. Для замеров амплитуд ускорений в трех взаимно перпендикулярных направлениях были использованы пьезоэлектрические датчики с магнитным креплением. Электрические сигналы от датчиков были записаны на магнитную ленту. Дальнейший анализ колебаний выполнялся и был визуализирован с помощью специализированного частотного анализатора. Частотный анализатор реализует алгоритм быстрого преобразования Фурье, а также интегрирование входного сигнала датчика. После первого интегрирования получают данные для построения спектрограммы виброскоростей, а результатом второго интегрирования являются данные спектрограммы виброперемещений опор машины. **Результаты.** Представлены результаты экспериментальных исследований колебаний центробежной литейной машины для производства двухслойных прокатных валков. Получены и проанализированы спектрограммы ускорений, скоростей и перемещений подвижных частей верхних и нижних роликовых опор. Работа машины сопряжена с прохождением расчетных значений критических частот и кратковременным развитием резонансных колебаний ротора и роликовых опор. **Научная новизна.** Автором впервые получены частотные спектры вибрации промышленного образца литейной машины. Обнаружены колебания с частотами, которые отличаются от основной роторной частоты. **Практическая значимость.** По итогам эксперимента определены фактические параметры вибрации машины в установившемся режиме при испытаниях без заливки формы металлом. Установлена адекватность математических моделей динамики машины и ее промышленного образца. Методом одного тона получены коэффициенты искажения виброскорости роторной гармоники, указывающие на нелинейные преобразования в системе «ротор–опоры». Экспериментально установлено, что параметры вибрации машины находятся в допустимых диапазонах значений, регламентируемых стандартами для виброактивных машин.

**Ключевые слова:** центробежная литейная машина; производство двухслойных прокатных валков; экспериментальные исследования колебаний; параметры вибрации

#### Введение

Экспериментальные исследования механических колебаний центробежной литейной маши-

ны дают наиболее обширную и достоверную информацию о колебательных процессах в критических и установившихся режимах ее работы.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Вибрации машин на практике представляют собой сложные механические колебания с множеством составляющих на различных частотах. Поэтому для новых машин частотный анализ является основным методом оценки динамических характеристик и вибродиагностики принятых технических решений и методики расчетов. Частотный анализ колебаний машин позволяет обнаружить ряд выраженных частотных составляющих периодического характера, непосредственно связанных с вращением формы и движением ее роликовых опор машины [12, 17, 18]. Основные понятия по измерению физических величин, различные методики и средства измерений вибрации представлены в работах В. С. Голубева, М. Д. Генкина, М. И. Субботина, Е. С. Левшиной, П. В. Новицкого, А. В. Баркова [4–16]. Для получения первичных значений параметров вибрации чаще всего используются пьезодатчики или акселерометры. Акселерометры предназначены для преобразовывания ускорения вибраций физических тел в электрические сигналы [13]. Дальнейшая обработка сигналов выполняется с помощью компьютеризированных анализаторов. Используя быстрое преобразование Фурье, анализаторы определяют амплитуды ускорений и спектр частот колебаний исследуемого тела. Скорости и перемещения вычисляются путем интегрирования ускорения тела.

**Цель и постановка задачи**

Целью исследований являлось получение объективной информации о динамике машины и сравнение фактических параметров вибрации с результатами исследований колебательных процессов [1–3], проведенных на математических моделях. Для этого выполнены измерения колебаний подвижных частей роликовых опор и фундамента машины на этапах подготовки формы к заливке металлом. Выполнялись условия:

- опорный стакан (ротор) без литейной формы вращается с постоянной угловой скоростью;
- машина с литейной формой, полностью подготовленной к заливке металлом, останавливается (выбег) без принудительного торможения электродвигателем.

**Методика**

Современные методы измерений вибрации [4, 14] предусматривают преобразование механических колебаний в электрические сигналы, запись их на носители информации и последующую обработку на частотных анализаторах.

В соответствии с этими методами [4, 14] на Лутугинском заводе прокатных валков были проведены экспериментальные исследования колебаний машины для производства двухслойных прокатных валков. Схемы размещения датчиков и измерительного тракта (рис. 1) предназначены для измерения вибрации подвижных частей роликовых опор и фундамента в трех направлениях. В качестве вибродатчиков перемещения использовались пьезоэлектрические акселерометры типа 4321 фирмы «Brüel & Kjær». Этот тип датчиков отличается широким частотным и динамическим диапазоном, линейной характеристикой, прочной конструкцией, надежностью и стабильностью параметров. Акселерометры чувствительны к ускорениям, что дает возможность измерения и анализа не только ускорений, а также скорости и перемещения. При выборе типа акселерометров учитывались условия проведения исследований: высокая температура и акустический шум. Используемые датчики типа 4321 фирмы «Brüel & Kjær» допускают нагрев до температуры 250 °С и малочувствительны к шуму; их частотный диапазон до 12 кГц [15]. Температура в местах размещения датчиков не превышала 30–35 °С.

Крепились акселерометры на подвижных частях роликовых опор с помощью встроенных постоянных магнитов. Этот метод крепления используется при измерении и анализе в области низких частот – до 2 кГц. Сила постоянных магнитов обеспечивает надежную работу датчика при ускорениях 1 000...2 000 м/с<sup>2</sup>. Для регистрации электрических сигналов акселерометров был применен измерительный магнитофон типа 7006 фирмы «Brüel & Kjær» со скоростью протяжки магнитной ленты 48,1 мм/с. Это наиболее эффективный способ регистрации, т.к. воспроизведение при повышенной скорости движения ленты дает возможность частотного преобразования низкочастотных процессов в рабочий диапазон нормальных частотных анализаторов [11].

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

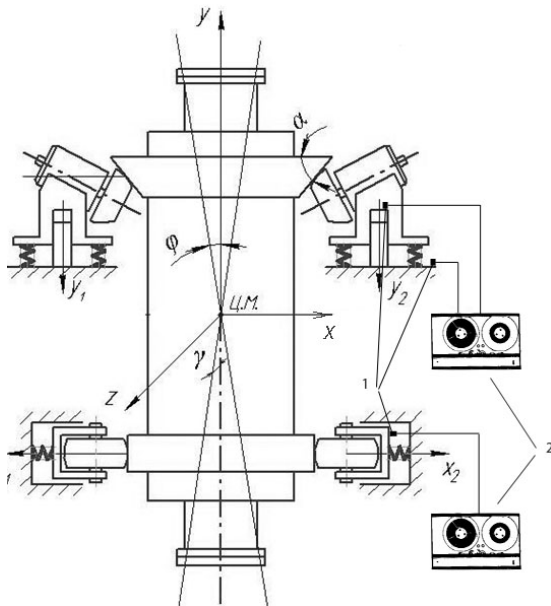


Рис. 1. Схема размещения датчиков и измерительного тракта:

1 – пьезоакселерометр; 2 – измерительный магнитофон

Fig. 1. Arrangement of sensors and measuring path:  
1 – piezoelectric accelerometer; 2 – instrumental magnetic recorder

Магнитная запись обрабатывалась с помощью двухканального частотного анализатора 2034 фирмы «Brüel & Kjær».

### Динамика нижних опор машины при работе без литейной формы

Исследовался резонансный режим работы машины при отсутствии литейной формы; это достаточно безопасные исследования, т.к. масса ротора примерно вдвое меньше и отсутствует формовочная смесь. Датчик, размещенный на нижней подвижной части роликовой опоры, позволил зафиксировать, а программное обеспечение анализатора позволило выполнить частотный анализ вибрации машины (рис. 2). Наибольшие виброскорости в области низких частот наблюдаются в пределах 8, 16 и 18 Гц; 8 Гц – соответствует частоте вращения ротора, 16 Гц – 2-я гармоника роторной частоты и 18 Гц соответствует передаточному отношению от ролика к ротору.

Интегрирование спектрограммы скоростей (рис. 3) позволило установить значения амплитуд колебаний нижних опор в областях рабочих частот машины. Амплитуды перемещений находятся в диапазоне 0,2...0,3 мм и безопасны

для конструкции машины. Амплитуды колебаний на частотах менее 1,5 Гц малодостоверны из-за двойного интегрирования исходного сигнала датчика.

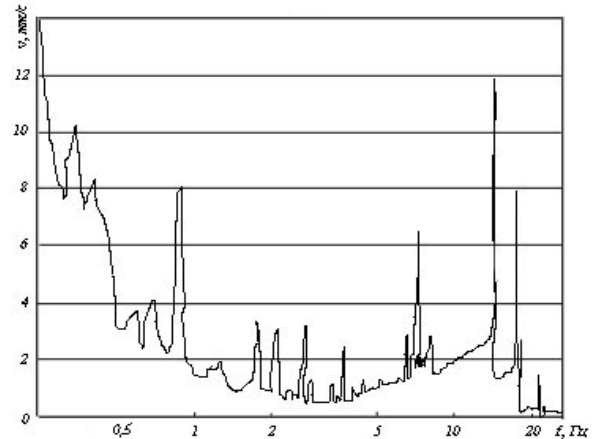


Рис. 2. Виброскорости нижней роликовой опоры

Fig. 2. Vibration speeds of the lower roller support

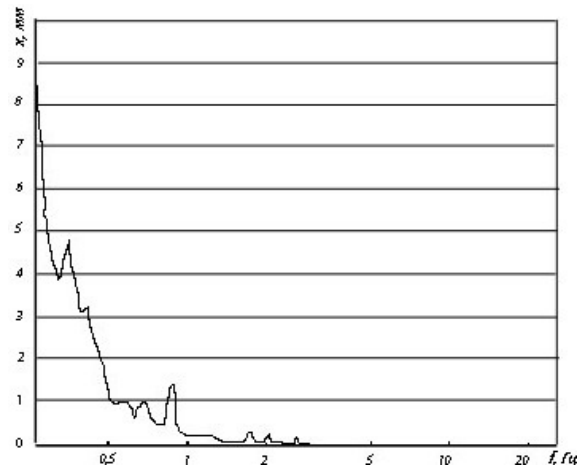


Рис. 3. Виброперемещения нижней роликовой опоры

Fig. 3. Vibration displacements of the lower roller support

### Вибрационные процессы в установившемся режиме работы

Для установившихся режимов работы машины на спектрограмме (рис. 4) хорошо видны значения амплитуд виброускорений опор на рабочей (роторной) частоте машины ( $f=7,5$  Гц) и на двух ее гармониках. Наличие в спектрах роторных гармоник указывает на нелинейные преобразования в системе «ротор – роликовые опоры». Нелинейные искажения роторной гар-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

моніки оцінюються методом одного тона по коефіцієнту искаження віброскорості или віброускорення [12]:

$$K_{a,v} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} X_i}}{X_1}, \quad (1)$$

где  $X_1$  – амплитуда первой роторной гармоник;  $X_i$  – амплитуда  $i$ -й роторной гармоник.

Данные для расчета коэффициента искажения получены для установившегося режима движения (рис. 5). У верхних опорных роликов  $K_{a,v} \approx 0,57$ ; для нижних центрирующих опор искажение существенно выше –  $K_{a,v} \approx 7,65$ . Значительное отличие значений коэффициентов искажения объясняется отклонениями размеров и формы при изготовлении и монтаже роликовых опор.

Кроме гармоник роторной частоты, на спектрограммах наблюдаются и другие составляющие вибрации, обусловленные наличием в конструкции машины вращающихся роликов, подшипников, карданного вала электропривода. Математическая модель таких вибраций имеет вид [12]:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n x_i \cos(i \cdot \omega_p \cdot t + \varphi_i), \quad (2)$$

где  $x_i$  – амплитуда  $i$ -й частоты;  $\omega_p$  – частота вращения ротора машины;  $\varphi_i$  – начальная фаза  $i$ -й частоты;  $n$  – число независимых частот вибрации.

Среднее квадратическое значение віброскоростей, описанных выражением (2), определяется как

$$X_{cp.kv.} = \sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2}. \quad (3)$$

Фактическое среднеквадратическое значение віброскорості верхних опор составляет 37 мм/с, а для центрирующих опор – 21 мм/с.

Согласно [6] максимально допустимые значения амплитуд віброскорості роторных вибраций на установившихся режимах работы для исследуемого частотного диапазона составляют: для стационарных машин и установок – 6...25 мм/с; для транспортных двигателей – 20...60 мм/с.

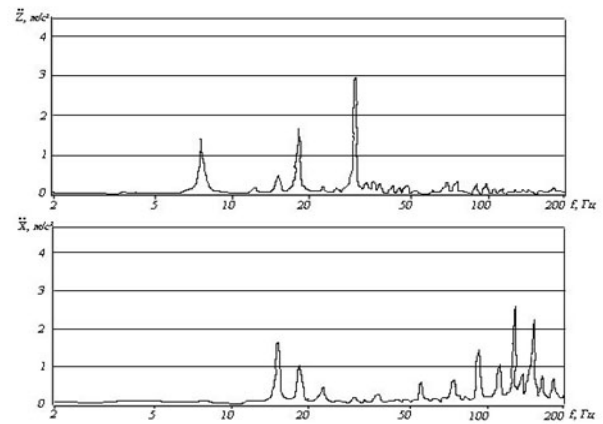


Рис. 4. Спектрограммы ускорений низкочастотных вибраций верхней и нижней роликовых опор машины

Fig. 4. Spectrograms of acceleration of low-frequency vibrations of upper and lower roller supports of the machine

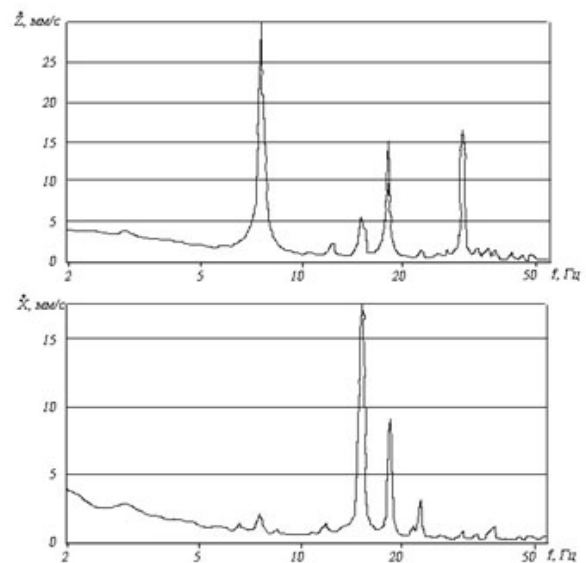


Рис. 5. Спектрограммы скоростей низкочастотных вибраций верхней и нижней роликовых опор машины

Fig. 5. Spectrograms of speeds of low-frequency vibrations of upper and lower roller supports of the machine

На переходных режимах допускаются значительно большие віброскорості. Спектрограммы перемещений опор (рис. 6) получены двойным интегрированием сигнала віброускорений, поэтому на частотах менее 5 Гц мало достоверны.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Среднеквадратичное значение линейных виброперемещений верхних роликовых опор, подсчитанное по формуле

$$K_{a,V} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} X_i}}{X_1}, \quad (4)$$

составляет 0,7...0,8 мм, виброперемещение центрирующих роликовых опор – 0,2...0,3 мм.

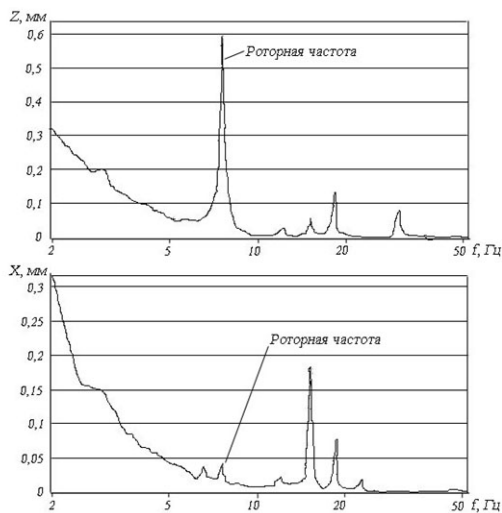


Рис. 6. Спектрограммы перемещений низкочастотных вибраций верхней и нижней роликовых опор машины

Fig. 6. Spectrograms of displacements of low-frequency vibrations of upper and lower roller supports of the machine

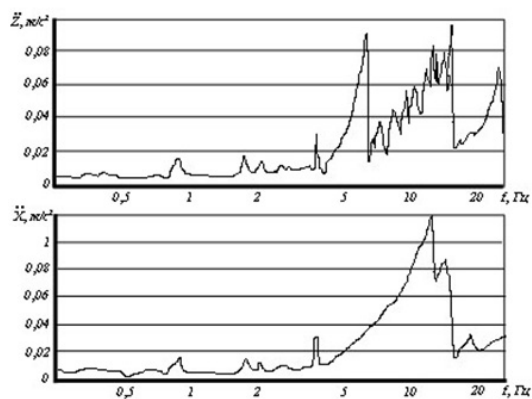


Рис. 7. Спектрограмма ускорений верхних и нижних опор машины при прохождении в режиме разгона второй критической частоты

Fig. 7. Spectrogram of accelerations of the upper and lower supports of the machine in the mode of acceleration of the second critical frequency

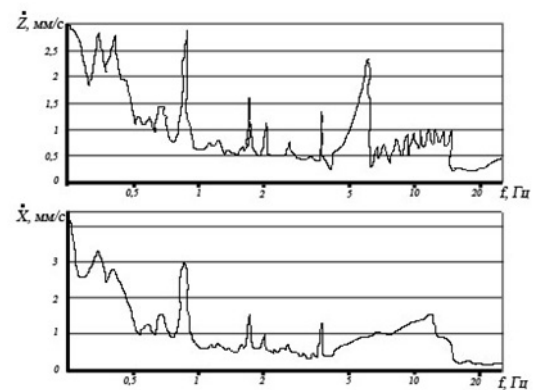


Рис. 8. Спектрограмма скоростей верхних и нижних опор машины при прохождении в режиме разгона второй критической частоты

Fig. 8. Spectrogram of speeds of the upper and lower supports of the machine in the mode of acceleration of the second critical frequency

### Результаты исследований

В процессе выполнения работы получены спектрограммы колебаний подвижных частей роликовых опор и фундамента машины на этапах подготовки формы к заливке металлом.

Установлена адекватность математической модели колебаний машины полученным спектрограммам разгона машины. Этот кратковременный режим прохождения критических частот сопровождается развитием резонансных колебаний ротора и роликовых опор (рис. 7, 8). Хорошо просматривается резонансный рост амплитуды виброскорости на второй резонансной частоте 5,9 Гц (354 об/мин) и на ее нескольких гармониках.

### Научная новизна и практическая значимость

Расчетное значение второй резонансной частоты, полученное в [2, 3], равно 35,9 рад/с (343 об/мин). Отклонение действительного значения фактической резонансной частоты от ее расчетного значения составляет 3,1 %. Это отклонение следует отнести на допустимый разбег упруго-массовых параметров, имеющий место при изготовлении машины.

### Выводы

1. Впервые получены и исследованы спектры вибрации в рабочем диапазоне скоростей вращения формы вертикальной центробежной

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

машины с индивидуальной упругой установкой роликовых опор, предназначенной для производства прокатных валков.

2. Наличие в спектрах роторных гармоник указывает на нелинейные преобразования в системе «ротор – роликовые опоры».

3. Среднеквадратичное значение линейных виброперемещений верхних роликовых опор составляет 0,7...0,8 мм, виброперемещение центрирующих роликовых опор – 0,2...0,3 мм.

4. Фактическое среднеквадратичное значение виброскорости верхних опор составляет

37 мм/с, а для центрирующих опор – 21 мм/с. Полученные значения виброскоростей опор не превышают рекомендуемых значений скоростей для исследуемого типа металлургических машин.

5. Установлена адекватность математической модели колебаний машины фактических колебаний промышленного образца машины. Расхождение расчетного и фактического значений высшей (второй) критической частоты составляет 3,1 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анофриев, П. Г. Исследование переходных режимов движения центробежной машины для литья валков / П. Г. Анофриев, Г. Ф. Смирнов // Подъемно-транспортная техника. – 2008. – № 1. – С. 22–31.
2. Анофриев, П. Г. Разработка и исследование математической модели динамики вертикальной литейной машины с индивидуальной упругой подвеской роликоопор / П. Г. Анофриев, Г. Ф. Смирнов // Подъемно-транспортная техника. – 2006. – № 3. – С. 54–64.
3. Анофриев, П. Г. Разработка и исследование математической модели динамики вынужденных колебаний вертикальной литейной машины с индивидуальной подвеской роликоопор / П. Г. Анофриев, Г. Ф. Смирнов // Подъемно-транспортная техника. – 2006. – № 4. – С. 34–44.
4. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации : учеб. пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – Санкт-Петербург : ГМТУ, 2004. – 156 с.
5. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. / под. ред. В. Н. Челомей [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1981. – Т. 5 : Измерения и испытания. – 496 с.
6. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях : ГОСТ ИСО 10816-3-2002. – Введ. 2007–11–01. – Москва : Стандартинформ, 2007. – Ч. 3 : Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин<sup>-1</sup>. – 16 с.
7. Зрюмов, П. А. Аналитический обзор методов измерения вибрации / П. А. Зрюмов, Ю. В. Селезнёва // Ползуновский альманах. – 2014. – № 1. – С. 185–187.
8. Измерения в промышленности : справочник : в 3 т. : [пер. с нем.] / под ред. П. Профоса. – 2 изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1990. – Т. 2 : Способы измерения и аппаратура. – 384 с.
9. Измерение и анализ механических колебаний. – Глоструп, Дания : Ларсен и сын, 1995. – 40 с.
10. Костромин, М. А. Измерение скорости движения и параметров вибрации объектов гетеродинным методом [Электронный ресурс] / М. А. Костромин, А. А. Титов, В. К. Гарипов // Наука и Образование, МГТУ им. Н. Э. Баумана : электрон. журн. – 2015. – № 12. – С. 110–118. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/jour/article/view/87>. – Загл. с экрана. – Проверено : 31.05.2017.
11. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин (Измерительные преобразователи) : учеб. пособие для вузов / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1983. – 320 с.
12. Максимов, В. П. Измерение, обработка и анализ быстропеременных процессов в машинах / В. П. Максимов, И. В. Егоров, В. А. Карасев. – Москва : Машиностроение. 1987. – 208 с.
13. Малов, В. В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
14. Сафарбаков, А. М. Основы технической диагностики . учеб. пособие / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов. – Иркутск : ИрГУПС, 2006. – 216 с.
15. Серридж, М. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям / М. Серридж, Р. Лихт. – Глоструп, Дания : Ларсен и сын, 1987. – 187 с.
16. Юрин, А. И. Измерительная система для контроля параметров вибрации / А. И. Юрин, Г. Ю. Злодеев // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 245–247.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

17. Jayaswal, P. Machine Fault Signature Analysis / P. Jayaswal, A. K. Wadhvani, K. B. Mulchandani // Intern. J. of Rotating Machinery. – 2008. – Vol. 2008. – P. 1–10. doi: 10.1155/2008/583982.
18. Suteu, M. Systems proposed for measuring, monitoring and analysis vibration of machines from textile industry / M. Suteu, L. Indrie, M. A. Prichici // Economics Management Information Technology. – 2015. – Vol. 4, No. 2. – P. 34–41.

П. Г. АНОФРІЄВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта anofriev@mail.ru, ORCID 0000-0001-7997-3523

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВІДЦЕНТРОВОЇ ЛИВАРНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ

**Мета.** Основною метою експериментальних досліджень є встановлення адекватності розроблених математичних моделей коливань машини та фактичних параметрів вібрації машини. Практично всі ливарні машини для виробництва прокатних валків мають унікальні конструкції та робочі характеристики, тому додаткова мета цієї роботи передбачає порівняння рівня вібрації ливарної машини з вимогами діючих стандартів вібраційної активності нових технологічних машин. З метою встановлення дефектів виготовлення, помилок монтажу обертових деталей машини та їх вплив на динаміку машини передбачається виконання частотного аналізу коливань машини. **Методика.** Вимірювання параметрів вібрації було виконано на рухомих частинах роликів опор машини. Для вимірювань амплітуд прискорень у трьох взаємно перпендикулярних напрямках були використані п'єзоелектричні датчики з магнітним кріпленням. Електричні сигнали від датчиків були записані на магнітну стрічку. Подальший аналіз коливань виконувався й був візуалізований за допомогою спеціалізованого частотного аналізатора. Частотний аналізатор реалізує алгоритм швидкого перетворення Фур'є, а також інтегрування вхідного сигналу датчика. Після першого інтегрування отримуємо дані для побудови спектрограми віброшвидкостей, а результатом другого інтегрування є дані для спектрограми вібропереміщень опор машини. **Результати.** Представлені результати експериментальних досліджень коливань відцентрової ливарної машини для виробництва двошарових прокатних валків. Отримані та проаналізовані спектрограми прискорень, швидкостей і переміщень рухомих частин верхніх та нижніх роликів опор. Робота машини пов'язана з проходженням розрахункових значень критичних частот і короткочасним розвитком резонансних коливань ротора та роликів опор. **Наукова новизна.** Автором вперше отримані частотні спектри вібрації промислового зразка ливарної машини. Виявлені коливання з частотами, які відрізняються від основної роторної частоти. **Практична значимість.** За висновками експерименту визначені фактичні параметри вібрації машини в сталому режимі при дослідженнях без заливання форми металом. Встановлена адекватність математичних моделей динаміки машини та її промислового зразка. Методом одного тону отримані коефіцієнти спотворення віброшвидкості роторної гармоніки, що вказують на нелінійні перетворення в системі «ротор-опори». Експериментально встановлено, що параметри вібрації машини знаходяться в припустимих діапазонах значень, регламентованих стандартами для віброактивних машин.

**Ключові слова:** відцентрова ливарна машина; виробництво двошарових прокатних валків; експериментальні дослідження коливань; параметри вібрації

P. G. ANOFRIEV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Lazaryan St., 2, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail anofriev@mail.ru, ORCID 0000-0001-7997-3523

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMICS OF CENTRIFUGAL CASTING MACHINES FOR PRODUCTION OF MILL ROLLS

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

**Purpose.** The main purpose of experimental studies is to establish the adequacy of the developed mathematical models of machine fluctuations and the actual parameters of machine vibration. Almost all casting machines for the production of mill rolls have a unique design and performances. The additional aim of this work is to compare the vibration level of the casting machine with the requirements of the current vibration standards for new technological machines. Frequency analysis of the oscillations allows establishing defects in workmanship, errors of rotating parts installation and their influence on the dynamics of the machine. **Methodology.** Measurement of vibration parameters was performed on the moving parts of roller bearings of the machine. To measure the amplitudes of accelerations in three mutually perpendicular directions piezoelectric sensors with magnetic mount were used. Electrical signals from the sensors were recorded on magnetic tape. Further analysis of the oscillations was carried out and visualized using specialized frequency analyzer. The frequency analyzer implements the algorithm of fast Fourier transformation and/or integration of sensor input signal. After the first integration the data for plotting the vibration velocity spectrogram were obtained and as a result of the second integration there are the data of vibration displacements spectrogram of the machine supports. **Findings.** The results of experimental studies of centrifugal casting machine vibrations for the production of two-layer rolls were presented. There were obtained and analyzed the spectrograms of accelerations, velocities and displacements of moving parts of the upper and lower roller supports. The work of the machine is associated with the calculated values passing of critical frequencies and the short-term development of resonance oscillations of the rotor and roller bearings. **Originality.** For the first time the author obtained the frequency spectra of vibration of an industrial sample of a casting machine. The oscillations with frequencies that differ from the basic rotor frequency were detected. **Practical value.** Based on the results of the experiment, the actual vibration parameters of the machine in steady state when testing without die-casting the metal were determined. The adequacy of mathematical models of the dynamics of the machine and its industrial model was established. Using the method of one tone the coefficients of vibration velocity distortion of the rotor harmonic, indicating the nonlinear transformations in the system "rotor - bearings" were obtained. It was experimentally established that the vibration parameters of the machine are within the acceptable ranges, regulated by standards for vibroactive machines.

**Keywords:** centrifugal casting machine; production of double-layer mill rolls; experimental studies of fluctuations; vibration parameters

## REFERENCES

1. Anofriev, P. G., & Smirnov, G. F. (2008). Issledovaniye perekhodnykh rezhimov dvizheniya tsentrobezhnoy mashiny dlya litya valkov. *Hebezeuge und Fördermittel*, 1, 22-31.
2. Anofriev, P. G., & Smirnov, G. F. (2006). Razrabotka i issledovaniye matematicheskoy modeli dinamiki vertikalnoy liteynoy mashiny s individualnoy uprugoy podveskoy rolkoopor. *Hebezeuge und Fördermittel*, 3, 54-64.
3. Anofriev, P. G., & Smirnov, G. F. (2006). Razrabotka i issledovaniye matematicheskoy modeli dinamiki vynuzhdennykh kolebaniy vertikalnoy liteynoy mashiny s individualnoy podveskoy rolkoopor. *Hebezeuge und Fördermittel*, 4, 34-44.
4. Barkov, A. V., & Barkova, N. A. (2004). *Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii*. St. Petersburg: GMTU.
5. Chelomey, V. N. (Ed.). (1981). Izmereniya i ispytaniya (Vol. 5). In *Vibratsii v tekhnike: spravochnik* (Vol. 1-6). Moscow: Mashinostroenie.
6. Vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 3. Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min, ISO 10816-3:1998 (2007).
7. Zryumov, P. A., & Seleznyova, Y. V. (2014). State-of-the-art review of methods of vibration measurements. *Polzunovskiy vestnik*, 1, 185-187.
8. Profos, P. (Ed.). (1990). Sposoby izmereniya i apparatura (Vol. 2). In *Izmereniya v promyshlennosti: spravochnik* (Vol. 1-3). (2nd ed.). Moscow: Metallurgiya.
9. *Izmereniye i analiz mekhanicheskikh kolebaniy*. (1995). Glostrup: Larsen and Son.
10. Kostromin, M. A., Titov, A. A., & Garipov, V. K. (2015). A Heterodyne-based Method for Measuring Object Movement Speed and Vibration Parameters. *Science and Education: Scientific Publication of BMSTU*, 12, 110-118. doi: 10.7463/1215.0828437
11. Levshina, Y. S., & Novitskiy, P. V. (1983). *Elektricheskiye izmereniya fizicheskikh velichin (izmeritelnyye preobrazovateli)*. Leningrad: Energoatomizdat.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

12. Maksimov, V. P., Yegorov, I. V., & Karasev, V. A. (1987). *Izmereniye, obrabotka i analiz bystroperemennykh protsessov v mashinakh*. Moscow: Mashinostroeniye.
13. Malov, V. V. (1989). *Pezorezonansnyye datchiki*. (2nd ed.). Moscow: Energoatomizdat.
14. Safarbakov, A. M., Lukyanov, A. V., & Pakhomov, S. V. (2006). *Osnovy tekhnicheskoy diagnostiki*. Irkutsk: IrGUPS.
15. Serridzh, M., & Likht, T. R. (1987). *Spravochnik po piezoelektricheskim akselerometram i predusilitelyam*. Glostrup: Larsen and Son.
16. Yurin A. I., Zlodeev, G. Y. (2016). Izmeritelnaya sistema dlya kontrolya parametrov vibratsii. In S. U. Uvaysov (Ed.), *Proceedings of the XIII International Conference on Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii, October, 1-10, 2016, Sochi*. 245-247. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA imeni professora N. Ye. Zhukovskogo. Retrieved from [https://www.hse.ru/mirror/pubs/lib/data/access/ram/ticket/29/1496311497de864d668186654dfb7120626feb2266/INFO2016\\_Yurin.pdf](https://www.hse.ru/mirror/pubs/lib/data/access/ram/ticket/29/1496311497de864d668186654dfb7120626feb2266/INFO2016_Yurin.pdf)
17. Jayaswal, P., Wadhwani, A. K., & Mulchandani, K. B. (2008). Machine Fault Signature Analysis. *International Journal of Rotating Machinery*, 2008, 1-10. doi: 10.1155/2008/583982
18. Suteu, M., Indrie, L., & Prichici, M. A. (2015). Systems proposed for measuring, monitoring and analysis vibration of machines from textile industry. *Economics Management Information Technology*, 4 (2), 34-41.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. В. Ракиой (Украина); д.т.н., проф. С. В. Белодеденко (Украина)

Поступила в редколлегию: 10.02.2017

Принята к печати: 17.05.2017

# РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.46.02

Ю. П. БОРОНЕНКО<sup>1\*</sup>, И. О. ФИЛИПОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Московский просп., 9, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (812) 310 92 10, эл. почта boron49@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8560-1758

<sup>2\*</sup>АО Научно-внедренческий центр «Вагоны», Московский просп., 2, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (812) 310 95 00, эл. почта filippova.io@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9584-4772

## ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВАГОНОВ С МАЛОЙ МАССОЙ ТАРЫ

**Цель.** В работе необходимо выявить причины существенно большего коэффициента тары вагонов колеи 1 520 мм в сравнении с грузовыми вагонами Северной Америки и дать рекомендацию по снижению массы тары грузовых вагонов. **Методика.** В качестве методики применена сравнительная оценка показателей прочности, выносливости и устойчивости несущей конструкции минимальной массы, изготовленной из различных материалов по действующим на «пространстве 1 520» нормативам. **Результаты.** Авторами установлено, что при использовании высокопрочных сталей массу изделия можно снизить в пять раз в сравнении с балкой из стали 09Г2С. Если же в конструкции имеется сварное соединение, то масса конструкции увеличится примерно в 2 раза при расчете по «Нормам для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС России колеи 1 520 мм (несамоходных)». А при расчетах по ГОСТ 33 211-2013 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» масса увеличивается почти в 5 раз и не зависит от типа стали. **Научная новизна.** Выявлено, что основным критерием, определяющим массу тары современных вагонов, является усталостная прочность сварного соединения. Показано, что ГОСТ 33 211-2013 и рекомендации Международного института сварки назначают низкие пределы выносливости высокопрочных сталей, и при их соблюдении достичь снижения тары невозможно. **Практическая значимость.** Разработано направление действий по снижению тары вагонов: экспериментально уточнены условия прочности сварных соединений вагонов из высокопрочных материалов; разработаны способы повышения выносливости сварных соединений; предполагаются другие виды соединений.

**Ключевые слова:** тара вагона; высокопрочная сталь; сварные конструкции; грузовой вагон; прочность

### Введение

Снижение тары вагона является одной из приоритетных задач вагоностроителей. Меньший вес тары позволяет повысить грузоподъемность, сократить расходы на закупку материалов, снизить стоимость вагона, сократить расходы на тягу и увеличить погонную нагрузку нетто. Однако успехи в этом направлении минимальны. Тара новых вагонов не уменьшается, а зачастую даже растет.

На железных дорогах Северной Америки и Австралии в эксплуатации находятся десятки тысяч грузовых вагонов, у которых осевая нагрузка от оси на рельс 32–35 тс, грузоподъем-

ность до 116 т, масса тары 18,9–25 т, коэффициент тары составляет 0,17...0,24 [2, 7, 9]. Таким образом, особенность вагоностроения Северной Америки состоит в повышении грузоподъемности вагонов за счет применения высоких нагрузок от оси на рельсы, составляющих для большинства вагонов 32–35 тс, что позволяет строить четырехосные вагоны грузоподъемностью до 116 т [15].

На пространстве железных дорог 1 520 мм современное вагоностроение ориентировано на повышение пропускной и провозной способности железных дорог за счет увеличения нагрузок от колеса на рельс до 27...30 тс, увеличения грузоподъемности до 83 т [3, 7, 13]. Коэффици-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ент тары российских грузовых вагонов составляет 0,29...0,34, поэтому при перевозке одной тонны груза по железным дорогам России одновременно перевозится практически вдвое больше металла [3, 9].

По результатам обзора были выбраны модели грузовых вагонов с минимальными значениями коэффициента тары (табл. 1).

Таблица 1

## Характеристики грузовых вагонов

Table 1

## Characteristics of freight cars

| Модель вагона, страна, производитель               | Грузоподъемность, т | Масса тары, т | Объем кузова, м <sup>3</sup> | Осевая нагрузка, т/ось | Коэффициент тары |
|----------------------------------------------------|---------------------|---------------|------------------------------|------------------------|------------------|
| 12-9869, Россия, ТБСЗ                              | 77                  | 23            | 92                           | 25                     | 0,29             |
| 12-9828, Россия, РВЗ                               | 83                  | 24            | 98                           | 27                     | 0,33             |
| 12-197, Россия, УВЗ                                | 74,5                | 25,5          | 92                           | 25,5                   | 0,34             |
| 12-9548-01, Россия, ТБСЗ                           | 83                  | 25            | 108                          | 27                     | 0,30             |
| Greenbrier, США                                    | 98,7                | 31,1          | 86,2                         | 32,5                   | 0,31             |
| 37' MILL GONDOLA, США, American Railcar Industries | 105                 | 24,7          | 70,8                         | 32                     | 0,24             |
| GONDOLA-MILL, Канада, National Steel Car           | 116                 | 24,3          | 76                           | 35                     | 0,21             |
| Hybrid Gon, США, Freight Car America               | 108,1               | 21,79         | 115                          | 32,5                   | 0,20             |
| Beth GonAeroflo, Freight Car America               | 110                 | 18,9          | 110                          | 32                     | 0,17             |

Сравнительная характеристика грузовых вагонов показала, что вагоны Северной Америки имеют в большинстве случаев коэффициент тары ниже, чем вагоны, произведенные в России.

Железнодорожный транспорт относится к металлоемким отраслям, это крупнейший потребитель металлопродукции. Качество конструкционных материалов существенно влияет на надежность, долговечность, массу тары и на другие технико-экономические характеристики вагонов [9].

В работах [2, 11] показана экономическая эффективность от внедрения новых материалов: высокопрочных сталей, коррозионностойких сталей, алюминиевых сплавов, при использовании которых снижается масса тары грузовых вагонов. За рубежом применение высокопрочных материалов при производстве

грузовых вагонов произошло около 15 лет назад. В вагоностроении стран СНГ стали с повышенной прочностью (до 390 МПа) в элементах грузовых вагонов начали использовать при производстве вагонов нового поколения. Основные усиленные узлы [9] – хребтовая балка рамы вагона, листы шкворневых и промежуточных балок рамы полувагонов, вертикальные стойки кузова вагона, листы обечайки и днища котлов вагонов-цистерн, обшивка кузова вагона. Такие решения хотя и позволяют уменьшить массу тары, однако снижение коэффициента тары и у новых вагонов незначительно.

Высокопрочными (машиностроительными, конструкционными) принято считать такие стали, у которых предел прочности после термической обработки выше 1 300 МПа. Основными легирующими элементами в высокопрочных сталях являются: хром, никель, мо-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

либден, кремний. Как известно, с ростом процентного содержания углерода и названных элементов ухудшается свариваемость стали. В работах [4, 9–11, 14] к недостаткам таких сталей относят высокую хрупкость при низких температурах, низкую пластичность, недостаточную усталостную прочность.

На основании обзора сталей, применяемых в машиностроении, были выделены марки сталей (табл. 2), удовлетворяющие требованиям [8].

Таблица 2

**Марки высокопрочных сталей, применяемые в машиностроении**

Table 2

**Grades of high-strength steels used in engineering**

| Марка стали, страна-производитель | Предел текучести, МПа | Относительное удлинение, % | Область применения        |
|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------------|
| 09Г2С, Россия                     | 345                   | 21                         | Сварные конструкции       |
| 16Г2АФ, Россия                    | 440                   | 19                         | Сварные узлы вагонов      |
| 30ХГСА, Россия                    | 835                   | 10                         | Ответственные конструкции |
| Optim 960QC, Финляндия            | 960                   | 7                          | Сварные узлы машин        |
| AR 400, Финляндия                 | 1 000                 | 10                         | «                         |
| AR 500, Финляндия                 | 1 250                 | 8                          | «                         |
| 35ХГСА, Россия                    | 1 275                 | 9                          | Ответственные конструкции |
| 35ХГСН2А, Россия                  | 1 375                 | 9                          | «                         |
| 30Х9Н8М4Г 2С2, Россия             | 1 400                 | 50                         | Высоконагруженные детали  |

Проанализировав характеристики этих сталей и опыт их использования в машинострое-

нии российскими и зарубежными производителями [5], можно заключить следующее:

1) российские марки стали не уступают, а порой и превосходят зарубежные аналоги по механическим характеристикам и вязкости разрушения при минусовой температуре;

2) стали с высокой прочностью, рекомендуемые для изготовления деталей грузовых вагонов, имеют пределы текучести 800...900 МПа, например 30ХГСА и Optim 960QC.

Сталь 30ХГСА изначально предназначалась для авиастроения, но благодаря своим отличным характеристикам нашла более широкое применение. Закалка этой стали проводится в температурном диапазоне 550–650 °С. Термообработка позволяет повысить прочность материала (до значения 2 800 МПа) и его пластичность. Свариваемость хорошая, однако для качественного шва нужно предварительно подогреть металл и медленно охладить его. Сталь отличается невысокой стоимостью, так как легирующие компоненты не дефицитны.

Сталь Optim 960 QC широко используется в Финляндии. По описаниям изготовителя сталь этой марки легко сваривается всеми распространенными способами, как правило, для тонких листов подогрев не требуется. Свойства стали приведены в [12].

Цены на эти стали сравнимы с ценами на стали класса прочности 300...400 МПа [2]. Почему же до сих пор нет новых вагонов с малой тарой, изготовленных из высокопрочных сталей? Можно ли снизить тару вагона, используя высокопрочные стали и проектируя новый вагон согласно действующим нормам и правилам? Попробуем ответить на эти вопросы.

#### **Методика исследования снижения массы конструкций при использовании сталей повышенной прочности**

Для оценки возможности снижения металлоемкости изделий из высокопрочных сталей были рассчитаны показатели прочности, выносливости и устойчивости двутавровой балки минимальной массы (рис. 1), изготовленной из трех марок сталей, две из них – высокопрочные.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

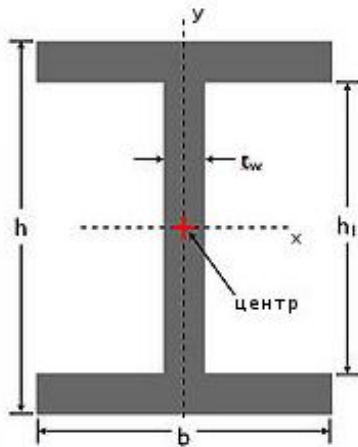


Рис. 1. Двутавровая балка:

$b$  – ширина полки по оси  $x$ ,  $h$  – высота двутавровой балки по оси  $y$ ,  $t_w$  – толщина стенок,  $h_1$  – расстояние между двумя полками

Fig. 1. I-beam

$b$  – flange width along the axis  $x$ ,  $h$  – height of the I-beam on the axis  $y$ ,  $t_w$  – wall thickness,  $h_1$  – distance between the two flanges

Нагрузка  $P$  на балку определялась из условий прочности

$$P = \frac{[\sigma] \cdot 4J_x}{2L_1 \cdot h},$$

где  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение;  $J_x$  – момент инерции;  $L_1$  – расстояние между опорами;  $h$  – высота балки.

Высота балки 186 мм, длина 1 000 мм, толщина листов балки принималась постоянной, но выбиралась исходя из требования по обеспечению различных условий прочности. В качестве эталона принималась балка, изготовленная из стали 09Г2С с моментом инерции 3 016 см<sup>4</sup>.

При статической нагрузке  $P_{cm} = 447$  кН напряжения в этой балке достигают предела текучести.

На первом этапе расчетов были определены такие значения параметров балок, изготовленных из сталей повышенной прочности, чтобы максимальные напряжения в них равнялись пределу текучести.

Характеристики балок, изготовленных из различных сталей, представлены в табл. 3.

Видно, что при действии статической нагрузки масса балки из стали Optim 960 QC уменьшается почти в три раза.

Таблица 3

**Характеристики цельнокатаной балки из условия непревышения напряжений предела текучести**

Table 3

**Characteristics of the all-rolled beam from the condition of non-exertion of the yield stresses**

| Параметр                          | Марка стали |        |              |
|-----------------------------------|-------------|--------|--------------|
|                                   | 09Г2С       | 30ХГСА | Optim 960 QC |
| Предел текучести $\sigma_T$ , МПа | 345         | 835    | 960          |
| Толщина стенки $t_w$ , мм         | 10          | 4      | 3,2          |
| Масса балки, кг                   | 40          | 16     | 13           |

На втором этапе расчетов были определены значения параметров балки из условия равенства максимальных напряжений пределу выносливости. В справочной литературе нет данных о пределах выносливости  $\sigma_{-1}$  гладких стандартных образцов из высокопрочной стали. Поэтому значения напряжения  $\sigma_{-1}$  определялись двумя способами: по формулам, рекомендованным [8]:

$$\sigma_{-1} \approx 0,50\sigma_\sigma$$

и справочником [1]:

$$\sigma_{-1} \approx (0,55 - 0,001\sigma_\sigma)\sigma_\sigma.$$

Предел выносливости балки определялся по формуле

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{\overline{\sigma_{-1}}}{\overline{K_\sigma}}, \quad (1)$$

где  $\overline{K_\sigma} = 1,5$  – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости балки к пределу выносливости гладкого образца.

Величина динамической нагрузки принималась из условия равенства максимального напряжения пределу выносливости балки, изго-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

товленної из стали 09Г2С, а расчетное количество циклов принималось  $1 \cdot 10^7$ . Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблиця 4

**Характеристики балки из условия обеспечения усталостной прочности**

Table 4

**Characteristics of the beam from the condition of providing fatigue strength**

| Параметр                                                                                          | Марка стали |             |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|--------|
|                                                                                                   | 09Г2С       | Optim 960QC | 30ХГСА |
| Предел выносливости, МПа<br>$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{0,5\sigma_s}{1,5}$                   | 150         | 333         | 360    |
| Толщина стенки, мм                                                                                | 10          | 1,4         | 1,3    |
| Масса балки, кг                                                                                   | 40          | 6           | 6      |
| Предел выносливости, МПа<br>$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{(0,5 - 0,001\sigma_s)\sigma_s}{1,5}$ | 151         | 299         | 317    |
| Толщина стенки, мм                                                                                | 10          | 1,6         | 1,5    |
| Масса балки, кг                                                                                   | 40          | 7           | 7      |

Вес балок из высокопрочной стали также оказался существенно меньше, чем балок из стали 09Г2С.

На третьем этапе был сделан расчет на усталость балки с двухсторонним прямым стыковым сварным швом в центральном сечении. Пределы выносливости определялись различными способами: по [8], [6] и [16]. При расчете по [8, табл. 3.2, с. 60]  $\bar{K}_\sigma$  принимался равным 2,4 и определялось напряжение  $\sigma_{-1}$  по формуле (1).

При расчете по [6]:

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{\overline{\sigma_T}}{K_\sigma},$$

где  $\overline{\sigma_T} = 47$  МПа для сталей,  $\overline{K_\sigma} = 2$  (табл. 10, с. 40),  $\overline{\sigma_{a,N}} = 23,5$  МПа.

При расчете по [16, табл. 3.2-1, с. 47] класс

усталости данного сварного соединения  $FAT = 80$  МПа при базе  $N_1 = 2 \cdot 10^6$  циклов с учетом того, что  $FAT$  – размах напряжений. Предел выносливости данного сварного соединения на базе  $N_1 = 10^7$  также составит:

$$\overline{\sigma_{a,N}} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^6 \cdot (FAT)^3}{10^7}} = 23,5 \text{ МПа.}$$

Результаты расчета приведены в табл. 5.

Таблиця 5

**Характеристики балки из условия не превышения напряжений предела выносливости сварного шва**

Table 5

**Characteristics of the beam from the condition that the stress limit of the weld endurance is not exceeded**

| Параметр                               | Марка стали |             |          |
|----------------------------------------|-------------|-------------|----------|
|                                        | 09Г2С       | Optim 960QC | 30ХГСА А |
| Предел выносливости, МПа [8]           | 94          | 175         | 189      |
| Толщина стенки, мм                     | 10          | 5           | 4,6      |
| Масса балки, кг                        | 40          | 20          | 18       |
| Предел выносливости, МПа по [5] и [15] | 23,5        | 23,5        | 23,5     |
| Толщина стенок, мм                     | 45,5        | 45,5        | 45,5     |
| Масса балки, кг                        | ~200        | ~200        | ~200     |

Масса балки из высокопрочных сталей при расчетах по [8] оказалась меньше в два раза. Масса балки при расчете по [6] и [16] увеличилась для всех образцов.

Подводя итог, можно утверждать, что с учетом низких допускаемых напряжений для сварных соединений, рекомендуемых [6], невозможно снизить тару вагонов существующей конструкции, где сварка используется как основной элемент соединения.

Насколько справедливы эти ограничения, может дать ответ только комплекс исследований усталостной прочности опытных образцов сварных соединений из высокопрочных сталей. Кроме того, необходимо разработать конструк-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

тивные решения, которые выводят сварные соединения из зон с высоким уровнем динамических напряжений. В случаях, когда конструктивно решить эту задачу не удастся, предлагается перейти на другие виды соединений: болтовые и болтозаклепочные (резьбовые и вытяжные крепежи типа Lock-bolt, Hack-bolt, MaxLok).

### Научная новизна и практическая значимость

Выявлено, что основным критерием, определяющим массу тары современных вагонов, является усталостная прочность сварного соединения. Показано, что [6] и [16] назначают низкие пределы выносливости высокопрочных сталей и при их соблюдении достичь снижения тары невозможно. Предложено направление действий по поиску путей снижения тары вагонов: экспериментальное уточнение прочности сварных соединений вагонов из высокопрочных материалов; разработка способов повышения выносливости сварных соединений; переход на другие виды соединений.

### Выводы

1. Вагоны колеи 1520 мм существенно уступают по массе тары вагонам, произведенным в Северной Америке с применением высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов, из-за меньших допускаемых напряжений пределов выносливости сварочных соединений.

2. При проектировании вагонов со сварными соединениями снижение массы тары вагонов незначительно. В то же время за рубежом эксплуатируются вагоны с малой тарой. Чтобы обеспечить возможность создания вагонов с уменьшенной тарой, необходимо:

- провести комплекс испытаний типовых сварных соединений из высокопрочных сталей на выносливость и получить статически надежные механические свойства сварных соединений, что позволит оценить реальную возможность снижения металлоемкости вагонных конструкций;
- выбрать способы повышения усталостной прочности сварных соединений;
- разработать новую методику расчета соединений высокопрочных сталей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1993. – 640 с.
2. Битюцкий, А. А. Пути повышения эффективности грузовых вагонов, выпускаемых российскими вагоностроительными предприятиями / А. А. Битюцкий // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 29–33.
3. Бороненко, Ю. П. Стратегические задачи вагоностроителей в развитии тяжеловесного движения / Ю. П. Бороненко // Транспорт Рос. Федерации. – 2013. – № 5 (48). – С. 68–73.
4. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 54 с.
5. Конюхов, А. Д. Высокопрочные стали и сплавы для кузовов грузовых вагонов / А. Д. Конюхов, В. П. Ефимов, К. П. Демин // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 12. – С. 31–34.
6. Махненко, В. И. Совершенствование методов оценки остаточного ресурса сварных соединений конструкций длительного срока эксплуатации / В. И. Махненко // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10/11. – С. 112–121.
7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС России колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 208 с.
8. Общие технические требования к грузовым вагонам нового поколения. – Москва : МПС РФ, 2001. – 25 с.
9. Оценка необратимой повреждаемости при усталости углеродной стали / И. А. Вакуленко, О. М. Перков, М. Кнапински, М. Болотова // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 3 (51). – С. 65–74. doi: 10.15802/stp2014/25822.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

10. Перспективы создания сварных конструкций несущих элементов тележки грузового вагона / О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, И. В. Мирзов, А. Д. Пустовой // Автоматическая сварка. – 2014. – № 3. – С. 36–42.
11. Расчет на усталость сварных соединений несущих элементов тележки грузового вагона / Л. М. Лобанов, О. В. Махненко, Г. Ю. Сапрыкина, А. Д. Пустовой // Автоматическая сварка. – 2014. – № 10. – С. 32–36.
12. Сильвеннойнен, С. Металлопродукция : справ. проектировщика / С. Сильвеннойнен : Раутаруукки. – Otava : Keuruu, 2000. – 317 с.
13. Соколов, А. М. Осева нагрузка 27 тс – новая веха развития вагоностроения / А. М. Соколов, А. М. Орлова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – № 3 (47). – С. 5–7.
14. Хиллов, И. А. Обоснование возможности применения высокопрочных марок сталей в конструкции вагонов, эксплуатируемых на российских железных дорогах / И. А. Хиллов // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 7. – С. 36–39.
15. Barrow, K. Fortescue Railway – лидер тяжеловесного движения : материалы компании Fortescue Metals Group [Электронный ресурс] / K. Barrow // Intern. Railway J. – 2016. – No. 11. – С. 20–24. – Режим доступа: <http://www.railjournal.com/index.php/australia-nz/pilbaras-heavyweight-champion-flexes-its-muscles.html?channel=000>. – Название с экрана. – Проверено : 1.06.2017.
16. Hobbacher, A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components / A. Hobbacher ; IIW International Institute of Welding. – Cham : Springer International Publishing AG, 2016. – 143 p.

Ю. П. БОРОНЕНКО<sup>1\*</sup>, І. О. ФІЛІПОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Петербургський державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Московський просп., 9, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (812) 310 92 10, ел. пошта boron49@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8560-1758

<sup>2\*</sup>АТ Науково-впроваджувальний центр «Вагони», Московський просп., 2, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (812) 310 95 00, ел. пошта filipova.io@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9584-4772

## ВИБІР КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ВАГОНІВ ІЗ МАЛОЮ МАСОЮ ТАРИ

**Мета.** У роботі необхідно виявити причини істотно більшого коефіцієнта тари вагонів колії 1 520 мм у порівнянні з вантажними вагонами Північної Америки та дати рекомендації щодо зниження маси тари вантажних вагонів. **Методика.** В якості методики застосована порівняльна оцінка показників міцності, витривалості та стійкості несучої конструкції мінімальної маси, виготовленої з різних матеріалів за діючими на «просторі 1 520» нормативами. **Результати.** Авторами встановлено, що при використанні високоміцних сталей масу виробу можна знизити в п'ять разів у порівнянні з балкою зі сталі 09Г2С. Якщо ж у конструкції є зварне з'єднання, то маса конструкції збільшиться приблизно в 2 рази при розрахунку за «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС России колес 1 520 мм (несамоходных)». А при розрахунках по ГОСТ 33211-2013 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам» маса збільшується майже в 5 разів та не залежить від типу сталі. **Наукова новизна.** Виявлено, що основним критерієм, що визначає масу тари сучасних вагонів, є втомна міцність зварного з'єднання. Показано, що ГОСТ 33211-2013 та рекомендації Міжнародного інституту зварювання призначають низькі межі витривалості високоміцних сталей, та при їх дотриманні досягти зниження тари неможливо. **Практична значимість.** Розроблено напрямки дій зі зниження тари вагонів: експериментально уточнені умови міцності зварних з'єднань вагонів із високоміцних матеріалів; розроблені способи підвищення витривалості зварних з'єднань; запропоновано інші види з'єднань.

*Ключові слова:* тара вагону; високоміцна сталь; зварні конструкції; вантажний вагон; міцність

Y. P. BORONENKO<sup>1\*</sup>, I. O. FILIPPOVA<sup>2\*</sup><sup>1\*</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Moskovskiy Av., 9, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (812) 310 9210, e-mail boron49@yandex.ru, ORCID 0000-0002-8560-1758<sup>2\*</sup>JSC Scientific and Innovation Center «Cars», Moskovskiy Av., 2, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (812) 310 95 00, e-mail filippova.io@yandex.ru, ORCID 0000-0001-9584-4772

## SELECTION OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF CAR ELEMENTS WITH SMALL EMPTY WEIGHT

**Purpose.** The work is aimed to identify the reasons for the significantly higher coefficient of the empty weight of 1520 mm gauge cars in comparison with the freight cars in North America and to give recommendations for reducing the empty weight of freight cars. **Methodology.** As a methodology, a comparative evaluation of the strength, durability and stability of the minimum weight bearing structure made of various materials using the "space 1520" standards is applied. **Findings.** The authors found that with the use of high-strength steels the product weight can be reduced by a factor of five in comparison with the beam of steel 09G2S. If there is a welded joint in the construction, the weight of the structure will increase approximately by 2 times when calculated according to the "Norms for calculating and designing railroad cars of the Ministry of Railways of Russia, gauge 1520 mm (non-self-propelled)". And during calculations according to State Standard 33211-2013 "Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities" the weight increases almost 5 times and does not depend on the type of steel. **Originality.** It is revealed that the main criterion determining the empty weight of modern cars is the fatigue strength of the welded joint. It is shown that State Standard 33211-2013 and "Recommendations of the International Welding Institute" designate low endurance limits for high-strength steels and it is impossible to achieve the weight reduction if one adheres these recommendations. **Practical value.** The direction of actions to find the ways reducing empty weight of cars was developed: conditions for strength of welded joints of cars made of high-strength materials have been experimentally refined; methods for increasing the endurance of welded joints were developed; other types of connections are assumed.

**Key words:** car weight; high-strength steel; welded constructions; freight car; strength

### REFERENCES

1. Birger, I. A., Shorr, B. F., & Iosilevich, G. B. (1993). *Raschet na prochnost detaley mashin: spravochnik* (4th ed.). Moscow: Mashinostroeniye.
2. Bityutskiy, A. A. (2008). Puti povysheniya effektivnosti gruzovykh vagonov, vypuskaemykh rossiyskimi vagonostroitelnyimi predpriyatiyami. *Tyazheloye mashinostroeniye*, 2, 29-33.
3. Boronenko, Y. V. (2013). Car-builders' strategic tasks in development of heavy-weight rail traffic. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 5(48), 68-73.
4. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities, GOST 33211-2014 (2014).
5. Konyukhov, A. D., Yefimov, V. P., & Demin, K. P. (2006). Vysokoprochnyye stali i splavy dlya kuzovov gruzovykh vagonov. *Tyazheloye mashinostroeniye*, 12, 31-34.
6. Makhnenko V. I. (2003). Improvement of methods for evaluating residual life of welded joints in durable structures. *Avtomaticheskaya Svarka*, 10/11, 112-121.
7. All-Soviet Union Research Institute of Railway Transport. (1996). *Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh)*. Moscow: GosNIIV-VNIIZhT.
8. Ministry of Railways of the Russian Federation. (2001). *Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya k gruzovym vagonam novogo pokoleniya*. Moscow: MPS RF.
9. Vakulenko, I. O., Perkov, O. N., Knapinski, M., & Bolotova, D. M. (2014). Estimation of irreversible damage-ability at fatigue of carbon steel. *Science and Transport Progress*, 3(51), 65-74. doi: 10.15802/stp2014/25822
10. Makhnenko, O. V., Saprykina, G. Y., Mirzov, I. V., & Pustovoj, A. D. (2014). Prospects for development of load-carrying elements of freight car bogie. *The Paton Welding Journal*, 3, 33-38. doi 10.15407/tpwj2014.03.06
11. Lobanov, L. M., Makhnenko, O. V., Saprykina, G. Y., & Pustovoj, A. D. (2014). Fatigue calculation for welded joints of bearing elements of freight car bogie. *The Paton Welding Journal*, 10, 30-34. doi: 10.15407/tpwj2014.10.06
12. Silvennoynen, S. (2000). *Rautaruukki. Metalloproduktisiya: spravochnik proektirovshchika*. Otava: Keuruu.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

13. Sokolov, A. M., Orlova, A. M. (2016). Osewaya nagruzka 27 ts – novaya vekha razvitiya vagonostroeniya. *Vagony i vagonnoye khozyaystvo*, 3(47), 5-7.
14. Khilov, I. A. (2010). Obosnovaniye vozmozhnosti primeneniya vysokoprochnykh marok staley v konstruktssii vagonov, ekspluatiruemykh na rossiyskikh zheleznykh dorogakh. *Tyazheloye mashinostroeniye*, 7, 36-39.
15. Barrow, K. (2015). Pilbara's heavyweight champion flexes its muscles. *International Railway Journal*, 11, 20-24. Retrieved from <http://www.railjournal.com/index.php/australia-nz/pilbaras-heavyweight-champion-flexes-its-muscles.html?channel=000>
16. Hobbacher, A. (2016). *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Springer International Publishing. doi 10.1007/978-3-319-23757-2

*Статья рекомендована к публикации научным комитетом XIV Международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта. Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение»*

Поступила в редколлегию: 30.05.2016

Принята к печати: 01.03.2017

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.42.027.2

С. В. МЯМЛИН<sup>1</sup>, О. ЛУНИС<sup>2</sup>, Л. А. НЕДУЖАЯ<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел./факс. +38 (056) 776 85 65, эл. почта sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2</sup>Каф. «Железнодорожный транспорт», Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, ул. Й. Басанавичуса, 28, Вильнюс, Литва, LT-03224, эл. почта o.lunys2010@gmail.com.lt, ORCID 0000-0002-9395-9178

<sup>3\*</sup>Каф. «Теоретическая и строительная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел./факс + 38 (056) 373 15 11, эл. почта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Цель.** Для определения динамических качеств магистральных локомотивов, которые характеризуют безопасное движение по прямолинейным и криволинейным участкам пути во всем диапазоне эксплуатационных скоростей, необходимо выполнение целого комплекса исследований. Одним из необходимых условий качественного улучшения тягового подвижного состава железных дорог является определение параметров его ходовых частей. Среди вопросов, связанных с этой проблемой, важное место занимает задача определения динамических качеств локомотивов на стадии проектирования с учетом выбранных технических решений в конструкции ходовых частей. При этом особое внимание уделяется связям кузова с тележкой, в частности, посредством наклонных тяг. **Методика.** Математическое моделирование проводится методом численного интегрирования уравнений математической модели пространственных колебаний локомотива для определения динамической нагруженности магистрального локомотива с использованием программного комплекса «Dynamics of Rail Vehicles» («DYNRAIL»). **Результаты.** Из результатов исследований следует, что для создания простой и надежной конструкции ходовых частей, позволяющей снизить расходы на обслуживание и ремонт, иметь низкую первоначальную стоимость и эксплуатационные расходы в расчете на весь жизненный цикл, высокую силу тяги при трогании, максимально приближенную к предельной по сцеплению, возможность работы в режиме кратной тяги, от конструкторов и ученых требуется реализация научных и технических решений. **Научная новизна.** По итогам исследования авторами сформированы общая классификация связей кузова с тележкой и общая классификация конструкций наклонной тяги локомотивов. **Практическая значимость.** При совершенствовании конструкций подвижного состава актуальным является обобщение результатов теоретических, научно-методических, экспериментальных исследований, направленных на дальнейшее улучшение ходовых частей магистральных локомотивов перспективных конструкций. Проведенные авторами исследования относительно усовершенствования конструктивных особенностей элементов ходовых частей некоторых типов современных магистральных локомотивов имеют практическую ценность и могут быть использованы при разработках тягового подвижного состава.

*Ключевые слова:* магистральный локомотив; конструкция ходовых частей; тележка; наклонная тяга

Авторы относят себя к ученикам научного направления профессора Виктора Даниловича Дановича. Данный материал посвящается светлой памяти нашего Учителя. Это одна из многих научных тем [1], которыми занимался Виктор Данилович. Его всегда выделяли такие качества как мудрость, обаяние, благородство, интеллект. Надеемся, тот, кто прочитает статью, не останется равнодушным – проявит интерес и к жизненному пути великого Ученого [Серия «Профессора ДИИТа» – Данович Виктор Данилович (2006 г.)].

### Введение

Одной из важных задач развития железнодорожного транспорта является повышение производительности тягового подвижного состава за счет применения в современном локомотивостроении новейших научно-технических достижений, что должно обеспечить повышение конструкционной скорости с одновременным улучшением его тяговых, тормозных и динамических качеств, повысить надежность работы единиц техники и безопасность движения [8, 19, 20, 21]. Это ведет к снижению затрат с

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

учетом жизненного цикла локомотива, совершенствованию обслуживания и ремонта, повышению уровня комфорта для машинистов и пассажиров, улучшению наружного дизайна, уменьшению воздействия на окружающую среду (шума и загрязнения атмосферы вредными составляющими выхлопных газов) [7].

Одним из способов улучшения высоких тяговых и динамических качеств локомотива является выбор связей с оптимальными силовыми характеристиками в конструкции ходовой части, что позволит снизить металлоемкость, достичь унификации основных узлов и деталей на локомотивах различного назначения, способствует снижению затрат на изготовление, эксплуатацию и ремонт.

### Цель

Для определения динамических качеств магистральных локомотивов, которые характеризуют безопасное движение по прямолинейным и криволинейным участкам пути во всем диапазоне эксплуатационных скоростей, необходимо выполнение целого комплекса исследований [8, 4, 23–25].

Одним из необходимых условий качественного улучшения тягового подвижного состава железных дорог является определение физикомеханических параметров его ходовых частей. Среди вопросов, связанных с этой проблемой, важное место занимает задача определения динамических качеств локомотивов на стадии проектирования с учетом выбранных технических решений по конструкции ходовых частей. При этом особое внимание следует уделять связям кузова с тележкой, в частности, посредством наклонных тяг для передачи продольных горизонтальных сил.

Механические связи тележек с кузовом выполняют ряд функций, среди которых – передача вертикальной нагрузки от кузова на тележки; передача горизонтальных сил между кузовом и тележками; обеспечение упруго-диссипативных характеристик поперечной связи кузова и тележек, демпфирующего и восстанавливающего моментов при повороте тележек относительно кузова [2]. Характеристики связи кузова с тележками формируют такие важнейшие динамические процессы экипажа как: устойчивость к возмущенному движению на пря-

мых участках пути, воздействие на путь на кривых участках, склонность к развитию автоколебаний.

### Методика

Теоретические исследования выполнены с использованием математического моделирования динамической нагруженности магистрального локомотива на программном комплексе «Dynamics of Rail Vehicles» («DYNRAIL»), разработанным в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна [4, 23–25].

Для рассмотрения процесса взаимодействия экипажа и пути в поперечном направлении (рис. 1) можно использовать упрощенную расчетную схему и математическую модель системы с одной массой, считая, что основная масса экипажа сосредоточена в центре тяжести кузова. Вследствие выбора боковых зазоров между гребнем бандажа и рельсом (независимо от вызвавших это причин) колесной паре со стороны пути навязывается траектория  $y_n(x)$ . При жесткой связи неподрессоренных в поперечном направлении частей (колесной пары, рамы тележки) с основной массой экипажа – кузовом – эта навязанная траектория задается и кузову (рис. 1, а) [8].

Устранение жесткой связи и замена ее квазиупругой (рис. 1, б) приводит к снижению силы поперечного взаимодействия с железнодорожным путем. Возможен и промежуточный вариант – снижение инерционной связи путем предоставления кузову возможности поворота относительно оси  $x$  (рис. 1, в). Современные системы связи кузова с тележкой представляют собой комбинации различных схем рис. 1, б и рис. 1, в. Такие связи рассмотрены в [8].

Соединение кузова с тележкой может быть реализовано различными способами, например, условно покажем плоскости кузова и тележки, которые между собой должны быть связаны по 6-ти координатам (рис. 2). Связь по координате  $x$  (продольная) показана как жесткий стержень, в этой координате передающий силы тяги и торможения от тележки к кузову (силы вдоль пути). Связи в координатах  $y$  (боковая) и  $z$  (вертикальная) показаны в виде упругих элементов. Координаты, характеризующие углы

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

поворота кузова относительно соответствующих осей обозначены как  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$  [17].

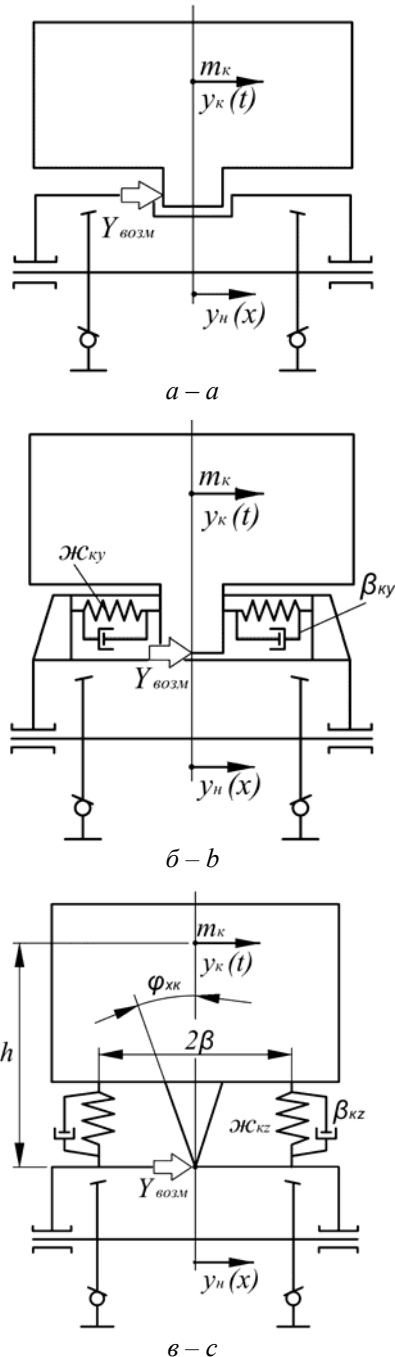


Рис. 1. Схема с поперечной связью кузова и тележки:  
а – жесткой; б – квазиупругой;  
в – упругой и поперечно-угловой

Fig. 1. Diagram with cross connection of the body and a bogie:  
а – rigid; б – quasi-elastic; в – elastic and transverse-angular

Возможны следующие варианты применения:  
1) многоцелевое использование одного и того же элемента для осуществления связей в нескольких координатах;  
2) выделение для связей в каждой из координат отдельного устройства, обладающего оптимальными для данного конкретного случая характеристиками;  
3) комбинация двух первых вариантов с преобладанием одного или другого, в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к подвижному составу.

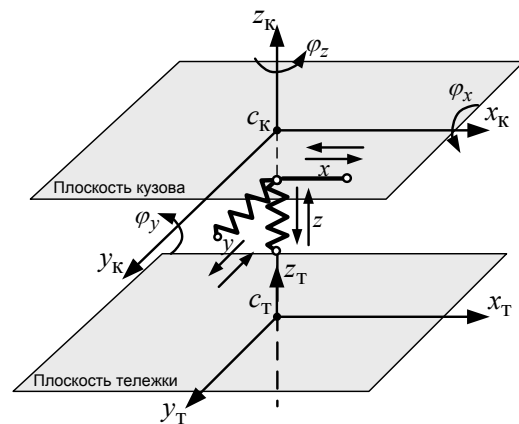


Рис. 2. Связи кузова с тележкой в различных координатах

Fig. 2. Body-bogie connections in various coordinates

## Результаты

Среди распространенных в практике основных схем опирания рамы (и всего надтележного строения) на тележки были выделены следующие конструктивные решения [16]:

1. Рама опирается на каждую тележку одной опорой – цилиндрической пятой, входящей в подпятник тележки (рис. 3, а). Пята с подпятником образуют шкворневое соединение, являющееся осью поворота тележки относительно рамы в горизонтальной плоскости.

Для предотвращения недопустимых перекосов кузова и, следовательно, неравномерного распределения нагрузок в шкворневом узле, по этой схеме на каждой тележке устанавливаются дополнительные боковые ограничители – скользуны, допускающие лишь незначительные отклонения кузова от вертикального положения. И вертикальная нагрузка, и горизонтальные силы передаются через данный узел.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2. Рама соединяется с тележкой при помощи шкворневого соединения, но опирается на нее через боковые опоры, расположенные симметрично относительно шкворня (рис. 3, б).

3. Вертикальная нагрузка от рамы передается на каждую тележку через две–четыре боковые опоры при фактическом отсутствии шкворневого узла, оказывается возможным обеспечить центрирование тележки при помощи так называемого фиктивного шкворня, роль которого выполняет система коротких горизонтальных поводков, передающая продольные горизонтальные силы (рис. 3, в).

4. Рама опирается на раму тележки через две главные вертикальные маятниковые опоры – качающиеся стойки, расположенные на ее продольной оси (рис. 3, г). Эти опоры передают и продольные горизонтальные силы, и половину вертикальной нагрузки. Вертикальные нагрузки (вторая половина веса надтележечного строения) воспринимаются также четырьмя боковыми вертикальными стойками. Возможность поворота тележек обеспечивается отклонением главных опор от вертикальной оси (рис. 3, д). Горизонтальные упругие тяги способствуют передаче поперечных сил и возвращению тележки в исходное положение.

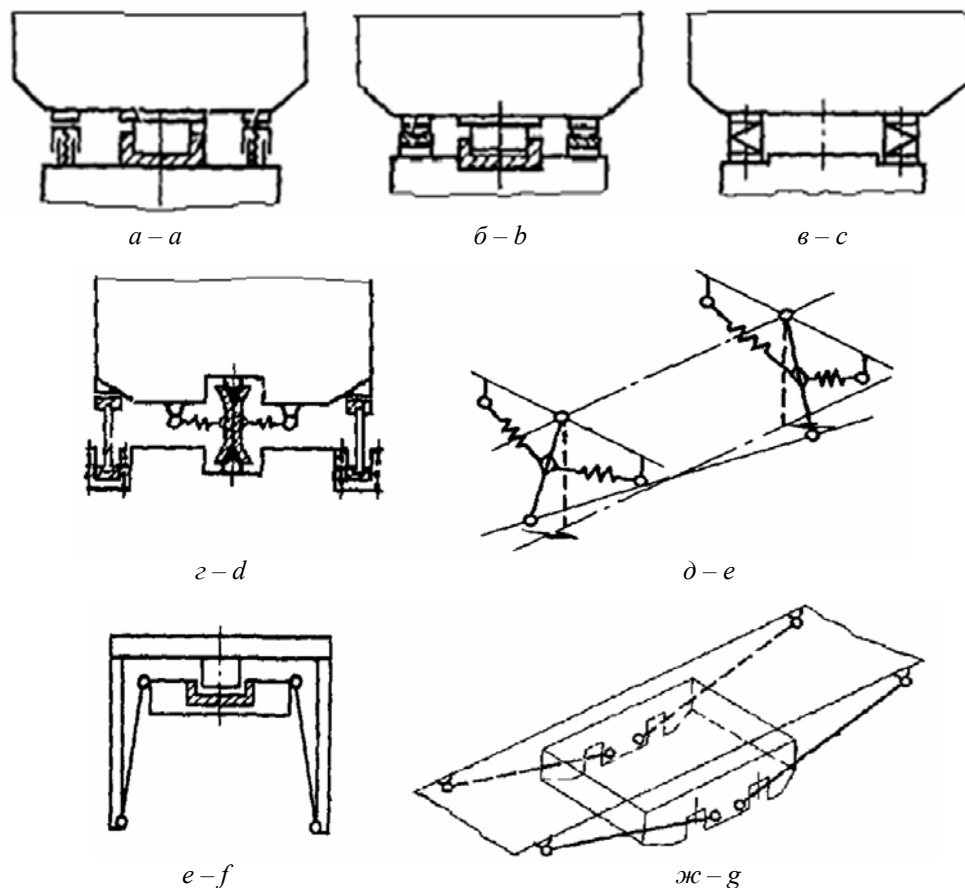


Рис. 3. Схемы связей рамы локомотива с тележками

Fig. 3. Diagrams of the connections of the locomotive frame with bogies

5. Боковые упругие опоры выполнены в виде комплекта высоких пружин, закрепленных соответственно своими концами в рамах локомотива и тележки. Горизонтальные силы в этом случае передаются низко опущенным шкворнем.

6. Рама локомотива при наличии шкворня, являющегося осью поворота и передающего

горизонтальные силы, своими кронштейнами (рис. 3, е) крепится к раме каждой тележки четырьмя боковыми маятниковыми подвесками. Оси наклонных подвесок пересекаются на оси шкворня.

В конструкциях, где продольные горизонтальные силы передаются через систему длин-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ных наклонных тяг, которые соединяют раму с тележкой так, что точка пересечения их осей находится на уровне ниже центров ведущих осей (рис. 3, ж) [16], такое соединение способствует лучшему использованию сцепного веса локомотива (одна из важнейших характеристик его эксплуатационных качеств), упрощается конструкция тележки, исключается значительное число элементов трения и др.

Наклонные тяги были впервые применены на электровозе Sr1 [15]. На Новочеркасском электровазостроительном заводе в свое время изготовили опытный четырехосный электровоз, получивший обозначение Sr1-3000; в некоторых технических документах и в периодической печати этот локомотив первоначально имел обозначение серии ЭС40 [13] и был предназначен для железных дорог Финляндии. Есть сведения, что буквы Sr в обозначении серии возникли от финских слов *Sahkoventuri raskas*, т.е. «электровоз тяжелый».

Кузов электровоза был изготовлен из профильной и листовой стали, имел несущую раму и опирался на две двухосные несочлененные тележки (рис. 4). Подвеска тяговых двигателей – опорно-рамная, подвешивание кузова – люлечное. Тяговое и тормозное усилия от тележек к кузову передавались через наклонные тяги.

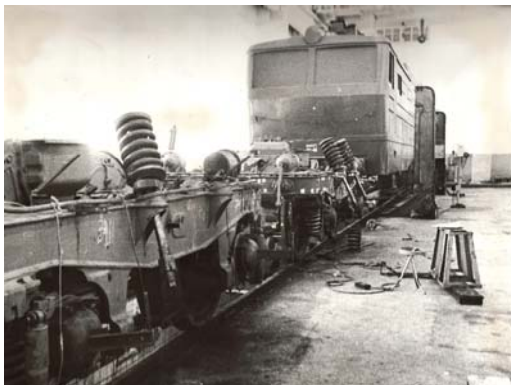


Рис. 4. Общий вид тележки электровоза Sr1

Fig. 4. General view of the bogie of electric locomotive Sr1

Впоследствии наклонные тяги стали внедряться и на других единицах тягового подвижного состава. Далее более подробно рассмотрим конструктивные особенности ходовых частей тягового подвижного состава ведущих в мире компаний-изготовителей железнодорожной про-

дукции (рис. 5) [25], использовавших наклонную тягу в узле соединения кузова с тележками.

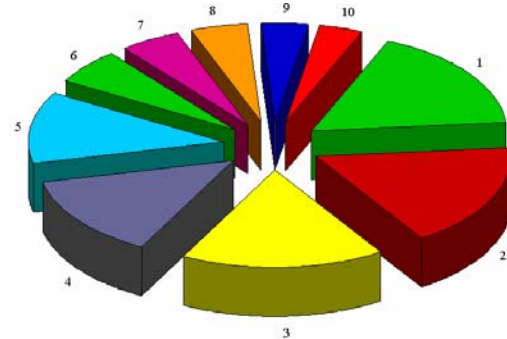


Рис. 5. Крупнейшие компании-изготовители локомотивов:

1 – CSR (Китай), 8,1 млрд евро; 2 – Bombardier (Канада, Германия), 8,1 млрд евро; 3 – CNR (Китай), 7,9 млрд евро; 4 – Siemens (Германия), 6,4 млрд евро; 5 – Alstom (Франция), 5,6 млрд евро; 6 – GE (США), 2,7 млрд евро; 7 – Трансмаш-холдинг (Россия), 2,4 млрд евро; 8 – Knorr Bremse (Германия), 2,2 млрд евро; 9 – Hyundai Rotem (Республика Корея), 1,8 млрд евро; 10 – Kawasaki (Япония), 1,7 млрд евро

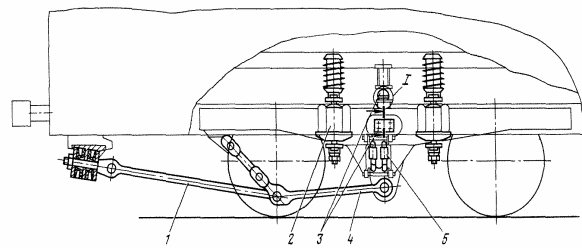
Fig. 5. Largest manufacturers of locomotives:  
1 – CSR (China), 8.1 billion Euros; 2 – Bombardier (Canada, Germany), 8.1 billion Euros; 3 – CNR (China), 7.9 billion Euros; 4 – Siemens (Germany), 6.4 billion Euros; 5 – Alstom (France), 5.6 billion Euros; 6 – GE (USA), 2.7 billion Euros; 7 – Transmash-Holding (Russia), 2.4 billion Euros; 8 – Knorr Bremse (Germany), 2.2 billion Euros; 9 – Hyundai Rotem (Republic of Korea), 1.8 billion Euros; 10 – Kawasaki (Japan), 1.7 billion Euros

Сюда относятся ниже описанные электровозы:

– **Электровоз ВЛ85** – один из мощных грузовых магистральных электровозов своего времени с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей, двухсекционный, двенадцатиосевой, с устройствами, которые обеспечивают работу по системе многих единиц [8, 18, 4, 23].

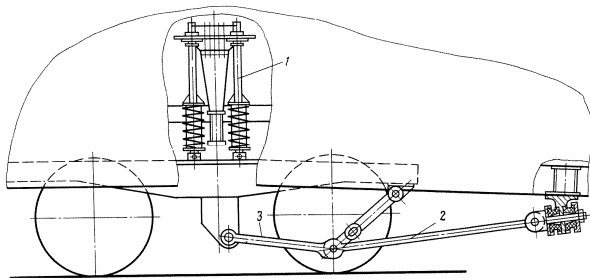
Каждая секция опирается на три двухосные бесшкворневые тележки, которые отличаются друг от друга исполнением: крайние имеют опоры кузова в виде люлечных подвесок (рис. 6, а), средняя – опоры кузова в виде упругих качающихся стержней (рис. 6, б). Таким образом, вертикальная и поперечная связи кузова с тележками осуществлены: на крайних тележках – посредством элементов люлечного подвешивания, на средних – комплектом упругих качающихся сжатых стержней. Продольная связь тележек с кузовом выполнена наклонными тягами двустороннего действия, работающими на растяжение – сжатие [11, 4, 23].

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*a – a*

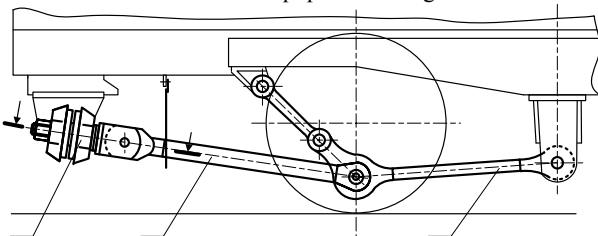
1 – наклонная тяга; 2 – люльечное подвешивание;  
3 – упоры; 4 – тяговое устройство тележек;  
5 – установка гасителей колебаний

1 – inclined rod; 2 – swing suspension; 3 – chocks; 4 – traction device for bogies; 5 – installation of vibration dampers

*б – б*

1 – опора кузова; 2 – наклонная тяга;  
3 – тяговое устройство тележек

1 – body support; 2 – inclined rod;  
3 – traction equipment of bogie

*в – в*

1 – тяговое устройство; 2 – наклонная тяга; 3 – буферное устройство

1 – traction device; 2 – inclined rod; 3 – buffer device

Рис. 6. Ходовая часть электропоезда ВЛ85:

*a* – связи кузова с крайними тележками; *б* – связи кузова со средней тележкой; *в* – узел наклонных тяг

Fig. 6. Running gear of electric locomotive VL85:

*a* – body connections with the outer bogies; *б* – body connection with the middle bogie; *в* – the inclined rod assembly

Узел наклонной тяги состоит из тягового устройства, наклонной тяги и буферного устройства (рис. 6, в). Тяговое устройство тележек

является жестким продолжением рамы тележки, предназначенным для выноса точки присоединения наклонной тяги к раме тележки таким образом, чтобы ось тяги проходила через точку пересечения вертикальной оси симметрии тележки и рельсов. Буферное устройство предназначено для упругой связи наклонной тяги с кронштейном кузова электропоезда [8, 18].

На электропоездах ВЛ85 с № 013 на крайних и средних тележках приходится по одной тяге на тележку. Для полного использования сцепного веса – первой секции – наклонная тяга средней тележки направлена в сторону второго конца секции.

– **Электропоезд серии ДС** был создан в сотрудничестве с концерном Siemens на Днепропетровском электропоездостроительном заводе (ДЭВЗ) при участии целого ряда научных и производственных организаций, в том числе и Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДИИТ) [23–25].

Его ходовые части (рис. 7) выполнены двухосными бесшкворневыми несочлененными, с опорно-рамным подвешиванием тяговых электродвигателей [8, 14, 23–25]. Для передачи продольных сил тяги (торможения) между каждой тележкой и кузовом установлена наклонная тяга (рис. 8, а), шарнирно соединенная с тяговым устройством тележки и с равноплечим балансирам, концы которого связаны со стержнями [14]. Соединение наклонной тяги с тележкой и балансира со стержнями выполнено с помощью шарнирных подшипников (рис. 8, б).

– **Ходовая часть тепловоза ТЭМ7** состоит из двух двухосных бесчелюстных тележек, объединенных промежуточной рамой, которая соединена с рамой каждой двухосной тележки двумя маятниковыми подвесками со сферическими шарнирами механизма передачи силы тяги [2].

Продольно-горизонтальные силы (сила тяги и торможения) от двухосных тележек действуют на промежуточную раму через шарнирно-рычажный тяговый механизм (рис. 9, а). Сила тяги от внутренней концевой балки рамы тележки передается на двуплечие рычаги, соединенные между собой поперечной тягой. Наклонные тяги передают силу тяги от рычагов к промежуточной раме и затем через шаровый шкворень к кузову.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

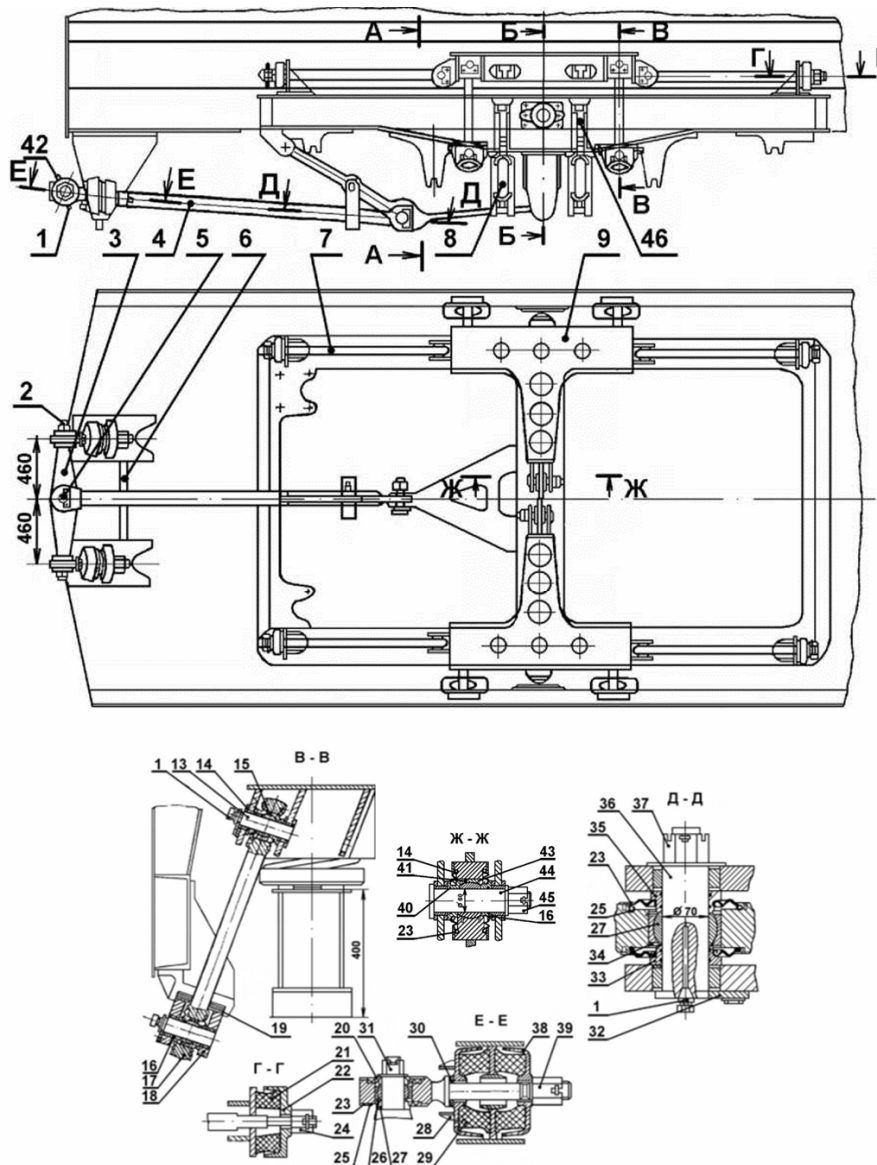


Рис. 7. Расположение связей между кузовом и тележками в электровозе серии ДС:

1 – масленка; 2 – стержень; 3 – баланси́р; 4 – наклонная тяга; 5 – валик; 6 – страховочное устройство; 7 – реактивная тяга; 8 – гидроамортизатор; 9 – промежуточная балка; 10 – боковой упор; 11 – комплект пружин; 12 – технологический болт; 13 – валик; 14 – уплотнение; 15 – подшипник ШСП155; 16 – втулка; 17 – подвеска; 18 – кронштейн; 19 – прокладка; 20 – втулка; 21 – шайба; 22 – шайба; 24 – гайка; 25 – уплотнение; 26 – втулка; 27 – подшипник 1ШСЛ70; 28 – упор; 29 – шайба; 30 – регулировочная шайба; 31 – гайка; 32 – стопорная планка; 33 – уплотнительное кольцо; 34 – кольцо; 35 – втулка; 36 – валик; 37 – гайка; 38 – шайба; 39 – гайка; 40 – уплотнительное кольцо; 41 – подшипник GE60UK-2RS; 42 – пробка; 43 – стопорная шайба подшипника; 44 – валик; 45 – гайка; 46 – технологическая стяжка

Fig. 7. Links location between the body and bogies in the locomotive, DS series:

1 – lubricating cock; 2 – pivot; 3 – compensating beam; 4 – inclined rod; 5 – roller; 6 – safety device; 7 – torque rod; 8 – hydraulic shock-absorber; 9 – intermediate beam; 10 – side chock; 11 – set of springs; 12 – technological bolt; 13 – roller; 14 – compaction; 15 – bearing SHSP155; 16 – sleeve joint; 17 – suspension; 18 – bracket; 19 – lining; 20 – sleeve joint; 21 – washer plate; 22 – washer plate; 24 – nut; 25 – compaction; 26 – sleeve joint; 27 – bearing 1SHSL70; 28 – chock; 29 – washer plate; 30 – adjusting washer; 31 – nut; 32 – keeper plate; 33 – O-ring; 34 – ring; 35 – sleeve joint; 36 – roller; 37 – nut; 38 – washer plate; 39 – nut; 40 – O-ring; 41 – bearing GE60UK-2RS; 42 – closing plug; 43 – bearing lockwasher; 44 – roller; 45 – nut; 46 – technological screed

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*a – a**б – б*

Рис. 8. Ходовая часть электровоза ДС:

*a* – общий вид наклонной тяги; *б* – расположение и соединение наклонной тяги под локомотивом

Fig. 8. Running part of DS locomotive:

*a* – general view of the inclined rod; *b* – location and connection of the inclined rod under the locomotive

Наклонные тяги механизма присоединены к промежуточной раме на уровне осей колесных пар, причем оси тяг пересекаются на уровне головок рельсов посередине базы двухосной тележки, благодаря чему достигаются одинаправленность и одинаковое перераспределение нагрузок в пределах каждой двухосной тележки.

Механизм состоит из двух узлов, каждый из которых включает наклонную тягу и поворотный кронштейн (рис. 9, б). Тяга шарнирно соединяется с промежуточной рамой и поворот-

ным кронштейном, вращающимся вокруг оси, укрепленной на раме тележки. Поворотные кронштейны каждой двухосной тележки шарнирно связаны поперечной тягой [12]. Наклонное расположение механизма выбрано в целях реализации ходовой частью наибольшего коэффициента использования сцепного веса тепловоза. Механизм представляет собой рычажную систему, которая, передавая усилия, в то же время позволяет двухосной тележке совершать все необходимые перемещения относительно промежуточной рамы при движении.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

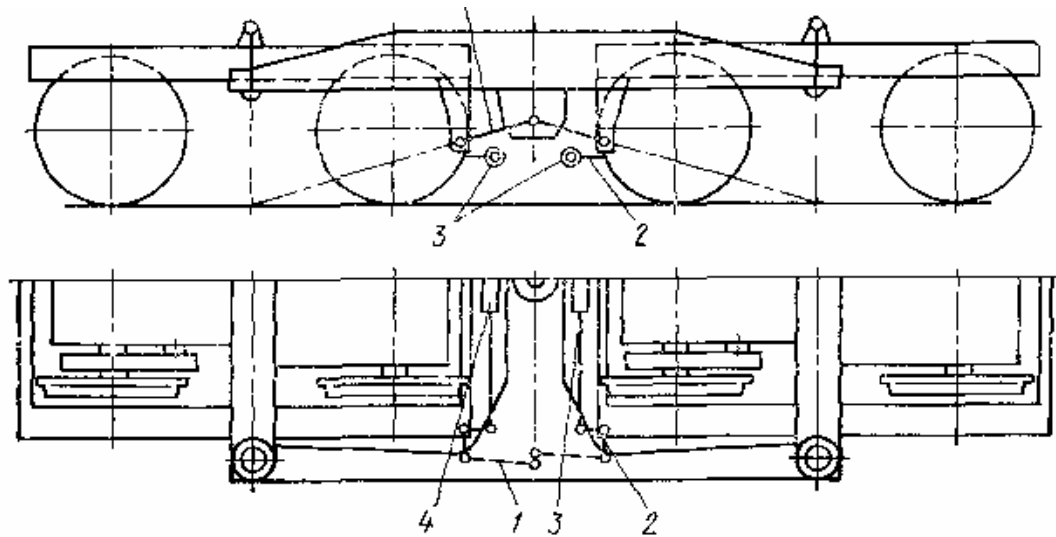
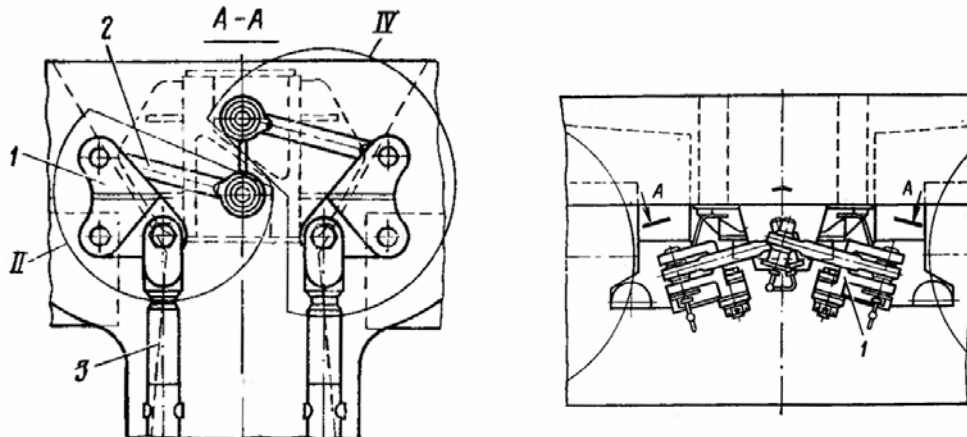
*a – a**1* – наклонная тяга; *2* – двуплечий рычаг; *3* – поперечная тяга; *4* – амортизатор*1* – inclined rod; *2* – two-arm lever; *3* – bridle bar; *4* – shock absorber*б – б**1* – поворотный кронштейн; *2* – наклонная тяга; *3* – поперечная тяга*1* – swinging arm; *2* – inclined rod; *3* – bridle bar

Рис. 9. Механизм передачи силы тяги тепловоза ТЭМ7:

*a* – схема; *б* – *I, II, III, IV* – узлы механизма

Fig. 9. The mechanism of transmission of traction power of the locomotive TEM7:

*a* – scheme; *b* – *I, II, III, IV* – nodes of the mechanism

– **Магистральный шестиосный электро-воз ЭП10** с опорно-рамным подвешиванием тяговых двигателей, системой связей тележек с кузовом, с двухступенчатым рессорным подвешиванием [8, 23]. Тележки двухосные, бесчелюстные. В продольном направлении тележки с кузовом соединены цельной, низко располо-

женной тягой (рис. 10). Исключение промежуточных звеньев системы продольной связи и установка цельной связи стали возможными после применения бесколлекторных тяговых двигателей, имеющих при большей мощности значительно меньший диаметр.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

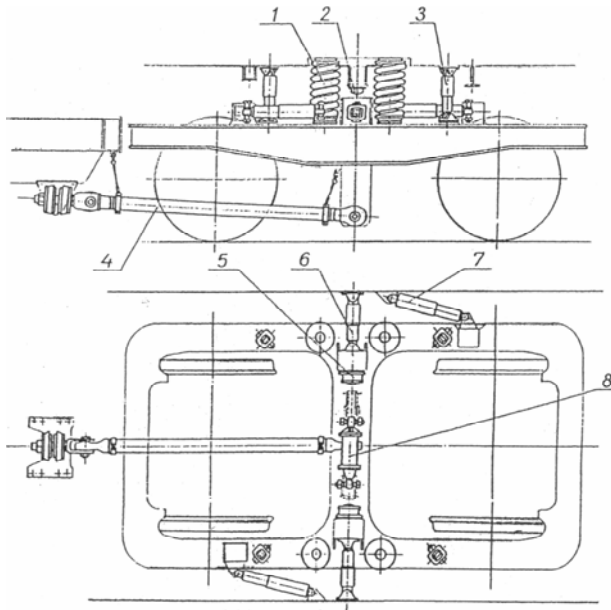


Рис. 10. Система связей кузова с крайней тележкой: 1 – опора кузова; 2, 5 – вертикальный и горизонтальный упоры; 3, 6, 7 – гидродемпферы; 4 – тяга продольной связи тележки с кузовом; 8 – противоотное устройство

Fig. 10. System of connections of the body with an outer bogie:

1 – the body support; 2, 5 – vertical and horizontal chocks; 3, 6, 7 – hydraulic dampers; 4 – rod of longitudinal communication of the bogie with a body; 8 – anti-drifting device

– **Тележка магистрального шестиосного пассажирского электровоза ЭП2К** трехосная с опорно-рамным подвешиванием тяговых двигателей и осевых редукторов. Сила тяги, создаваемая колесно-моторными блоками, через буксовые поводки передается от колесных пар на раму тележки, а от рамы тележки через механизм передачи силы тяги – на кузов электровоза. Механизм передачи силы тяги (рис. 11 а) является отличительной особенностью экипажа электровоза ЭП2К – он состоит из двух шкворней, которые установлены за габаритами тележки симметрично относительно продольной оси тележки и консольно закреплены на кузове; двух продольных тяг, расположенных горизонтально; поперечной тяги и двух двуплечих рычагов [8, 11].

Рычаги, установленные на шкворнях, имеют продольные и поперечные плечи. Продольные части рычагов шарнирно связаны между собой поперечной тягой, а поперечные при помощи сферических шарниров связаны с продольными

тягами. Вторыми концами продольные тяги при помощи сферических шарниров – с рамой тележки. При движении электровоза происходят вертикальные, поперечные и небольшие угловые перемещения тележки относительно кузова. Конструкция механизма позволяет практически беспрепятственно совершать все эти перемещения, но создает жесткую связь между кузовом и тележкой в продольном направлении, необходимую для передачи сил тяги и торможения. Для уменьшения динамических нагрузок в механизме продольные тяги расположены горизонтально на уровне центра масс обрессоренной части тележки [8, 9].

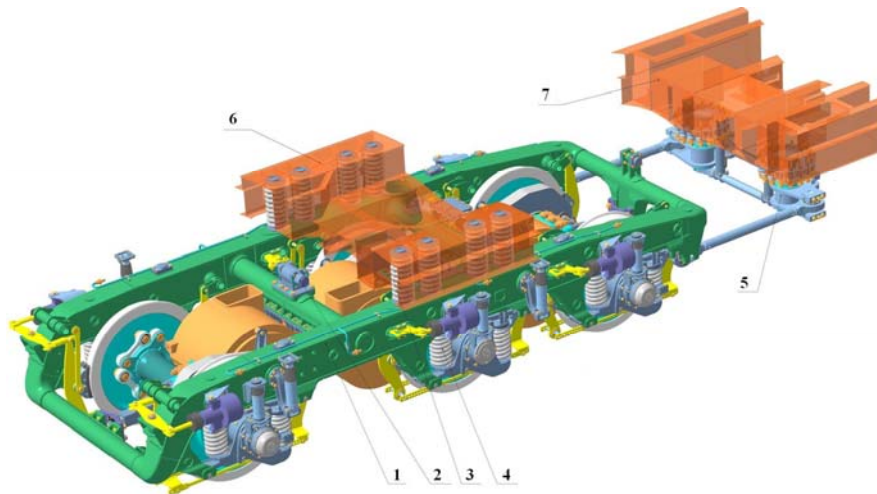
– **Механическая часть магистрального пассажирского электровоза ЭП20** состоит из кузова и трех двухосных бесшкворневых тележек (рис. 11, б). Вертикальная и поперечная связи кузова с тележками осуществлены на крайних тележках посредством опор типа «Флексикойл», а на средней – посредством опор кузова на среднюю тележку, конструктивно выполненных в виде упругих качающихся сжатых стержней. Продольная связь тележек с кузовом реализована наклонными тягами двустороннего действия, работающими на растяжение–сжатие [8].

Передача силы тяги, возникающей в контакте колеса и рельса, от колесной пары на раму тележки осуществляется через буксовые тяги. От рамы тележки сила тяги передается на раму кузова при помощи наклонной тяги, закрепленной одним концом к кронштейну на нижнем листе среднего бруса рамы тележки, а другим – к кронштейну с упругими элементами на раме кузова.

– **В магистральном грузовом электровозе 2ЭС10 «Гранит»** кузов и тележки связаны между собой в вертикальном и поперечном направлениях с помощью упругих и демпфирующих элементов [8, 10, 23].

Максимальные взаимные перемещения тележек и кузова электровоза в вертикальном и поперечном направлениях ограничены специальными упорами. Передача силы тяги и торможения от тележек к кузову осуществляется цельными наклонными тягами (рис. 11, в).

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

*a – a*

*1* – рама тележки в сборе; *2* – возвращающее устройство; *3* – установка опор кузова и ограничения отклонений; *4* – установка рессорного подвешивания; *5* – механизм передачи сил тяги; *6* – секция рамы опорная; *7* – секция рамы средняя

*1* – bogie frame assembly; *2* – recentering device; *3* – installation of body supports and limitation of deviations; *4* – installation of spring suspension; *5* – mechanism of transmission of traction forces; *6* – section of the support frame; *7* – section of the medium frame

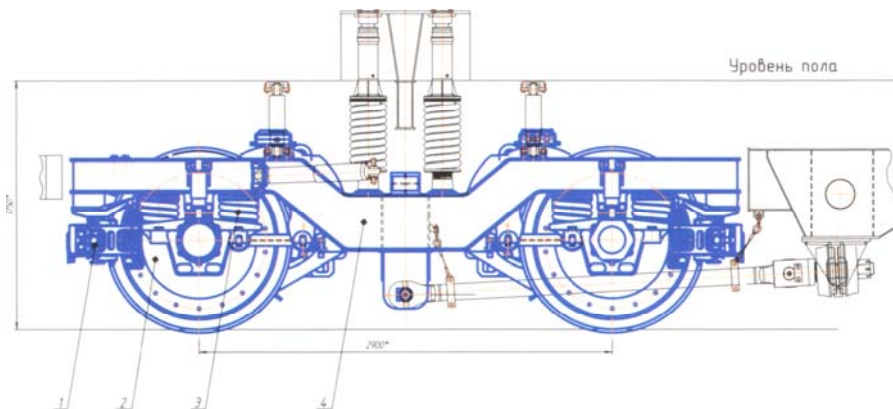
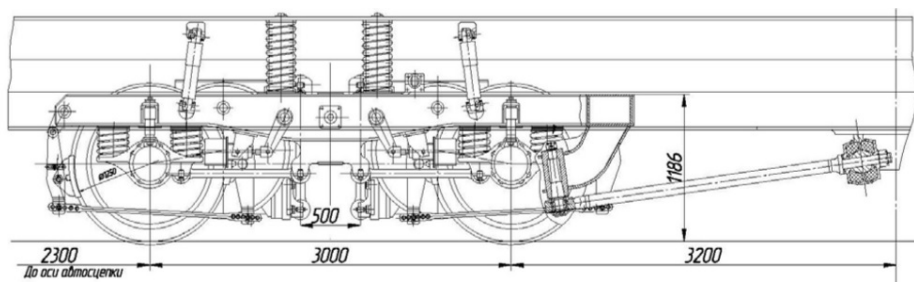
*б – б**в – в*

Рис. 11. Схемы тележек электролокомотивов:  
*a* – ЭП2К; *б* – ЭП20; *в* – 2ЭС10

Fig. 11. Schemes of bogies of electric locomotives:  
*a* – EP2K; *b* – EP20; *c* – 2ES10

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

– В магистральном грузовом двухсекционном электровозе пятого поколения 2ЭС5 «Скиф» с опорно-осевой подвеской тягового двигателя передача тягового (тормозного) усилия осуществляется с помощью наклонных тяг [5, 7, 9]. Связь кузова с тележкой осуществля-

ется с помощью одноповодковых букс и наклонных тяг (рис. 12, а). Тяга расположена по продольной оси электровоза и устанавливается на одной концевой балке рамы тележки [5, 15].

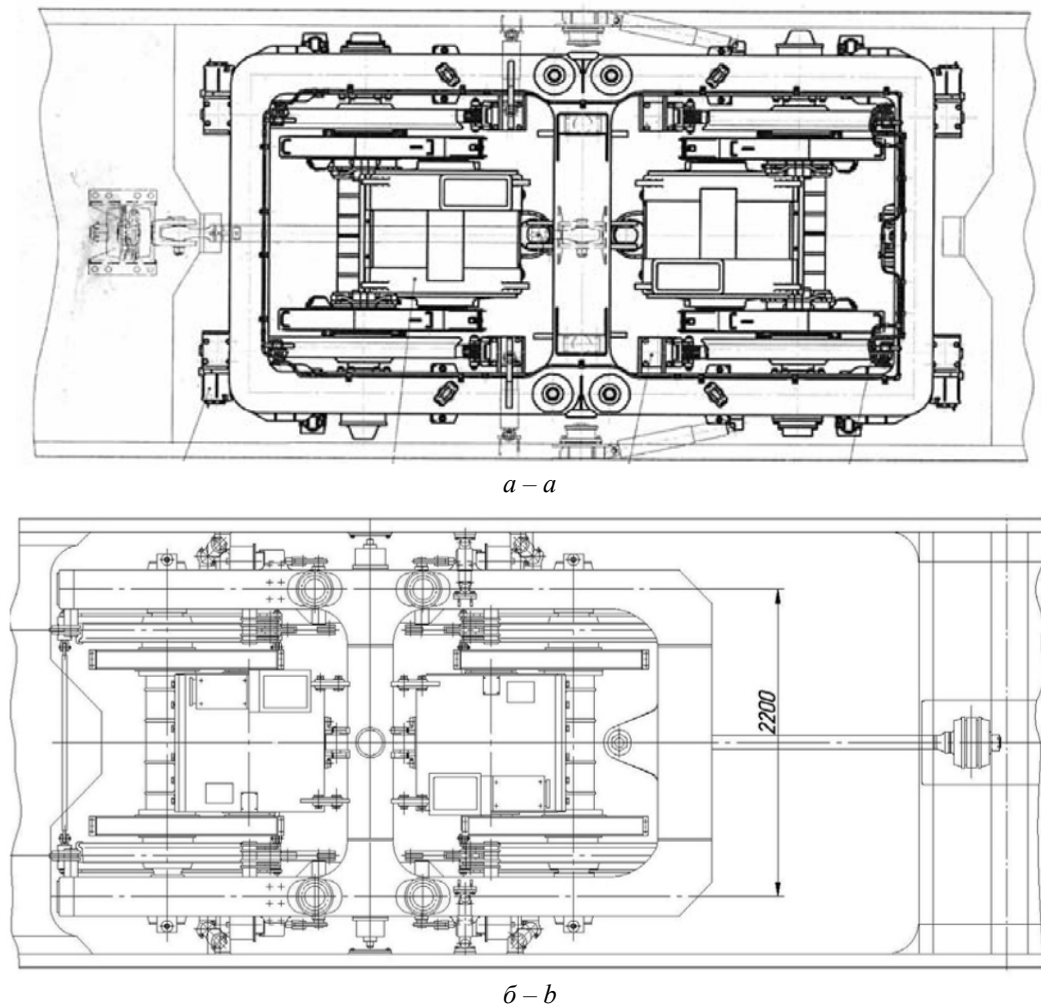


Рис. 12. Схемы связей кузова с тележкой электровозов:  
а – 2ЭС5; б – 2ЭС6

Fig. 12. Schemes of the connections of the body with the bogies of electric locomotives:  
а – 2ES5; б – 2ES6

– Кузов каждой секции электровоза 2ЭС6 «Синара» опирается на две двухосные бесшкворневые тележки [8, 23]. Кузов и тележки связаны между собой в вертикальном и поперечном направлениях с помощью упругих и демпфирующих элементов – с помощью пружин типа «Флексикойл» через специальные упоры-ограничители и цельные наклонные тяги (рис. 12, б).

### Научная новизна и практическая значимость

Данная работа посвящена одной из важных конструктивных особенностей ходовых частей тягового подвижного состава – связи кузова с тележкой – и, как видим, в развитии локомотивостроения особое место занимает наклонная тяга, предназначенная для передачи продоль-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ных сил при стационарных и переходных режимах движения; в зависимости от направления продольных усилий узел наклонной тяги работает на растяжение или сжатие.

Учитывая идеи, наработки и достижения локомотивостроения, благодаря опыту, исследованиям ученых и конструкторов, используя полученные теоретические и эксперименталь-

ные данные предыдущих поколений [2, 6, 12, 16], авторами работы, с точки зрения системности научной новизны, предложены:

- общая классификация связей кузова с тележкой (рис. 13, а);
- общая классификация наклонной тяги локомотивов (рис. 13, б).

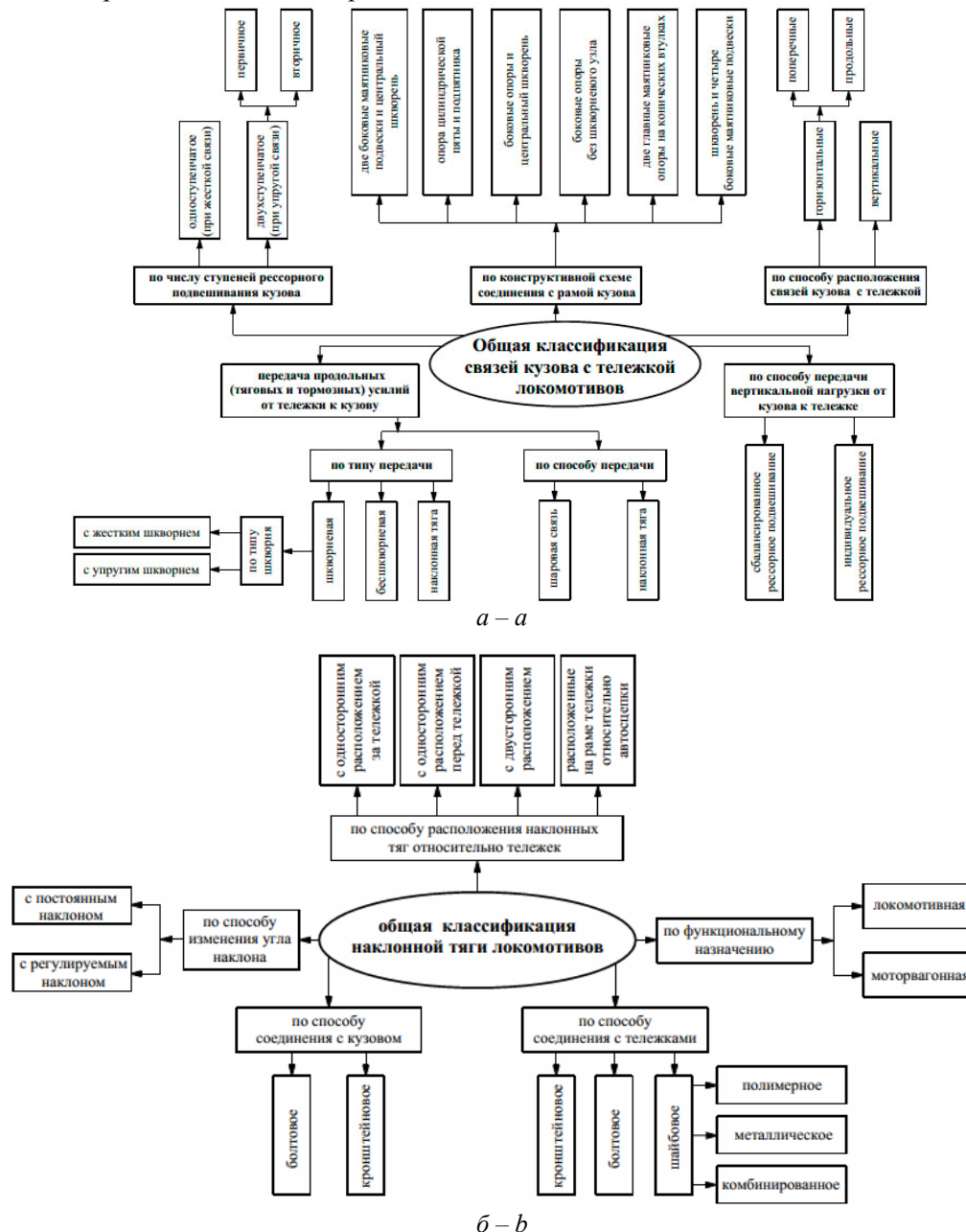


Рис. 13. Общая классификация:

а – связей кузова с тележкой локомотивов; б – наклонной тяги локомотивов

Fig. 13. General classification:

а – the connections of the body with the locomotive bogie; б – inclined rod of locomotives

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

За оказанную помощь высказываем особые слова благодарности И. Ососкову.

## Выводы

При совершенствовании конструкций тягового подвижного состава является актуальным обобщение теоретических, научно-методических, экспериментальных исследований, направленных на дальнейшее улучшение ходовых частей магистральных локомотивов перспективных конструкций.

В работе рассмотрены особенности конструкций ходовых частей некоторых типов тягового подвижного состава, в частности, связи кузова с тележкой с использованием наклонной тяги для передачи продольных горизонтальных сил, что позволит обеспечить необходимые ди-

намические показатели экипажа, уменьшит действие на путь, повысит уровень безопасности движения поездов, лучше использовать сцепной вес локомотива.

По результатам исследований видно, что для создания простой и надежной конструкции, особенно ходовой части, позволяющей снизить расходы на обслуживание и ремонт, эксплуатационные расходы в расчете на весь жизненный цикл, высокую силу тяги при трогании, максимально приближенную к предельной по сцеплению, возможность работы в режиме кратной тяги, от конструкторов и ученых требуется реализация научных и технических решений, обеспечивающие повышение конструкционной скорости с одновременным улучшением тяговых, тормозных и динамических качеств.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Данович, В. Д. Пространственные колебания вагонов на инерционном пути : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Данович Виктор Данилович ; Днепропетр. ин-т инженеров ж.-д. трансп. – Днепропетровск, 1981. – 465 с.
2. Евстратов, А. С. Экипажные части тепловозов / А. С. Евстратов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 136 с.
3. Знакомьтесь: Электровоз ЭП20 // Локомотив. – 2013. – № 4. – С. 34–37.
4. Калівода, Я. Досвід експериментальних досліджень рухомого складу з використанням стендового обладнання / Я. Калівода, Л. Недужа // Вагонний парк. – 2017. – № 3/4. – С. 28–30.
5. Марченко, А. В. Знакомьтесь: электровоз 2ЭС5 / А. В. Марченко, К. П. Солтус // Локомотив. – 2013. – № 1. – С. 38–42.
6. Механическая часть тягового подвижного состава : учебник для вузов ж.-д. трансп. / под ред. И. В. Бирюкова. – Москва : Транспорт, 1992. – 440 с.
7. Мямлин, С. В. Параметрична екологія на залізничному транспорті. Принципи, оцінка, контроль, безпека : монографія / С. В. Мямлін, Ю. В. Зеленько, Л. О. Недужа. – Дніпропетровськ : Літограф, 2014. – 203 с.
8. Мямлин, С. В. Совершенствование конструкции ходовых частей локомотивов / С. В. Мямлин, Л. А. Недужая // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 5 (47). – С. 124–136. doi: 10.15802/stp2013/17977.
9. Орлов, Ю. А. Грузовой электровоз переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями / Ю. А. Орлов, В. П. Янов // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2010. – № 5 (147), ч. 1. – С. 241–245.
10. Основные параметры и характеристики электровоза 2ЭС10 / А. П. Фалендыш, Д. А. Шелест, А. Г. Мастепан // Локомотив-информ. – 2012. – № 5. – С. 16–19.
11. Подопросветов, А. В. Особенности электрических схем электровоза ЭП2К / А. В. Подопросветов, Б. Н. Моршкин // Локомотив. – 2013. – № 3. – С. 22–26.
12. Повышение надежности экипажной части тепловозов / под ред. Л. К. Добрынина. – Москва : Транспорт, 1984. – 248 с.
13. Раков, В. А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956–1975) / В. А. Раков. – Москва : Транспорт, 1999. – 443 с.
14. Соколов, Ю. Н. Конспект для локомотивных бригад. Электровоз ДС3. Устройство, Управление, Обслуживание / Ю. Н. Соколов. – Киев : Изд-во Юго-Запад. ж.-д., 2011. – 299 с.
15. Солтус, К. П. Грузовой электровоз переменного тока 2ЭС5 / К. П. Солтус // Ж.-д. мира. – 2013. – № 7. – С. 49–55.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

16. Тепловозы: Основы теории и конструкция / под ред. В. Д. Кузьмича. – Москва : Транспорт, 1991. – 352 с.
17. Трофимович, В. В. Механическая часть электроподвижного состава : курс лекций / В. В. Трофимович. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – Ч. 2. – 100 с.
18. Тушканов, Б. А. Электровоз ВЛ85. Рук. по эксплуатации / Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова. – Москва : Транспорт, 1992. – 480 с.
19. Application of flywheel energy storage for heavy haul locomotives / M. Spiryagin, P. Wolfs, F. Szanto [et al.] // *Applied Energy*. – 2015. – Vol. 157. – P. 607–618. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.082.
20. Gubacheva, L. Alternative fuels for transport / L. Gubacheva, A. Andreev, D. Shevchenko // *TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*. – 2011. – No. 11 A. – P. 99–106.
21. Improvement of working conditions of the freight locomotive running gear / G. Tumanishvili, T. Natriashvili, G. Goletiani [et al.] // *Transport Problems*. – 2016. – Vol. 11. – Iss. 3. – P. 103–109. doi: 10.20858/tp.2016.11.3.10.
22. Myamlin, S. Construction Analysis of Mechanical Parts of Locomotives / S. Myamlin, M. Luchanin, L. Neduzha // *TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*. – 2013. – Vol. 13, No. 3. – P. 162–169.
23. Myamlin, S. Mathematical Modeling of a Cargo Locomotive / S. Myamlin, S. Dailidka, L. Neduzha // *Proc. of 16<sup>th</sup> Intern. Conf. Transport Means*. – Kaunas, 2012. – P. 310–312.
24. Myamlin, S. Research of Innovations of Diesel Locomotives and Bogies / S. Myamlin, L. Neduzha, Ž. Urbutis // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 134. – P. 469–474. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.069.
25. Tyagi, R. K. Survey on Water Cooling System's Failure Analysis for Diesel Electric Locomotives / R. K. Tyagi, Sukanya Borah // *Intern. J. of Advance Research and Innovation*. – 2013. – Vol. 1. – Iss. 2. – P. 12–24.

С. В. МЯМЛІН<sup>1</sup>, О. ЛУНІС<sup>2</sup>, Л. О. НЕДУЖА<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 776 85 65, ел. пошта sergeymyamlin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2</sup>Каф. «Залізничний транспорт», Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса, вул. Й. Басанавічуса, 28, Вільнюс, Литва, LT-03224, ел. пошта o.lunys2010@gmail.com.lt, ORCID 0000-0002-9395-9178

<sup>3\*</sup>Каф. «Теоретична та будівельна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс. +38 (056) 373 15 11, ел. пошта nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

## ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ХОДОВИХ ЧАСТИН ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

**Мета.** Для визначення динамічних якостей магістральних локомотивів, які характеризують безпечний рух по прямолінійним та криволінійним ділянках колії у всьому діапазоні експлуатаційних швидкостей, необхідно проведення цілого комплексу досліджень. Однією з необхідних умов якісного покращення тягового рухомого складу залізниць є визначення параметрів його ходових частин. Серед питань, пов'язаних із цією проблемою, важливе місце займає задача визначення динамічних якостей локомотивів на стадії проектування з урахуванням обраних технічних рішень у конструкції ходових частин. При цьому особлива увага приділяється зв'язкам кузова з візком, зокрема, через похилі тяги. **Методика.** Математичне моделювання проводиться методом чисельного інтегрування динамічної завантаженості магістрального локомотива з використанням програмного комплексу «Dynamics of Rail Vehicles» («DYNRAIL»). **Результати.** З результатів досліджень видно, що для створення простої та надійної конструкції ходових частин, що дозволяє знизити витрати на обслуговування та ремонт, мати низьку початкову вартість та експлуатаційні витрати в розрахунку на весь життєвий цикл, високу силу тяги при русанні, максимально наближену до граничної по зчепленню, можливість роботи в режимі кратної тяги, від конструкторів та вчених вимагається реалізація наукових і технічних рішень. **Наукова новизна.** За підсумками дослідження авторами сформовані загальна класифікація зв'язків кузова з візком та загальна класифікації конструкцій похилої тяги локомотивів. **Практична значимість.** При удосконаленні конструкцій рухомого складу актуальним є узагальнення результатів теоретичних, науково-методичних, експериментальних досліджень, спрямованих на подальше по-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

кращення ходових частин магістральних локомотивів перспективних конструкцій. Проведені авторами дослідження щодо удосконалення конструктивних особливостей елементів ходових частин деяких типів сучасних магістральних локомотивів мають практичну цінність та можуть бути використані у розробках тягового рухомого складу.

**Ключові слова:** магістральний локомотив; конструкція ходових частин; візок; похила тяга

S. V. MYAMLIN<sup>1</sup>, O. LUNYS<sup>2</sup>, L. O. NEDUZHA<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Cars and Car Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 776 85 65, e-mail sergeymyamin@gmail.com, ORCID 0000-0002-7383-9304

<sup>2</sup>Dep. «Railway Transport», Vilnius Gediminas Technical University, J. Basanavichyus St., 28, Vilnius, Lithuania, LT-03224, e-mail o.lunys2010@gmail.com.lt, ORCID 0000-0002-9395-9178

<sup>3\*</sup>Dep. «Theoretical and Structural Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 11, e-mail nlorhen@i.ua, ORCID 0000-0002-7038-3006

## PECULIARITIES OF RUNNING GEAR CONSTRUCTION OF ROLLING STOCK

**Purpose.** To determine the dynamic qualities of the main locomotives that characterize safety traffic along straight and curved track sections in the entire range of operational speeds, it is necessary to perform a whole range of studies. One of the necessary conditions for a qualitative improvement of the traction rolling stock of railways is the determination of the parameters of its running gears. Among the issues related to this problem, the important task is to determine the dynamic qualities of locomotives at the design stage, taking into account the selected technical solutions in the design of running gears. At the same time, special attention is paid to the connections of the body with bogie, in particular, using the inclined rods. **Methodology.** Mathematical modeling is carried out by the method of numerical integration of the equations of the mathematical model of locomotive spatial oscillations to determine the dynamic loading of the mainline locomotive using the software package "Dynamics of Rail Vehicles" ("DYNRAIL"). **Findings.** The research results show that in order to create a simple and reliable design of running gears, which will reduce maintenance and repair costs, will have low initial cost and operating costs for the whole life cycle, high traction force as close as possible to the ultimate force in traction, will make it possible to operate in the multiple traction mode, the designers and scientists should implement scientific and technical solutions. **Originality.** In accordance with researches authors formed general classification formation of body/bogie connections and the general classification of structures of inclined rod of locomotives. **Practical value.** Generalization of the results of theoretical, scientific-methodical, experimental studies aimed at further improving the running gears of long-distance locomotives of perspective structures is urgent in improving the rolling stock constructions. The research carried out by the authors concerning improvement of the structural features of the running gear elements of some types for modern mainline locomotives are of practical value and can be used in the development of traction rolling stock.

**Key words:** mainline locomotive; running gear construction; bogie; inclined rod

### REFERENCES

1. Danovich, V. D. (1981). *Prostranstvennyye kolebaniya vagonov na inertionnom puti* (Doctoral dissertation). Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk.
2. Yevstratov, A. S. (1987). *Ekipazhnyye chasti teplovozov*. Moscow: Mashinostroeniye.
3. Soltus, K.P. (2013). Znakomtes: Elektrovoz EP20. *Locomotive*, 4, 34-37.
4. Kalivoda, J., & Neduzha L. (2017). Experimental research experience with rolling stock stand equipment. *Car Fleet*, 3-4, 28-30.
5. Marchenko, A. V., & Soltus, K. P. (2013). Znakomtes: elektrovoz 2ES5. *Locomotive*, 1, 38-42.
6. Biryukov, I. V. (Ed.). (1992). *Mekhanicheskaya chast tyagovogo podvizhnogo sostava*. Moscow: Transport.
7. Miamlin, S. V., Zelenko, Y. V., & Neduzha, L. O. (2014). *Parametrychna ekolohiia na zaliznychnomu transporti. Pryntsypy, otsinka, kontrol, bezpeka* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Litohraf.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Myamlin, S. V., & Neduzha, L. O. (2013). Design improvement of the locomotive running gears. *Science and Transport Progress*, 5 (47), 124-136. doi: 10.15802/stp2013/17977
9. Orlov, Y. A., & Yanov V. P. (2010). Gruzovoy elektrovovoz peremennogo toka s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 5 (147), 241-245.
10. Falendysh, A. P., Shelest, D. A., & Mastepan, A. G. (2012). Osnovnyye parametry i kharakteristiki elektrovoza 2ES10. *Lokomotyv-inform*, 5, 16-19.
11. Podoprosvetov, A.V., & Moroshkin, B. N. (2013). Osobennosti elektricheskikh skhem elektrovoza EP2K. *Locomotive*, 3, 22-26.
12. Dobrynin, L. K. (Ed.). (1984). *Povysheniye nadezhnosti ekipazhnoy chasti teplovozov*. Moscow: Transport.
13. Rakov, V. A. (1999). *Lokomotivy otechestvennykh zheleznykh dorog (1956–1975)*. Moscow: Transport.
14. Sokolov, Y. N. (2011). *Konspekt dlya lokomotivnykh brigad. Elektrovoz DS3. Ustroystvo, Upravlenie, Obsluzhivanie*. Kyiv: South-West Railway.
15. Soltus, K. P. (2013). Gruzovoy elektrovovoz peremennogo toka 2ES5. *Zheleznyye dorogi mira*, 7, 49-55.
16. Kuzmich V. D. (Ed.). (1991). *Teplovozy: Osnovy teorii i konstruktsiya*. Moscow: Transport.
17. Trofimovich, V. V. (2006). *Mekhanicheskaya chast elektropodvizhnogo sostava: Kurs lektsiy*. Khabarovsk: Far Eastern State Transport University.
18. Tushkanov, B. A., Pushkarev, N. G., & Pozdnyakova, L. A. (1992). *Elektrovovoz VL85. Rukovodstvo po ekspluatatsii*. Moscow: Transport.
19. Spiragin, M., Wolfs, P., Szanto, F., Sun, Y. Q., Cole, C., & Nielsen, D. (2015). Application of flywheel energy storage for heavy haul locomotives. *Applied Energy*, 157, 607-618. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.082
20. Gubacheva, L., Andreev, A., & Shevchenko, D. (2011). Alternative fuels for transport. *TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture, XIA*, 99-106.
21. Tumanishvili, G., Natriashvili, T., Goletiani, G., Zviadauri, V., & Nadiradze T. (2016). Improvement of working conditions of the freight locomotive running gear. *Transport Problems*, 11 (3), 103-109. doi: 10.20858/tp.2016.11.3.10
22. Myamlin, S., Luchanin, M., & Neduzha, L. (2013). Construction Analysis of Mechanical Parts of Locomotives. *TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*, 13 (3), 162-169.
23. Myamlin, S., Dailidka, S., & Neduzha, L. (2012). Mathematical Modeling of a Cargo Locomotive. *Proceedings of 16th international conference Transport Means, October 25-26, 2012, Kaunas*. 310-312. Kaunas: Kaunas University of Technology.
24. Myamlin, S., Neduzha, L., & Urbutis, Ž. (2016). Research of Innovations of Diesel Locomotives and Bogies. *Procedia Engineering*, 134, 469-474. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.069
25. Tyagi, R. K., & Borah, S. (2013). Survey on Water Cooling System's Failure Analysis for Diesel Electric Locomotives. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 1 (2), 12-24.

Стаття рекомендована д.т.н., проф. В. Л. Горобцом (Україна)

Поступила в редколлегию: 15.02.2017

Принята к печати: 08.05.2017

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

## УДК 629.4.0.18

А. В. ТРЕТЬЯКОВ<sup>1\*</sup>, О. А. ТРЕТЬЯКОВ<sup>2</sup>, М. В. ЗИМАКОВА<sup>3</sup>, А. А. ПЕТРОВ<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Московский просп., 9, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (921) 938 34 93, эл. почта avtretiakov51@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4820-9535

<sup>2</sup>АО Научно-внедренческий центр «Вагоны», Московский просп., 2, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (921) 393 72 51, эл. почта ro\_pgk@mail.ru, ORCID 0000-0003-4390-3122

<sup>3</sup>АО Научно-внедренческий центр «Вагоны», Московский просп., 2, Санкт-Петербург, Россия, 190031, тел. +7 (812) 310 95 00, эл. почта mazimm1987@hotmail.com, ORCID 0000-0002-3354-7243

<sup>4</sup>ООО Научно-инновационный центр «Вагон-Тест», ул. Киевская, 32а, Санкт-Петербург, Россия, 196084, тел. +7 (931) 533 56 31, эл. почта gn.petrov.anton@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4802-6835

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПЕКТРОВ УДАРНОГО  
ОТКЛИКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

**Цель.** В научной работе необходимо проанализировать повышение эффективности традиционных методов проведения ударных испытаний наземных транспортных средств с целью оценки их прочности, надежности и долговечности. **Методика.** Для достижения поставленной цели авторами статьи разработана методика проведения ударных испытаний и эффективный алгоритм, который базируется на идеях и методических предложениях, содержащихся в Руководстве ООН «Рекомендации по перевозкам опасных грузов». **Результаты.** С использованием современного языка программирования СИ-шарп был создан специализированный программный комплекс, реализующий алгоритм обработки данных ударных процессов, имеющий «дружественный» интерфейс с пользователем этого комплекса и другими программными продуктами вычислительной среды под управлением Windows. С применением данного комплекса была проведена обработка результатов испытаний контейнера-цистерны модели STL-26/0,4 типа UN T14 при различных режимах ударного нагружения (скоростей соударения), геометрических, инерционных и демпфирующих параметров этой конструкции. В результате получена объективная оценка исследуемых свойств испытанного объекта и сделан вывод о превышении расчетного спектра ударного отклика (СУО), его минимально допустимого значения во всем спектре исследуемых частот. **Научная новизна.** Впервые реализован комплексный теоретико-практический подход к изучению прочности, надежности и долговечности транспортных механических конструкций, подвергающихся ударным нагружениям на основе оценки спектров ударного отклика. **Практическая значимость.** Применение предлагаемой методики и разработанного программного комплекса для проведения ударных испытаний позволило повысить достоверность этих испытаний, сократить время их проведения и обработки результатов. Результаты обработки испытаний контейнера-цистерны показали, что это транспортное средство в полной мере обеспечивает требуемые нормативные показатели прочности, надежности и долговечности. Это подтверждается тем, что после проведенных ударных испытаний в исследуемой конструкции отсутствовали конструктивные повреждения, остаточные деформации и не выявлены утечки перевозимых грузов. В статье делается вывод о возможности применения разработанной методики проведения ударных испытаний и реализующего ее программного комплекса при проведении аналогичных испытаний любых наземных транспортных средств.

**Ключевые слова:** ударные испытания; спектр ударного отклика; контейнер-цистерна; газовый контейнер; опасные грузы; прочность; надёжность; долговечность

## Введение

При испытаниях на устойчивость к ударным воздействиям железнодорожные транспортные средства подвергают ударным испытаниям с целью определения откликов исследуемых узлов и элементов конструкций. Согласно [1, 4, 7, 11,

12, 17, 18], образец каждого типа конструкции переносных цистерн и многоэлементных газовых контейнеров (МЭГК), отвечающих определению контейнера, приведённому в Международной конвенции по безопасным контейнерам 1972 года (КБК), должен быть подвергнут испытаниям на динамический удар в продольном направлении и должен удовлетворять требованиям

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

к испытаниям транспортных средств, перевозящих опасные грузы.

Одной из составных частей этой работы является обеспечение требований к кривым спектра ударного отклика (СУО), полученных в ходе испытаний для обоих угловых фитингов у контейнера подвергнутого удару с торца, которые должны повторять или превышать минимальную кривую СУО на всех частотах в диапазоне от 2 до 100 Гц [2, 3, 15, 19]. При этом результаты испытаний контейнера считаются удовлетворительными в том случае, если отсутствуют потери, остаточные деформации или повреждения, при которых контейнер становится непригодным для дальнейшего использования.

## Цель

Основная цель проведенных исследований – повышение эффективности традиционных методов проведения и обработки ударных испытаний [5, 6] подвижного состава железных дорог и других наземных транспортных средств. Она достигается путем разработки методики этих испытаний и ее программной реализации на современном языке программирования высокого уровня. На следующем этапе выполняется апробация результатов путем проведения ударных испытаний конкретного транспортного объекта и обработки данных этих испытаний с помощью комплекса программ.

## Методика

Расчёт спектра кривых ударного отклика основан на анализе временной реализации сигнала, поступающего от датчика ускорения по следующему алгоритму [3, 7, 8, 16].

Для каждого интервала частот для рассматриваемого частотного диапазона от 2 до 100 Гц, с шагом, как минимум, в 1/30 октавы:

а) рассчитывается матрица относительных перемещений с использованием всех точек данных из входного графика зависимости «ускорение – время» с помощью следующего выражения:

$$\xi_i = -\frac{\Delta t}{\omega_d} \sum_{k=0}^i \ddot{x}_k e^{-\zeta \omega_n \Delta t (i-k)} \sin[\omega_d \Delta t (i-k)],$$

где  $\Delta t$  – временной интервал между значениями ускорения;

$\omega_n$  – собственная частота без затухания (в радианах);

$\omega_d$  – собственная частота с затуханием,

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2};$$

$\ddot{x}_k$  –  $k$ -ое значение входных данных об ускорении;

$\zeta$  – декремент затухания;

$i$  – целое число, колеблющееся от 1 до числа входных точек данных об ускорении;

$k$  – параметр, используемый в суммировании, колеблющийся от 0 до текущего значения  $i$ ;

б) рассчитывается матрица относительных ускорений с использованием значений перемещения, полученных на этапе  $i$  с помощью следующего выражения:

$$\ddot{\xi}_i = 2\zeta \omega_n \Delta t \sum_{k=0}^i \ddot{x}_k e^{-\zeta \omega_n \Delta t (i-k)} \cos[\omega_d \Delta t (i-k)];$$

в) фиксируется максимальное абсолютное значение ускорения из матрицы, полученной на этапе  $i$ , для рассматриваемого интервала частот. Это значение становится точкой кривой СУО для данного конкретного интервала частот. Этап  $i$  должен повторяться для каждой собственной частоты до тех пор, пока не будут оценены все интервалы собственных частот;

д) строится кривая спектра ударного отклика и минимальная СУО.

На первом этапе разработки программы расчёта СУО анализируются и устанавливаются требования к минимальному диапазону амплитуды ударного импульса и к частотному диапазону регистрируемых виброускорений.

Согласно п. 41.3.3.2 нормативного документа [12] минимальный диапазон амплитуды – 200 г, максимальный нижний предел частот – 1 Гц и минимальный верхний предел частот – 3 000 Гц, а аналого-цифровая система сбора данных должна обеспечивать минимальную частоту дискретизации регистрируемых процессов – 1 000 Гц. В систему сбора данных включается аналоговый фильтр нижних частот с частотой среза 200 Гц.

Всем этим требованиям отвечают датчики ускорений типа АЛЕ 049 и многоканальный измерительно-вычислительный комплекс МИС-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

036, розроблений фірмою НПП «МЕРА» [9, 13, 14].

Второй этап выполненной работы включал в себя выбор алгоритма языка программирования, позволяющего наиболее эффективно реализовать алгоритм обработки данных ударных процессов и имеющий «дружественный» интерфейс с общеупотребимыми программными продуктами вычислительной среды под управлением Windows.

На первый взгляд, наиболее подходящим для этих целей программным продуктом является WinПОС Expert НПП «МЕРА» [10], однако разработчики предпочли создать свой узкоспециализированный программный продукт, зафиксировав все необходимые параметры измерительно-регистрающей среды и настроенный на получение графической и текстовой входной и выходной информации, адаптированной к существующей нормативно-технической документации. В качестве алгоритмического языка программирования был выбран СИ-шарп (C#), и тем самым, помимо простоты и удобства использования программного продукта, была обеспечена его открытость и возможность адаптации к меняющимся требованиям по обработке данных ударных процессов.

На следующем этапе работы были сформированы типовые входные и выходные формы представления результатов расчётов ударных процессов и вычисления СУО контейнеров с построением минимальных СУО, что делает

анализ полученных результатов весьма наглядным и удобным.

На рис. 1 приведено диалоговое меню программы расчета СУО (в верхней части окна) и график зависимости «ускорение-время» (в нижней части окна).

В этом окне могут быть выполнены следующие действия:

а) открыт файл, содержащий запись исследуемого ударного процесса (напр. d40.dat);

б) выбран фрагмент записи (рис. 2), соответствующий нормативным требованиям – «Начало ударов» (до 0,05 с до удара) и «Окончание ударов» (2,0 с после удара);

с) выбран режим «Без фильтрации» или «С фильтрацией» (напр. 200 Гц);

д) выбран режим «Без масштабирования по массе» или «С масштабированием по массе», во втором случае требуемые массовые характеристики исследуемых объектов заносятся в появляющемся дополнительном окне;

е) указаны допустимые границы ускорений, которые приводятся на графике исходного процесса (напр. 4g);

ф) применены интуитивно понятные функциональные клавиши «мыши» ПЭВМ для масштабирования и оцифровки исходных графиков;

г) нажатие пункта меню «Перерисовать» приведет к появлению в нижней части экрана отредактированного изображения исходного графика ударного процесса;

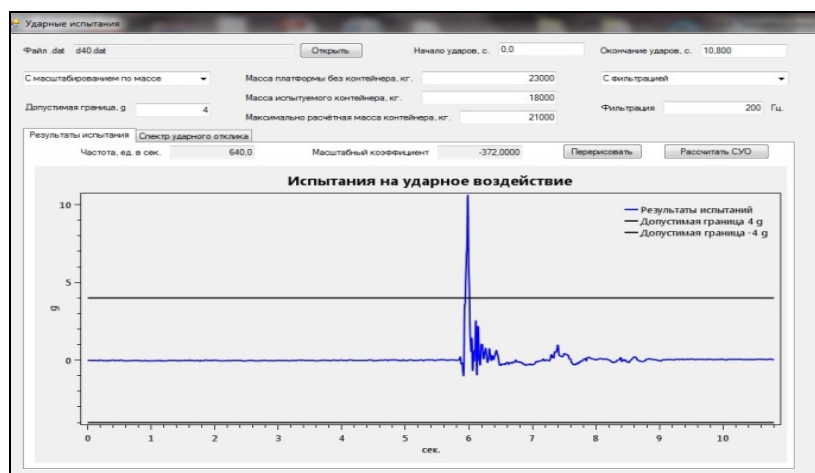


Рис. 1. Диалоговое меню программы расчета СУО и зависимость «ускорение-время» ударного отклика

Fig. 1. The dialog menu of the program for calculating shock response spectrum and the dependence "acceleration-time" of the shock response

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Рис. 2. Выделенный фрагмент записи ударного процесса на временном промежутке от 5,6 до 9,4 с

Fig. 2. Selection of the recording of the shock process in the time interval from 5.6 to 9.4 seconds

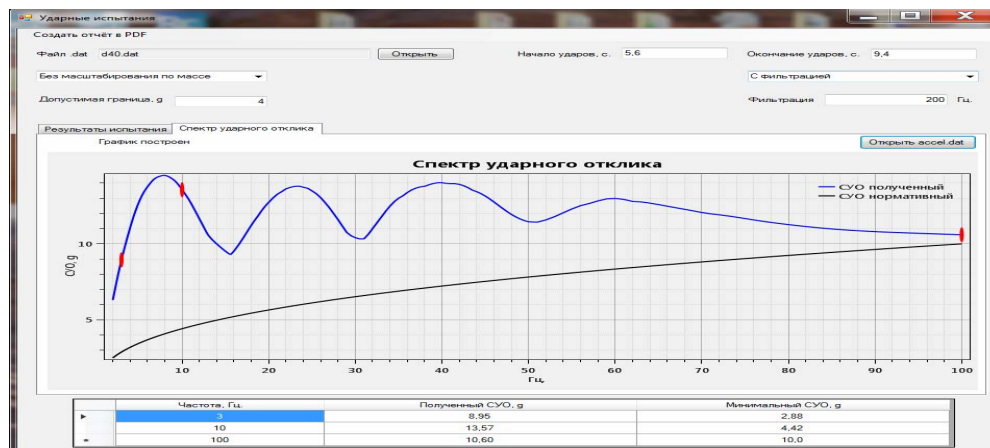


Рис. 3. Спектры ударного отклика:

1 – вычисленный, 2 – минимальный нормативный

Fig. 3. Shock response spectra:

1 – calculated, 2 – minimum regulatory

h) нажатие пункта меню «Расчет СЧО» приведет к запуску программы обработки исходного процесса. Следует отметить, что в зависимости от быстродействия используемой для расчета ПЭВМ время расчета составляет от 2 до 3 минут для образователей реализации продолжительностью 4 с. При этом на экране компьютера появляется затемненное окно, которое по-

сле завершения расчета гаснет;

i) переключение окна «Результаты испытаний» на окно «Спектр ударного импульса» приводит к изображению, показанному на рис. 3;

j) сохранение отчетной формы выполненного ударного испытания (рис.4) возможно при нажатии иконки «Создать отчет в PDF».

Отчёт от 29.04.2015 14:58:08

Исходный файл: 040.dat

Частота, ед. в сек : 640,0

Масштабный коэффициент : -372,0000

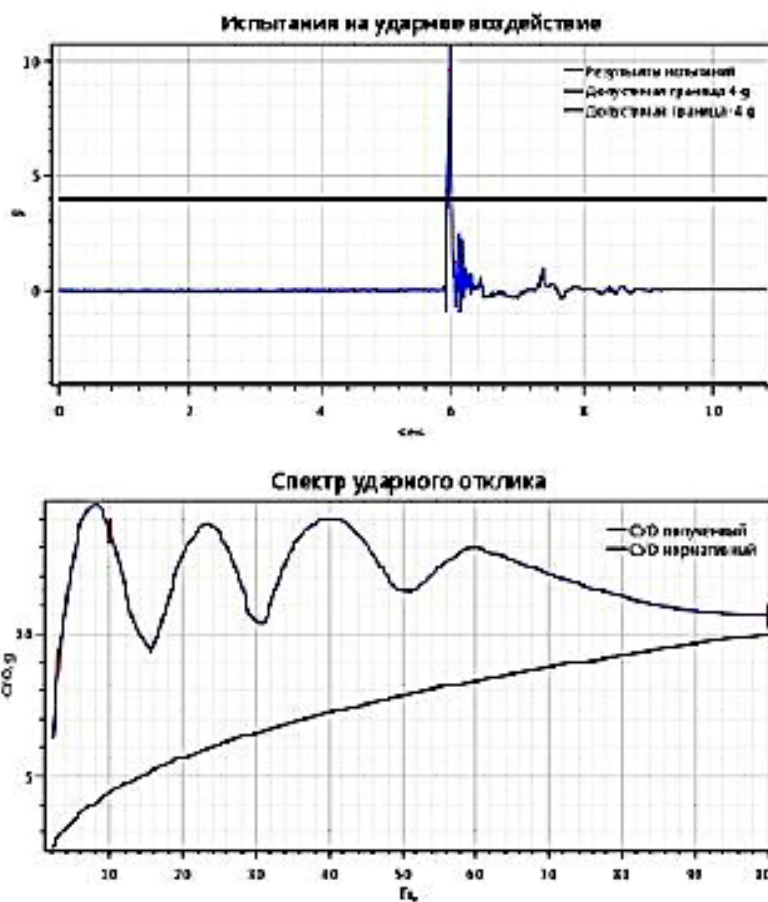
Без масштабирования по массе

С фильтрацией: 100 Гц

Допустимая граница: 4 g

Начало ударов: 5,6 сек.

Окончание ударов: 9,4 сек.



| Частота, Гц | Полученный СУО, g | Минимальный СУО, g |
|-------------|-------------------|--------------------|
| 3           | 8,99              | 2,88               |
| 10          | 13,59             | 4,42               |
| 100         | 10,62             | 10,0               |

Рис. 4. Отчетная форма по ударному испытанию

Fig. 4. Report form on shock test

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Имеющиеся на экране информационные сообщения «Частота, ед. с» и «Масштабный коэффициент» являются нередрактируемыми и отражают шаг дискретизации (напр. 640 Гц) и масштабный коэффициент (напр. –372,000) исходного процесса.

**Результаты**

В апреле 2015 года в Испытательном центре

АО НВЦ «Вагоны» были проведены ударные испытания контейнера-цистерны (КЦ) модели CTL-26/0.4 типа UN T14 по методике [12], разработанной центром и утвержденной Российским Морским Регистром Судоходства 31.03.2015 г. Общий вид КЦ представлен на рис. 5.

Испытуемый КЦ имеет основные характеристики, приведенные в табл. 1.

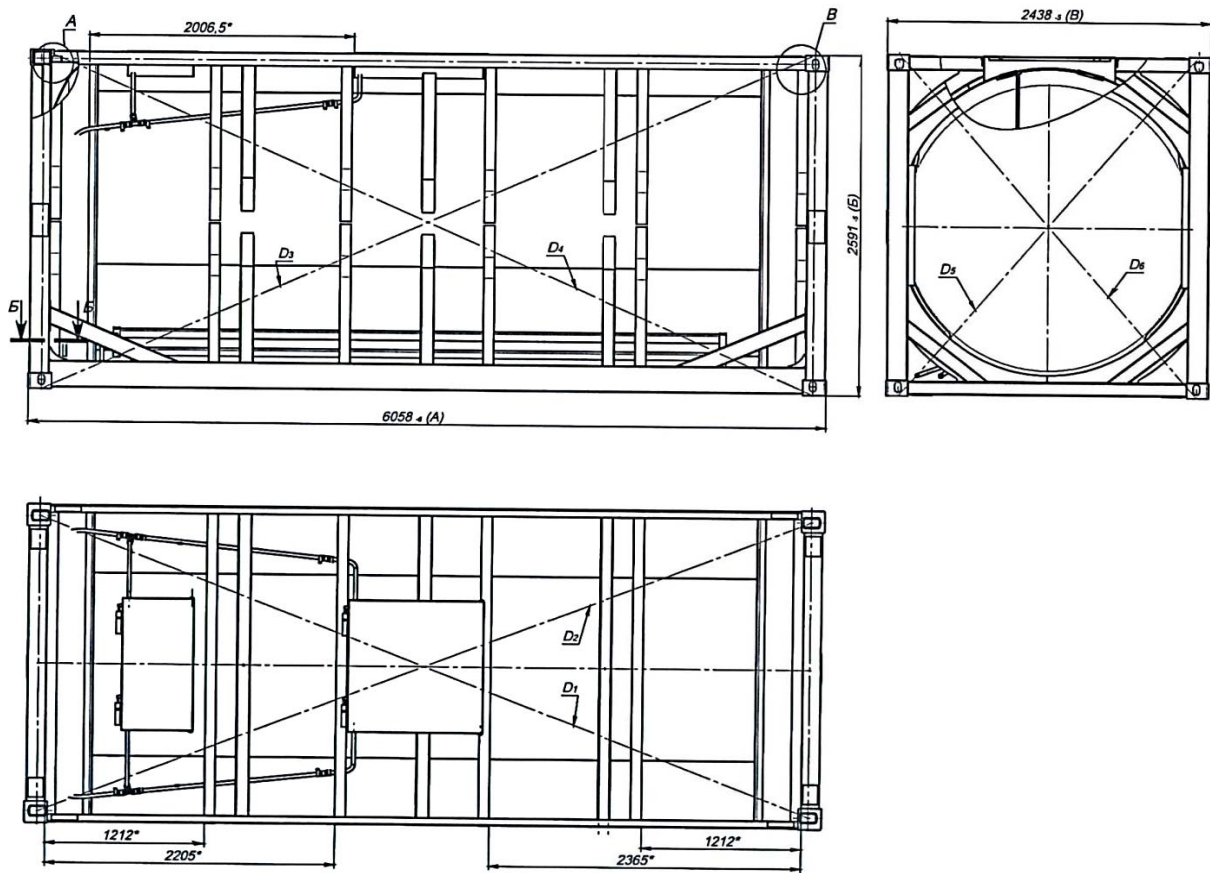


Рис. 5. Общий вид контейнера-цистерны модели CTL-26/0.4 типа UN T14

Fig. 5. General view of the tank-container, model CTL-26/0.4, UN T14 type

Таблица 1  
Основные характеристики КЦ модели  
CTL-26/0.4 типа UN T14

Table 1

The main characteristics of the tank-container, model CTL-26/0.4, UN T14 type

| N<br>п/п | Технические характеристики              | Численные значения |
|----------|-----------------------------------------|--------------------|
| 1        | Максимальная расчетная масса            | 36 000 кг          |
| 2        | Собственная масса (тара) при испытаниях | 4000 кг            |
| 3        | Максимальная грузоподъемность           | 32 000 кг          |
| 4        | Общая вместимость                       | 26 000 л           |
| 5        | Максимально допустимое рабочее давление | 0,4 МПа            |
| 6        | Испытательное давление                  | 0,6 МПа            |

В качестве бойка использовался вагон-цистерна, загруженная водой до массы брутто 84 т.

При подготовке объекта к испытаниям испытуемый КЦ устанавливался на испытательную платформу для перевозки контейнеров (грузоподъемность 60 т, тара 22 т), оборудованную эластомерным поглощающим аппаратом энергоемкости 110 кДж класса T1, в положение, смещенное в сторону вагона-бойка.

Наполнение КЦ производилось водой в объеме 25 220 л до 97 % вместимости (что соответствует массе брутто 29 220 кг), что ниже максимальной расчетной массы (36 000 кг).

Проводилась серия последовательных соударения, три из них с невысокими скоростями – соответственно 6,19; 6,42 и 7,10 км/ч и два – со скоростями 8,80 и 8,90 км/ч до достижения максимального ускорения и кривой спектра ударного отклика (СУО) не ниже минимальной на двух угловых фитингах, расположенных со стороны вагона-бойка. На рис.6 представлены осциллограммы ударов в автосцепку при скоростях соударения 6,19 и 8,90 км/ч.

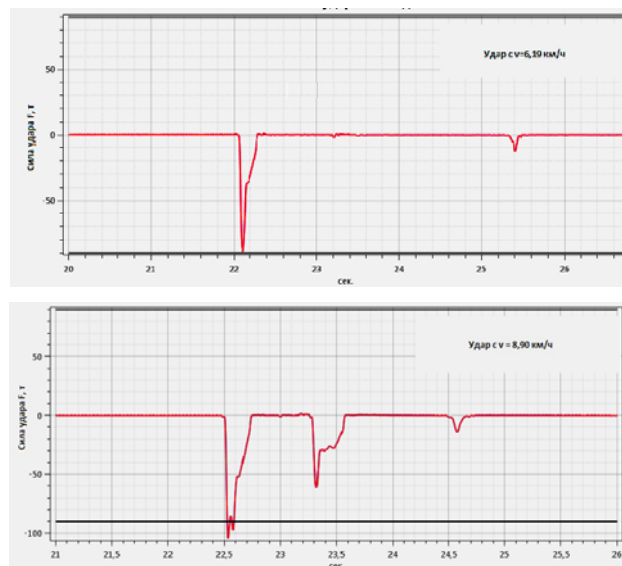


Рис. 6. Осциллограммы ударного воздействия F на автосцепку при разных скоростях соударения

Fig. 6. Oscillograms of the impact F on the coupler at different collision velocities

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

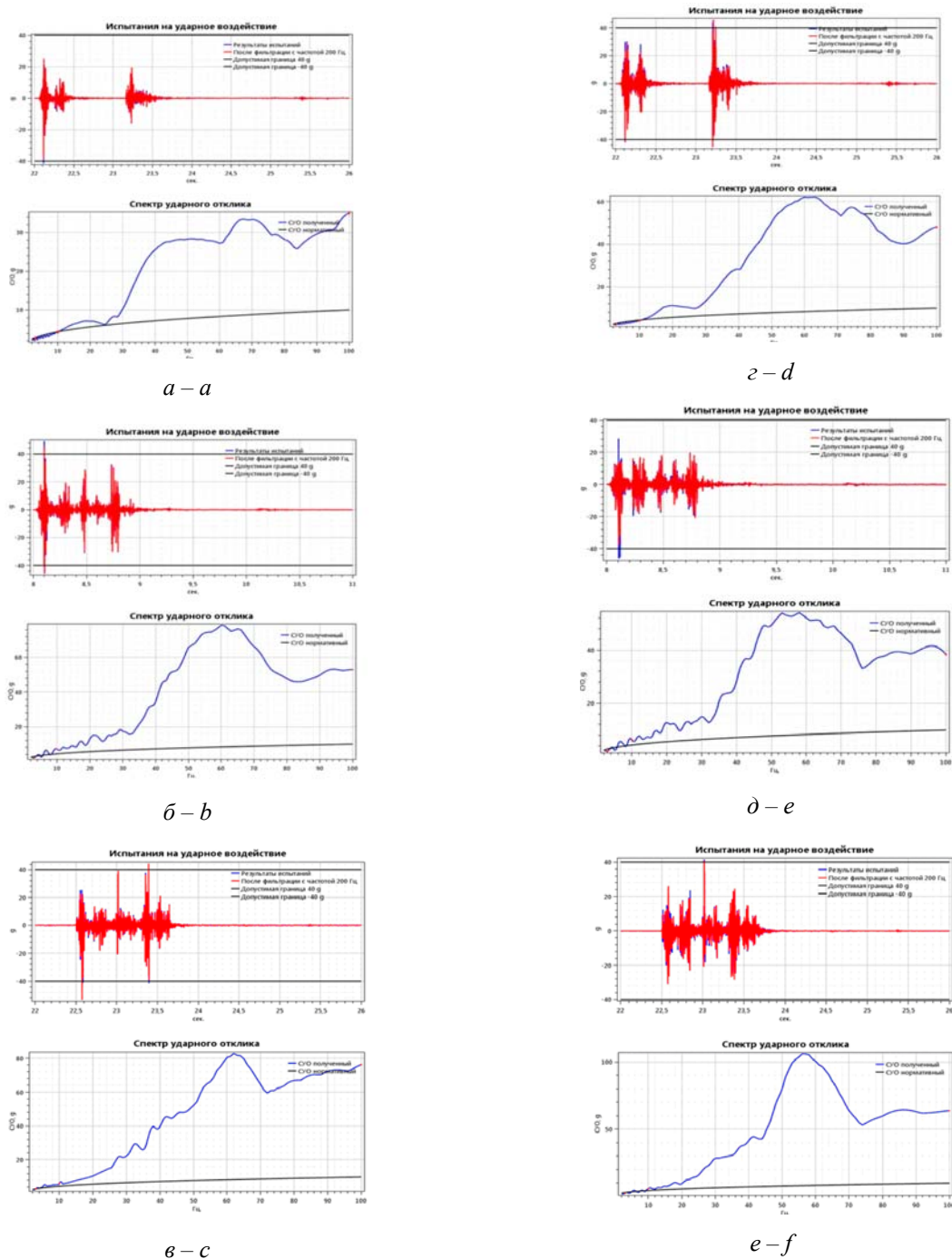


Рис. 7. Осцилограммы «ускорение-время» и спектры ударных откликов для:

- левых фитингов: *a*– для  $V = 6,19$  км/ч; *б*– для  $V = 7,10$  км/ч, *в*– для  $V = 8,90$  км/ч
- правых фитингов: *z*– для  $V = 6,19$  км/ч; *д*– для  $V = 7,10$  км/ч; *e*– для  $V = 8,90$  км/ч

Fig. 7. Oscillograms "acceleration-time" and spectra of shock responses for:

- left fittings: *a* – for  $V = 6.19$  km/h; *b* – for  $V = 7.10$  km/h, *c* – for  $V = 8.90$  km/h
- right fittings: *d* – for  $V = 6.19$  km/h; *e* – for  $V = 7.10$  km/h; *f* – for  $V = 8.90$  km/h

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Ударные испытания обрабатывались программным комплексом, описанным выше, и были представлены в виде научно-технического отчета, содержащего отчетные формы – осциллограммы «ускорение – время» и спектры ударных откликов для фитингов, расположенных на двух сторонах со стороны вагона-бойка, рис. 7.

На рис. 8 приведены два фрагмента вычисленных СУО при скоростях соударения 6,19 и 8,90 км/ч соответственно в низкочастотной об-

ласти. Наглядно видно, что при скорости 6,19 км/ч вычисленный СУО в частотном диапазоне до 10 Гц имеет «провалы» ниже допускаемых минимальных значений СУО. При скоростях соударения 8,90 км/ч в этом же частотном диапазоне расчётные значения СУО превышают или совпадают с минимально допустимыми значениями спектра ударного отклика.

Результаты расчёта СУО для различных скоростей соударения и минимально допустимого СУО показаны в табл. 2

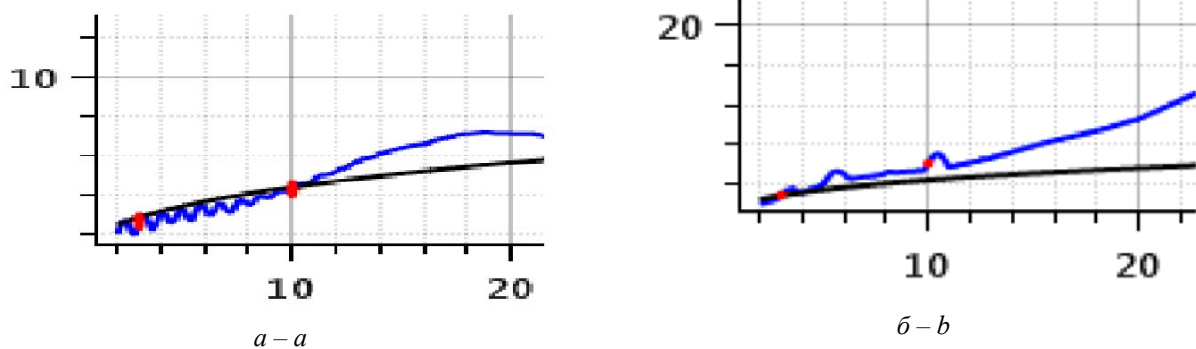


Рис. 8. Выделенные фрагменты расчётных и минимально допустимых СУО в низкочастотной области исследования при:

*a* – скорости соударения 6,19 км/ч,

*б* – скорости соударения 8,90 км/ч

Fig. 8. Selections of calculated and minimally admissible shock response spectra in the low-frequency region of the study with:

*a* – collision velocity 6.19 km/h,

*b* – collision velocity 8.90 km/h

Таблица 2

**Сравнение результатов расчёта СУО для различных скоростей соударения и минимально допустимого СУО**

Table 2

**Comparison of the results of the shock response spectra calculation for different collision rates and the minimum acceptable shock response spectrum**

| Частота, Гц | Скорость соударения V, км/ч |       |       | Минимальный СУО |
|-------------|-----------------------------|-------|-------|-----------------|
|             | 6,19                        | 7,10  | 8,90  |                 |
|             | Левые фитинги               |       |       |                 |
| 3           | 2,68                        | 1,98  | 2,95  | 2,88            |
| 10          | 4,32                        | 7,05  | 6,16  | 4,42            |
| 100         | 35,00                       | 52,99 | 76,26 | 10,00           |

Окончание табл. 2

End of table 2

| Частота, Гц    | Скорость соударения V, км/ч |       |       | Минимальный СУО |
|----------------|-----------------------------|-------|-------|-----------------|
|                | 6,19                        | 7,10  | 8,90  |                 |
| Правые фитинги |                             |       |       |                 |
| 3              | 2,57                        | 2,03  | 2,93  | 2,88            |
| 10             | 4,06                        | 6,39  | 5,90  | 4,42            |
| 100            | 48,09                       | 38,42 | 63,96 | 10,00           |

### Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна: предлагается новый подход к проведению ударных испытаний, в котором впервые реализован комплексный теоретико-практический подход к изучению прочности, надежности и долговечности транспортных механических конструкций, подвергающихся ударным нагрузкам, на основе оценки их спектров ударного отклика. Практическая значимость: Применение предлагаемой методики и разработанного программного комплекса для проведения ударных испытаний позволяет повысить достоверность этих испытаний, сократить время их проведения и обработки результатов.

### Выводы

Анализ этих результатов позволил сделать следующие выводы:

1. При сравнительно низких скоростях соударений (до 8,90 км/ч) вычисленные спектры

ударных откликов на низких частотах (до 10,0 Гц) имеют «провалы» относительно минимально допустимых значений СУО. По всей вероятности, это обусловлено использованием эластомерных поглощающих аппаратов, установленных на испытуемом вагоне – платформе.

2. При скоростях соударения выше указанного значения во всем спектре исследуемых частот наблюдается превышение минимально допустимых значений расчетного СУО.

3. После достижения при испытаниях расчетных уровней СУО, превышающих минимально допустимые значения этого параметра, констатировано отсутствие повреждений, остаточных деформаций и утечек жидкости у испытанных контейнеров – цистерн.

4. Выполненная работа позволяет сделать вывод о возможности применения методики оценки спектров ударного отклика и программного комплекса при проведении ударных испытаний любых наземных транспортных средств.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бирбрайер, А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбрайер, А. Ю. Роледер. – Санкт-Петербург : Изд-во политехн. ун-та, 2009. – 594 с.
2. Бороненко, Ю. П. Динамические испытания контейнеров при продольных соударениях / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова, А. Н. Смирнов // Опасные грузы и контейнеры. – 2004. – № 1/2. – С. 6–11.
3. Бороненко, Ю. П. Динамические испытания на продольные соударения контейнеров и вагонов для их перевозки / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова, А. Н. Смирнов // Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ–70 : тез. докл. Междунар. конф. (25.09–26.09.2012). – Москва, 2012. – С. 71.
4. Вибрационные и ударные испытания космических и научных приборов / Т. М. Томила, А. С. Гребенников, М. М. Лактионова, Б. Н. Бахтин // Сб. тр. XXVII сес. Рос. акуст. о-ва (РАО). – Санкт-Петербург, 2014. – С. 2–7.
5. ГОСТ 33788-2016. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и динамические качества. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 20 с.
6. ГОСТ 8.127-74. Измерения параметров ударного движения. – Москва : Изд-во стандартов, 1974. – 14 с.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

7. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов, А. А. Федосов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 240 с.
8. Канунникова, Е. А. Формирование ударных импульсов по заданным спектрам ответа для испытаний оборудования / Е. А. Канунникова, Н. А. Красова, И. А. Мещихин // Вопросы электромеханики : тр. ВНИИЭМ. – 2012. – Т. 130, № 5. – С. 33–38.
9. Комплексы измерительно-вычислительные : рук. по эксплуат. НПП «Мера». – Мытищи, 2017. – 24 с.
10. Пакет Обработки Сигналов WinПОС. Руководство пользователя. Ред. 3.2. / НПП «Мера». – Мытищи, 2014. – С. 31–42.
11. Повышение прочности ресурса и безопасности эксплуатации несущих конструкций железнодорожного подвижного состава / Н. А. Махутов, В. С. Коссов, Э. С. Оганьян, Н. Ф. Красюков // Проблемы механики ж.-д. транспорта: Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава и энергосбережение : тез. докл. XII междунар. конф. – Днепропетровск, 2008. – С. 104.
12. Рекомендации по перевозке опасных грузов. Руководство ООН по испытаниям и критериям. – Нью-Йорк ; Женева : United Nations, 2009. – Ч. 4 : Методы испытаний транспортного оборудования. – С. 409–416.
13. Современные стенды для всех видов испытаний // Автоматизация испытательных стендов в авиационной отрасли промышленности : сб. ст. НПП «Мера». – Мытищи, 2017. – С. 2–9.
14. Средства измерения и анализа параметров динамических процессов : [каталог НПП «Мера»]. – Мытищи, 2016–2017. – 40 с.
15. Субботин, С. Г. Спектральные характеристики для сравнения и идентификации ударных нагружений / С. Г. Субботин, А. Ю. Мельников // Диагностика материалов. – 2009. – № 12, т. 75. – С. 53.
16. Томилина, Т. М. Ударные испытания космического оборудования по заданному спектру отклика / Т. М. Томилина, А. С. Гребенников // Сес. науч. совета РАН по акустике и XXIV сес. РАО : сб. тр. конф. – Москва, 2011. – С. 8–10.
17. Harris, C. M. Shock and Vibration Handbook / C. M. Harris, A. G. Pirsal. – New York : McGraw-Hill, 2002. – 568 p.
18. Lee, J.-R. Review of Pyroshock wave measurement and simulation for space systems / J.-R. Lee, C. C. Chia, C.-W. Kong // Measurement. – 2012. – Vol. 45. – P. 631–642. doi: 10.1016/j.measurement.2011.12.011.
19. Smallwood, D. An improved Recursive Formula For Calculating Shock Response Spectra [Электронный ресурс] / D. Smallwood // The Shock And Vibration Bulletin. – 1981. – No. 51, pt. 2. – Режим доступа: [http://www.vibrationdata.com/Newsletters/August2001\\_NL.pdf](http://www.vibrationdata.com/Newsletters/August2001_NL.pdf). – Загл. с экрана. – Проверено : 07.04.2017.

О. В. ТРЕТЬЯКОВ<sup>1\*</sup>, О. О. ТРЕТЬЯКОВ<sup>2</sup>, М. В. ЗИМАКОВА<sup>3</sup>, А. А. ПЕТРОВ<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагоны та вагонне господарство», Петербургський державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І, Московський просп., 9, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (921) 938 34 93, ел. пошта [avtretiakov51@yandex.ru](mailto:avtretiakov51@yandex.ru), ORCID 0000-0003-4820-9535

<sup>2</sup>АТ Науково-впроваджувальний центр «Вагоны», Московський просп., 2, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (921) 393 72 51, ел. пошта [ro\\_pgk@mail.ru](mailto:ro_pgk@mail.ru), ORCID 0000-0003-4390-3122

<sup>3</sup>АТ Науково-впроваджувальний центр «Вагоны», Московський просп., 2, Санкт-Петербург, Росія, 190031, тел. +7 (812) 310 95 00, ел. пошта [mazimm1987@hotmail.com](mailto:mazimm1987@hotmail.com), ORCID 0000-0002-3354-7243

<sup>4</sup>ТОВ Науково-інноваційний центр «Вагон-Тест», вул. Київська, 32а, Санкт-Петербург, Росія, 196084, тел. +7 (931) 533 56 31, ел. пошта [gn.petrov.anton@yandex.ru](mailto:gn.petrov.anton@yandex.ru), ORCID 0000-0003-4802-6835

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА СПЕКТРІВ УДАРНОГО ВІДГУКУ РУХОМОГО СКЛАДУ

**Мета.** У науковій роботі необхідно проаналізувати підвищення ефективності традиційних методів проведення ударних випробувань наземних транспортних засобів із метою оцінки їх міцності, надійності та довговічності. **Методика.** Для досягнення поставленої мети авторами статті розроблена методика проведення ударних випробувань та ефективний алгоритм, який базується на ідеях та методичних пропозиціях, що містяться в Керівництві ООН «Рекомендації з перевезення небезпечних вантажів». **Результати.** З використанням сучасної мови програмування СІ-шарп був створений спеціалізований програмний комплекс, який реалізує алгоритм обробки даних ударних процесів, що має «дружній» інтерфейс із користувачем цього комплексу та іншими програмними продуктами обчислювального середовища під керу-

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ванням Windows. Із застосуванням даного комплексу була проведена обробка результатів випробувань контейнера-цистерни моделі CTL-26/0,4 типу UN T14 при різних режимах ударного навантаження (швидкостей зіткнення), геометричних, інерційних та демпфуючих параметрів цієї конструкції. В результаті отримана об'єктивна оцінка досліджуваних властивостей випробуваного об'єкта та зроблено висновок про перевищення розрахункового спектра ударного відгуку (СУВ), його мінімально допустимого значення у всьому спектрі досліджуваних частот. **Наукова новизна.** Вперше реалізовано комплексний теоретико-практичний підхід до вивчення міцності, надійності та довговічності транспортних механічних конструкцій, що піддаються ударним навантаженням на основі оцінки спектрів ударного відгуку. **Практична значимість.** Застосування запропонованої методики та розробленого програмного комплексу для проведення ударних випробувань дозволило підвищити достовірність цих випробувань, скоротити час їх проведення та обробки результатів. Результати обробки випробувань контейнера-цистерни показали, що цей транспортний засіб у повній мірі забезпечує необхідні нормативні показники міцності, надійності та довговічності. Це підтверджується й тим, що після проведених ударних випробувань у досліджуваній конструкції були відсутні конструктивні пошкодження, залишкові деформації та не виявлені витoki перевезених вантажів. У статті робиться висновок про можливість застосування розробленої методики проведення ударних випробувань та програмного комплексу, що її реалізує, при проведенні аналогічних випробувань будь-яких наземних транспортних засобів.

**Ключові слова:** ударні випробування; спектр ударного відгуку; контейнер-цистерна; газовий контейнер; небезпечні вантажі; міцність; надійність; довговічність

A. V. TRETIKOV<sup>1\*</sup>, O. A. TRETIKOV, M. V. ZIMAKOVA, A. A. PETROV

<sup>1\*</sup>Dep. «Car and Cars Facilities», Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Moskovskiy Av., 9, Russia, 190031, tel. +7 (921) 938 34 93, e-mail avtretiakov51@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4820-9535<sup>2</sup>JSC

<sup>2</sup>JSC Scientific and Innovation Center «Cars», Moscovskiy Av., 2, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (921) 393 72 51, e-mail po\_pgk@mail.ru, ORCID 0000-0003-4390-3122

<sup>3</sup>JSC Scientific and Innovation Center «Cars», Moscovskiy Av., 2, Saint-Petersburg, Russia, 190031, tel. +7 (812) 310 95 00, e-mail mazimm1987@hotmail.com, ORCID 0000-0002-3354-7243

<sup>4</sup>LLC Scientific and Innovation Center «Car-Test», Kievskaya St., 32a, Saint-Petersburg, Russia, 196084, tel. +7 (931) 533 56 31, e-mail gn.petrov.anton@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4802-6835

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF SHOCK SPECTRUM RESPONSE OF ROLLING STOCK

**Purpose.** The article is aimed to analyze the increase in the effectiveness of traditional methods for carrying out shock tests of land vehicles, in order to assess their strength, reliability and durability. **Methodology.** To achieve this purpose, the authors of the article developed a technique for conducting impact tests and effective algorithm based on the ideas and methodological proposals contained in the UN Guidelines on the “Recommendations for Transportations of Dangerous Goods”. **Findings.** With the use of the modern programming language SI-Sharp, a specialized software package was created that implements the algorithm for handling shock processes, which has a “friendly” interface with the user of this complex and other software products of the computing environment powered by Windows. With the application of this complex, the results of tests of the tank-container of the model CTL-26/0.4, type UN T14 under different shock loading (collision rates), geometric, inertial and damping parameters of this design were processed. As a result, an objective evaluation of the properties of the tested object was obtained, and a conclusion was made that the calculated shock response spectrum (SRS) was exceeded, its minimum permissible value in the entire spectrum of the investigated frequencies. **Originality.** For the first time, a complex theoretical and practical approach to the study of the strength, reliability, and durability of transport mechanical structures subjected to impact loads on the basis of the evaluation of the impact response spectra was realized. **Practical value.** The application of the proposed methodology and the developed software package for carrying out shock tests made it possible to increase the reliability of these tests, to shorten the time of their testing and to process the results. The results of the testing of the tank-container tests showed that this vehicle fully provides the required normative parameters of strength, reliability and durability. This is also confirmed by the fact that after the shock tests carried out in the structure under investigation there were no structural damages, residual deformations and no leakage of the goods transported. The article concludes that it is possible to use the developed technique for carrying out shock tests and implementing a software package for carrying out similar tests of any land vehicles.

## РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Keywords:** shock tests; shock response spectrum; container-tank; gas container; dangerous goods; strength; reliability; durability

## REFERENCES

1. Birbraer, A. N., & Roleder, A. J. (2009). *Extreme actions on structures*. Saint Petersburg: Publishing House of the Politechnical University.
2. Boronenko, Y. P., Orlova, A. M., & Smirnov, A. N. (2004). Dinamicheskiye ispytaniya konteynerov pri prodolnykh soudareniyakh. *Dangerous Goods & Containers*, 1/2, 6-11.
3. Boronenko, Y. P., Orlova, A. M., & Smirnov, A. N. (2012). Dinamicheskiye ispytaniya na prodolnyye soudareniya konteynerov i vagonov dlya ikh perevozki. *Proceedings of the International Conference on Experimentalnoe koltso VNIIZhT-70, September 25-26, 2012*, 71. Moscow: JSC «VNIIZhT».
4. Tomilina, T. M., Grebennikov, A. S., Laktionova, M. M., & Bakhtin, B. N. (2014). Vibro and shock verification tests of space instruments. *Abstracts of papers presented at XXVII session of Russian Acoustical Society, April 16-18, 2014, Saint Petersburg*. Saint Petersburg: Russian Acoustical Society. Retrieved from <http://rao.akin.ru/Rao/sess27/%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0.pdf>
5. Freight and Passenger Railcars. methods of testing structural strength and dynamic performance, GOST 33788-2016 (2016).
6. Shock-motion parameter measurements. Terms and definitions, GOST 8.127-74 (1974).
7. Batuev, G. S., Golubkov, Y. V., Yefremov, A. K., & Fedosov, A. A. (1977). *Inzhenernyye metody issledovaniya udarnykh protsessov*. Moscow: Mashinostroenie.
8. Kanunnikova, E. A., Krasova, N. A., & Meshchikhin, I. A. (2012). Impact pulses generation as per preset response spectra for equipment testing. *Electromechanical matters. VNIIE studies*, 130(5), 33-38.
9. Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera». (2017). *Kompleksy izmeritelno-vychislitelnye* [manual]. Mytisch: Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera».
10. Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera». (2014). Paket Obrabotki Signalov WinPOS (Version 3.2) [user guide]. (pp. 31-42). Mytisch: Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera».
11. Makhutov, N. A., Kossov, V. S., Oganyan, E. S., & Krasnyukov, N. F. (2008). Povysheniye prochnosti resursa i bezopasnosti ekspluatatsii nesushchikh konstruktсий zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava. *Abstracts of papers presented at 12th International Conference Problems of the Railway Transport Mechanics: Safety of Motion, Dynamics, Strength of Rolling Stock and Energy Saving, May 28-30, 2008, Dnipropetrovsk*, 104. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
12. United Nations. (2009). *Rekomendatsii po perevozke opasnykh gruzov. Rukovodstvo OON po ispytaniyam i kriteriyam ST/SG/AC.10/11/Rev.5* (pp. 409-416). New York; Geneva: United Nations.
13. Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera». (2017). Sovremennyye stendy dlya vsekh vidov ispytaniy. In *Avtomatizatsiya ispytatelnykh stendov v aviatsionnoy otrasli promyshlennosti* (pp. 2-9). Retrieved from <http://www.nppmera.ru/assets/files/documentation/Avia-2016-2017.pdf>
14. Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera». (2017). *Sredstva izmereniya i analiza parametrov dinamicheskikh protsessov* [catalog]. Mytisch: Nauchno-proizvodstvennoye predpriyatiye «Myera».
15. Subbotin, S. G., & Melnikov, A. Y. (2009). Spektralnyye kharakteristiki dlya sravneniya i identifikatsii udarnykh nagruzheniy. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 75(12), 53-56.
16. Tomilina, T. M., & Grebennikov, A. S. (2011). Udarnyye ispytaniya kosmicheskogo oborudovaniya po zadannomu spektru otklika. *Proceedings of the XXIV session of Russian Acoustical Society* (pp. 8-10). Moscow: Russian Acoustical Society.
17. Harris, C. M., & Pirsal, A. G. (2002). *Shock and Vibration Handbook*. New York: McGraw-Hill.
18. Lee, J.-R., Chia, C. C., & Kong, C.-W. (2012). Reviw of Pyrosheck wave measurement and simulation for space systems. *Measurement*, 45(4), 631-642. doi: 10.1016/j.measurement.2011.12.011
19. Smallwood, D. (1981). An improved Recursive Formula for Calculating Shock Response Spectra. *The Shock and Vibration Bulletin*, 51(2). Retrieved from [http://www.vibrationdata.com/Newsletters/August2001\\_NL.pdf](http://www.vibrationdata.com/Newsletters/August2001_NL.pdf)

Статья рекомендована к публикации научным комитетом XIV Международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта. Безопасность движения, динамика, прочность подвижного состава, энергосбережение»

Поступила в редколлегию: 30.05.2016

Принята к печати: 01.03.2017

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

UDC [624.21.095:624.072.14]:625.1

S. V. KLUCHNIK<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Industrial Research Laboratory of Artificial Structures, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 667 40 49, e-mail ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

### STRESS-STRAIN STATE OF BEAM STAGED CONNECTION POINT OF THE RAILWAY BRIDGE TRACK-WAY

**Purpose.** The staged connections of the beams of railway bridge track-way have the simplest design, but some design flaws result in numerous defects. The purpose of the given work is to research the actual stress-strain state of the point of connection of the stringers with the floor beams on condition of their staged interposition. It is also necessary to determine possible effect of coupled work of deck beam grid and booms on their stress-strain state.

**Methodology.** To reach the purpose of the study the testing of the existing bridge was conducted. To measure strains (stresses) in the span elements we used the strain gages glued to flange angles of stringers and floor beams and to fillets of lower flange angles of stringers in the points of their support on floor beams. To measure deflections of the truss, stringers and floor beams from static loads we used Aistov's and Maksimov's deflectometers, that were installed on lower boom in the middle of span 0-1, as well as on both stringers and floor beams in the middle of the span. Deflectometers were fastened to the span and, by wire communication, to the ground surface.

**Findings.** Stress-strain state of the point of connection of the stringers with the floor beams on condition of their staged interposition was obtained and analyzed. Analysis indicates that, apart from vertical bending of the stringers and beams, there is a significant effect of horizontal bending of floor beams and their torsion, that occur due to the coupled work of track-way beams and top booms, both for P0 beam and for other beams.

**Originality.** Research of stress-strain state of metal track-way staged beams while considering their coupled work with bearing trusses.

**Practical value.** While testing the span under the train load, there are significant additional stresses from horizontal bending of floor beams and their torsion in the floor beam flanges. The appearance of these stresses is caused by inclusion of stringers into coupled work with top booms. Appearing flaws in stringers are caused by local stress concentration due to design features of staged track way.

*Keywords:* stringers; strain; stress; floor beams; metal spans

#### Introduction

Deck spans allow to reduce the consumption of metal, its width, and also the height of the supports [1]. Since 1944 Proyecktstalkonstruksiya Design Institute proposed new design projects of span structures with decks in the level of the bottom and top booms. The deck spans have the truss spans of 44.0; 55.0 and 66.0 m and the main truss height of 8.5 m [7].

Distinctive features of PSK deck spans are the reduction of the distance between the main trusses to 4.0 m, the use of transverse cross-links of the main trusses and the design change of the track-

way beam grid, where there is a staged connection of the track-way stringers and floor beams [1]. The construction of stringer support on the floor beams is shown in Fig. 1.

The staged connections of the beams of railway bridge track-way have the simplest design, but some design flaws result in numerous defects. In the conditions of a staged connection of the track-way beams, because of the large eccentricity between the axes of the stringers and floor beams, the operation of the floor beams and the support unit components is considerably complicated, and there occur local overstress and cracks in the beam flange angles. Stitch rivets (or bolts) joining the

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

stringers to the floor beams also operate under severe conditions.

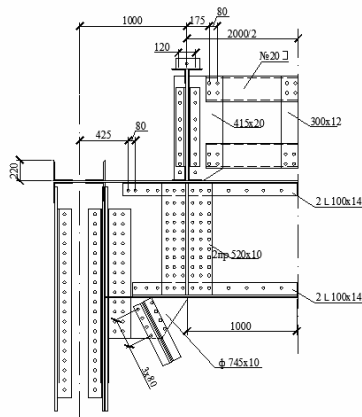


Fig. 1. Construction of beam grid in PSK deck span structures

An unfavorable effect on the metal stress state in the places where cracks appear is caused by the beam deformations, that occur when the track-way beams work together with the top booms of the main trusses while the entire span is loaded with rolling stock. Herewith the top booms are contracted, the floor beams are bent in horizontal direction and are twisted, and at the junction of the stringers and floor beams there occur an additional angle of mutual rotation and deformation of the end segments of the stringer flange angles, as well as deformation of the top flange angles of the floor beams in the stringer-beam intersections [7].

Unlike the one level track-way beam connection, at the staged stringer-beam intersections the fastening elements (rivets or bolts) and the beam flange angle seats appeared not able to perceive the forces that arise from linear and angular deformations of the beams.

### Purpose

The problem that exists today in the constructive solution of the staged connection of the track way beams is in the need to improve the reliability of the construction of the stringer-beam joint. To do this, it is necessary to investigate the actual deformation-stressed state of the joint of stringers with floor beams. This paper, in order to determine the peculiarities of operation of the beam grid of the staged connection point, presents the analysis of results of testing the real structure. The purpose

of the static tests was to measure the stresses in stringers and floor beams of the track way and other span elements under various test load settings. Particular attention was paid to the stresses in the bottom flange angles of stringers near their attachment to floor beams, since it is in these zones that the main disorders are concentrated.

### Methodology

The work was performed by the Sectoral Scientific Research Laboratory (SSRL) of Artificial Structures of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan on the railway bridge over the Mokraya Moskovka River on 186 km of the Krivoy Rog-Volnovaha line.

The numbering of supports is taken along the kilometers from Kryvyi Rih to Volnovakhi, starting from No. 0. The bridge span structures are numbered in double Arabic numerals in accordance with the numbers of the supports on which they rest. The floor beams – along the kilometers, in accordance with the name of the truss joints (P0–P8), and the stringers of span structures – from left to right starting with one (B1 and B2).

To measure strains (stresses) in the span elements we used the strain gages glued to flange angles of stringers and floor beams and to fillets of lower flange angles of stringers in the points of their support on floor beams.

To measure deflections of the truss, stringers and floor beams from static loads we used Aistov's and Maksimov's deflectometers, that were installed on lower boom in the middle of span 0–1, as well as on both stringers and floor beams in the middle of the span. Deflectometers were fastened to the span and, by wire communication, to the ground surface.

Static tests were carried out in «windows» with a duration of 2 hours. Two shunting diesel locomotives ChME-3 were used as a test load. Schemes of arrangement of strain gages during the span structure static tests are shown in Fig. 2–4.

### Findings

A single-track railway bridge across the Mokraya Moskovka River on 186 km of the Krivoy Rog-Volnovakha line is located on a straight line in plan and site view. The bridge clearance is

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

spanned by two metal deck structures, with design span of 44.0 m.

The railway bridge across the Mokraya Moskovka River was built in 1903 according to one-span scheme of  $1 \times 88$  m, then subjected to disruption in 1920 and 1943. In 1948, the bridge was rebuilt according to the scheme of  $2 \times 44.0$  m.

The total length of the bridge is 107.96 m. According to the design, span structures are equal. Span structures consist of two through riveted deck trusses, with a triangular grid, as well as additional

posts. The distance between the trusses is 4.0 m, the truss height is 8.5 m. The trusses are made according to the project of the *Proyektstalkingonstruksiya* for L7 load. The booms have H-shaped section. Longitudinal horizontal connections between the trusses are located in the level of the top and bottom booms, and the transverse connections in the even truss points in the form of intersecting diagonals.

The track way consists of staged-located I-section riveted stringers and floor beams.

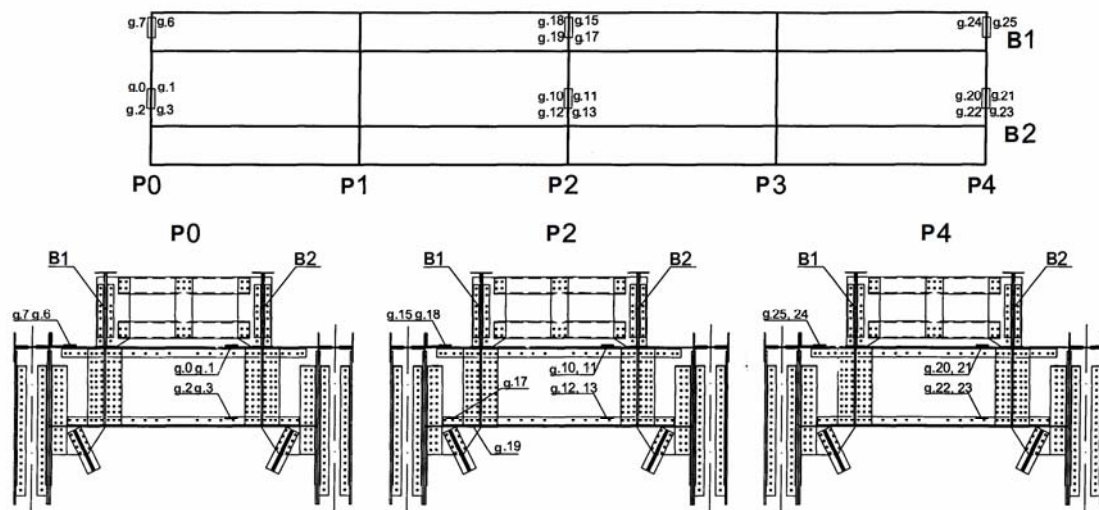


Fig. 2. Arrangement of strain gages during span structure static tests

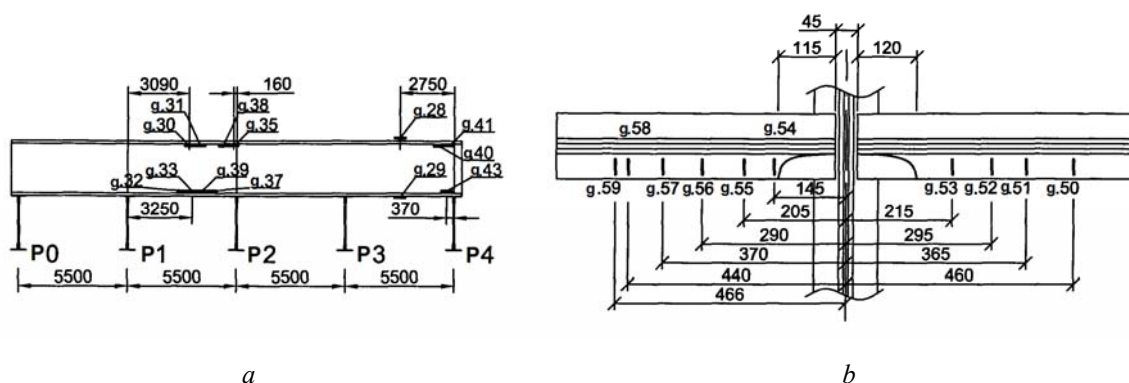


Fig. 3. Arrangement of strain gauges: on the stringer B1;

*a* – on the left stringer B 1

*b* – on the left stringer B1 in connection with P2

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

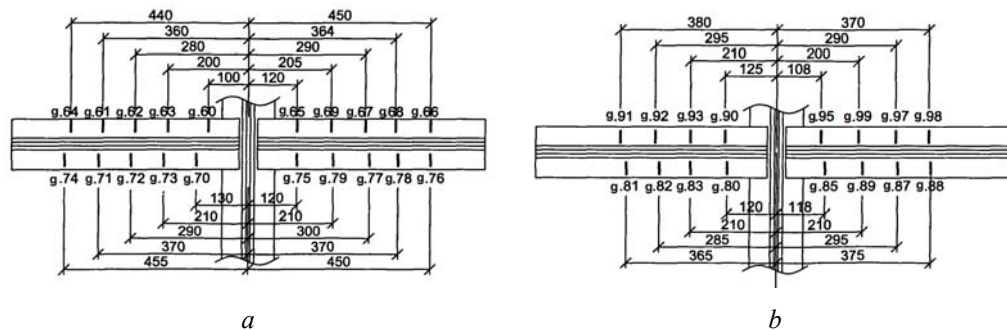


Fig. 4 Arrangement of strain gauges: on the left B1 and right B2 stringers at the point of support on the floor beam P4:

*a* – left stringer B1 in connection with P4

*b* – right stringer B2 in connection with P4

The stringer is fixed to the floor beam with four bolts. The distance between the stringers is 2.0 m.

The bridge substructures are double-track, massive. The buried abutments are built on a natural foundation. The substructure underlying is granite, the intermediate substructure is concrete, massive, built in 1948, the pole footing is sunk shaft.

Prior to testing, the bridge crossing was surveyed, which included full-scale inspection of span structures, bridge substructures and supports, survey of the river bed and approaches to the bridge, survey of the state of the bridge and the track way on the bridge and approaches [5, 8, 13].

The common defect of both span structures is the corrosion of the horizontal sheets of the bottom and top booms of the main trusses up to 1 mm, the paint peeling on the main truss elements, the contamination of the horizontal surfaces of the facings, the flanges with loose goods, and the unsatisfactory drainage of moisture from the booms.

One of the most significant detected defects is a disorder in the track way beam intersections.

Rivet ruptures, loose bolts, development of cracks along the flange angles pad eyes of the stringers at the points of their connection with the floor beams have been registered in the survey since 1958. Some cracks were drilled during the operation of the bridge, and later cuts were made in the bottom flange angles of the stringers. However, the development of cracks continues: along the left stringers at the floor beam P3 on the span structure 0–1 and at the floor beams P1, P3, P7 on the span structure 1–2 and along the right stringer at the floor beam P5 on the span structure 0–1. The

length of some cracks after cutting the flange angle web reaches 128 mm. In the bottom flange angles at the stringer-beam intersections P0 and P3, the development of cracks continues and the length of the cracks reaches 90 mm.

The loose bolts were found: along the left stringers at the floor beams P1 – 4 pcs., P3 – 8 pcs., P6 – 6 pcs., P7 – 12 pcs. on the span structure 0–1 and at the floor beams P3 – 8 pcs., P7 – 6 pcs. on the span 1–2; and along the right stringers at the floor beams P5 – 4 pcs., P7 – 5 pcs. on the span of 0–1.

Gaps were found in stringer-beam intersections: along the left stringers at the floor beams P3 – 1.0 mm, P7 – 1.5 mm on the span structure 0–1 and at the floor beams P3 – 2.0 mm, P7 – 1 mm on the span 1–2; and also, along the right stringers at the floor beams P5 – 1.0 mm, P7 – 1.0 mm on the span structure 0–1 and at the floor beam P6 – 1.0 mm on the span structure 1–2.

Simultaneous presence of loose bolts, cracks and looseness in beam support was found: along the left stringers at the floor beams P3, P7 on the span structure 0–1 and at the floor beam P3 on the span structure 1–2; and along the right stringer at the floor beam P5 on the span structure 0–1.

In addition, on the span 0–1 in the beam grid, the following defects were found:

1) wear of gaskets under angle fishplates along the left stringers at the floor beams P1 – 1 mm, P3 – 2 mm, P6 – 2 mm, P8 – 1 mm;

2) in the top flange angle of the floor beam P2, there is a crack 85 mm long at the left stringer intersection;

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

3) on the right stringer at the junction of the floor beam P7 instead of 8 cut rivets there are installed high-strength bolts;

4) curvature of the top flange angles on the left stringer in panels 6–7 and 7–8 to 20 mm;

5) in the joints of the top fishplates of the left stringers, in the panels 6–7 and 7–8 one rivet is missing, the right stringers in the panel 6–7 2 rivets are missing, in the panel 7–8 – one rivet.

On the span structure 1–2, the wear of gaskets under angle fishplates along the left stringers at the floor beams reaches: P2 – 1 mm, P3 – 1.5 mm, P5 – 2 mm, P7 and P8 – 1 mm.

In a number of places on the span structure 0–1, on unchanged upper sway struts between the stringers, there are local curvatures of the horizontal covers resulting from the derailment of the rolling stock in 1985.

On the span 0–1 in the first three panels, the longitudinal links between the main trusses have a sagging of up to 30 mm and local curvatures, apparently resulted from dropping downwards of the bridge deck debris in the course of restoration work after the derailment in 1985.

Due to the presence of cracks in the beam grid, there is a speed limit of up to 50 km/h on the bridge.

Static deflections were measured along the bottom flanges at the points L4 of both trusses. The highest deflection under the locomotive was 12 mm on both trusses. When converting to L7 load, the relative deflection is  $1/3000 l_p$ , which is below the limit value established by the norms.

When testing the track way beams, their stress state was determined, taking into account the joint work with the main trusses and the operation features of the bottom flange angles of the stringers in the points of their intersection with the floor beams. The loading patterns for the tests are shown in Fig. 5.

For the end floor beam P0, which is the most intensively involved in joint work with the truss booms, an unfavorable test load setting became the loading according to pattern 6.

In this case the greatest stresses in the flange angles reached +49.5 (p. 2) MPa and –63.7 MPa (p. 1). The stress state of the floor beam P0 for various loading patterns is given in Table 1.

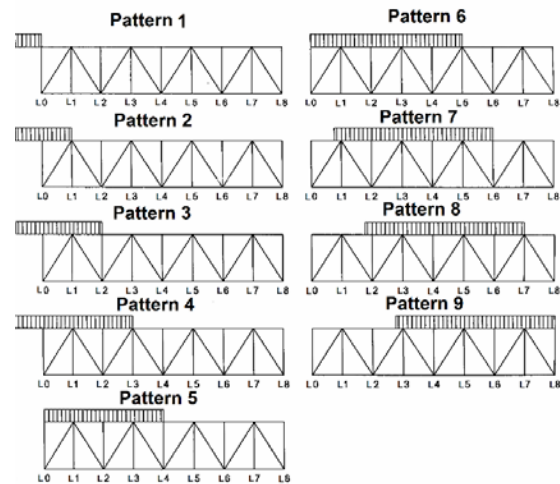


Fig. 5. Test loading patterns for span 0–1

Table 1

**Stress from the static load in the floor beam P0, MPa**

| No. of scheme | Check points |        |         |         |
|---------------|--------------|--------|---------|---------|
|               | 0 (in)       | 1 (in) | 2 (out) | 3 (out) |
| 1             | –20.2        | –27.4  | 30.6    | 6.7     |
| 2             | 1.9          | –21.2  | 23.1    | –4.2    |
| 3             | 3.4          | –47.1  | 42.0    | –5.7    |
| 4             | 3.9          | –41.5  | 36.8    | –8.9    |
| 5             | 19.3         | –40.1  | 31.6    | –16.0   |
| 6             | 13.0         | –63.7  | 49.5    | –3.8    |
| 7             | 37.6         | –32.5  | 17.4    | –22.6   |
| 8             | 31.3         | –22.6  | 12.5    | –18.1   |
| 9             | 29.4         | –18.9  | 10.7    | –14.3   |

The analysis shows that in addition to the vertical bending of the beam, there is a significant influence of the horizontal bending and torsion of floor beams arising from the joint work of the track way beams with the booms of the main trusses, both at the P0 beam and at other beams.

The bearing test guidelines [3] do not make it possible to determine the forces in the structural elements of the track way beam joints, as they use the design schemes in which the stringers are taken as simply supported, and the floor beams – as working only in bending in the vertical plane [6]. In fact, the stringers are continuous, and when subjected to a temporary load, they tend to turn around

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

the center of gravity. The rotation of the support sections of the stringers corresponds to the longitudinal displacements of their bottom surfaces and the same horizontal displacement of the attached top surfaces of the floor beams. Because of this, the floor beams work in horizontal bending with torsion and at the same time prevent the turns of the support sections of the stringers. The reason for this is the inclusion of stringers in joint work with the truss booms [1].

When the span is loaded with a vertical load, the compressed truss booms are shortened in each panel by a value of  $\delta$ . The presence of stringers, the length of which remains practically unchanged under the load, prevents the free movement of the floor beams, which are attached to the booms of the main trusses. The difference of displacements  $\Delta\delta$  of truss booms and the track way stringers causes bending of the floor beams in the horizontal plane.

The greatest bending moments in the horizontal plane occur in the extreme floor beams [1]. In the stringers the additional compressive forces appear, and in the booms of the main trusses the compressive forces are reduced. The bending of the stringers causes the torsion of the floor beams, as well as the rotations of the attachment points and the deformation of bends of the main truss booms in their plane. Bending corresponds to shear forces, which

decompose into longitudinal forces leading to the displacement of the points of the trusses.

When studying the stresses, the special attention was paid to the determination of stresses in the bottom flange angles of the stringers near their attachment to the floor beams, since it is in these zones that the basic disorders (cracks, looseness in support and attachment of beams) are concentrated. For this purpose, the short base strain gauges were pasted along the lower flange angles on the fillets of the stringers B1 and B2 at their junction points to the floor beam P4.

Loading of the span structure was carried out according to patterns 1–7 (Figure 5) with setting of the first axis of the locomotive every 5.5 m.

The stressed state of the track way beam elements of the staged connection is determined by the lateral force and the bending moment acting in this zone. The moment arises from the fact that the stringers are not continuous, and also due to the features of the stringer-beam intersection operation (presence of gaps in the support, fishplate wear, the leakage of the stiffener edges, etc.). The maximum stresses in the stringer-beam intersections occur when the span is loaded according to the pattern 9 and reach  $-136.4$  MPa in p.60. For all loading patterns, the highest experimental values of local stresses in the intersection of stringers B1, B2 with floor beam P4 are given in Table 2.

Table 2

**The highest stresses in the intersections of stringers B1 and B2 with floor beam P4 and stringer B1  
(panel 1-2), MPa**

| Loading patterns | B1<br>inner     |                 | B1<br>inner     |                 | B2<br>outer     |                 | B2<br>inner     |                 | B1<br>(panel 1-2) |        |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------|
|                  | $\sigma_{\max}$ | $\sigma_{\min}$ | $\sigma_{\max}$ | $\sigma_{\min}$ | $\sigma_{\max}$ | $\sigma_{\min}$ | $\sigma_{\max}$ | $\sigma_{\min}$ | top               | bottom |
| 1                | -34.2           | -2.5            | -4.1            | 0               | -5.3            | 0               | 9.2             | 2.9             | -2.5              | -8.9   |
| 2                | 40.0            | 2.5             | -2.2            | 0               | -4.3            | -0.4            | 10.6            | 4.8             | -16.8             | 10.4   |
| 3                | 38.4            | 0               | 4.1             | 0.4             | -2.1            | 0               | 12.1            | 2.4             | -29.1             | 4.9    |
| 4                | -101.0          | -0.8            | -15.3           | -0.4            | -7.8            | 0               | 14.9            | 3.3             | -23.7             | 12.8   |
| 5                | -126.9          | -19.2           | -40.2           | -0.4            | -12.8           | -1.4            | 17.3            | 1.4             | -14.8             | -4.4   |
| 6                | -132.0          | -18.3           | -30.7           | -5.4            | -14.8           | -2.5            | -19.3           | -0.9            | -35.5             | 5.9    |
| 7                | -133.0          | -16.7           | -31.2           | -4.5            | -13.1           | -2.1            | -19.8           | -2.9            | -28.1             | 19.7   |
| 8                | -116.0          | -19.5           | -33.7           | -7.6            | -13.6           | -0.5            | 26.5            | 7.4             | -14.1             | -8.6   |
| 9                | -136.4          | -6.1            | -34.9           | -5.2            | 14.4            | 0               | 27.8            | 5.9             | -11.5             | -11.8  |

Table 3

**The highest stresses in track way floor beams, MPa**

| Loading pattern | Floor beams |             |       |        |       |        |
|-----------------|-------------|-------------|-------|--------|-------|--------|
|                 | P0          |             | P2    |        | P4    |        |
|                 | top         | bottom      | top   | bottom | top   | bottom |
| 1               | –27.4       | (–6.1) 30.6 | –8.5  | 10.8   | –48.9 | –4.9   |
| 2               | –21.2       | –4.2        | –27.8 | 24.9   | –42.0 | –16    |
| 3               | –47.1       | –5.7        | –54.2 | 47.6   | –3.6  | –17.5  |
| 4               | –41.5       | –8.9        | –67.4 | 34.9   | –9.8  | –16.3  |
| 5               | –40.1       | –16.0       | –78.7 | 33.9   | –57.1 | –2.5   |
| 6               | –63.7       | –3.8        | –77.8 | 27.8   | –38.8 | –22.8  |
| 7               | 37.6        | 17.4        | –71.7 | 23.6   | 35.1  | 2.0    |
| 8               | 31.3        | 12.5        | –62.5 | 17.4   | –32.7 | 3.1    |
| 9               | 29.4        | 10.7        | –38.9 | 0.8    | –66.0 | –36.5  |

The stresses vary unevenly along the angles. The greatest stresses occur, as a rule, at the ends of the angles. In some cases, the maximum and local stresses in the angles were at a distance of 80–100 mm from the angle edges. In most cases, the change in stresses in the angles along their length is characterized by a change in the stress sign.

In addition to measurements of deformations (stresses) in the end floor beam P0, the stresses in the left stringer B1 in the panel 1–2 and in the floor beams P2 and P4 were determined during the tests.

According to the measurement results, in the stringer, in addition to stresses from the vertical bending moment, there are stresses from the action of other factors (horizontal bending, axial forces and torsion of the floor beam).

For the various loading patterns, the highest stresses in the intersections of the stringers B1 and B2 with the floor beam P4 and in the stringer B1 (panel 1–2) are shown in Table 2. The highest stresses in the floor beams P0, P2 and P4 obtained during testing are given in Table 3.

Axial compressive stresses in the stringers arise due to their joint work with the booms of the main trusses. This causes a bending in the horizontal direction of the floor beams. This is manifested the most for the floor beam P2 at its connection with the truss F1, and in the middle of the span of this

beam the effect of the horizontal bend is lower (see Table 3).

The maximum stresses from all the loads are recorded in the floor beam P2 at its connection with the truss F1 and amounted to –131.5 MPa at point 15 (pattern 9) and +105.3 MPa at point 17 (pattern 9).

In the stringer B1, the maximum stresses were recorded in the middle of panel 1–2 and amounted to –35.5 MPa at point 30 (pattern 6) and +19.7 MPa at point 33 (pattern 7) (see Fig. 3 and Fig. 5).

### Originality and practical value

Vertical deflections of the main trusses when the span structure was loaded with a movable load (two sections of locomotive TEZ + 4-axle loaded gondola cars) reached a value of 12.4 mm, 1/3500 *l<sub>p</sub>*. While testing the span under the train load, there are significant additional stresses from horizontal bending of floor beams and their torsion in the floor beam flanges. The appearance of these stresses is caused by inclusion of stringers into coupled work with top booms.

### Conclusions

Analysis of the experimental data obtained during the testing of the track way beams allows drawing the following conclusions.

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

The stressed state of the floor beams P0, P2, P4 is determined mainly by vertical bending. Stresses from horizontal bending and torsion appear from the joint work of the track way beams with the booms of the main trusses.

The most significant stresses are obtained from the horizontal bending in the floor beam P2 at the point of its connection to the truss F1. The highest stress values here are obtained in the angle of the top boom P2 at point 15 when the span is loaded according to the pattern 9. In a greater degree the horizontal bending of the floor beams affects the stress values in the horizontal webs of the top flange angles with which the floor beams are attached to the gusset plates of the upper longitudinal ties between the main trusses. Here, the effect is that the span structures installed on this bridge have very small distance from the stringer axis to its connection to the truss.

A high level of stresses in the top flanges of the floor beams explains the appearance of a crack in the horizontal web of the top flange angle in the section between the stringer and the truss [9, 11, 15].

The stress state in the middle of the panel 1–2 of the stringer B1, where during the tests the measurements were performed, is relatively low. Here the stress values are no more than 30–40 MPa.

In those places where the cracks have already appeared it was not possible to measure the stresses. The measurements were taken mainly at the points of support of the stringers on the floor beam P4, where cracks in the bottom flange angles of the stringers were not observed during inspection. In these places, a detailed study of the stress state was carried out. The strain gauges were pasted at 32 points on the fillets at the ends of the bottom flange angles on both sides of each stringer every 80–100 mm.

Stresses in the angles proved to be very high (up to 136.4 MPa). It should be noted that the connection of stringers with a floor beam P4, obviously, is not the most stressful point, because in this place, instead of the stringer bottom angle fish-plates there are extended gusset plates for break connections. This is particularly significant as the design of the span structures did not include the checks of the stresses in these places. In other connections, where cracks are already observed in the angles the stresses appeared to be even higher.

All this indicates that the design of the intersection between the track way beams and the staged arrangement of the stringers and floor beams applied on the bridge is unsuccessful and requires an increase in the reliability of the joint structures.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бычковский, Н. Н. Металлические мосты / Н. Н. Бычковский, А. Ф. Данковцев ; Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2005. – Ч. 1. – 364 с.
2. Гибаленко, А. Н. Оценка живучести металлоконструкций при моделировании факторов эксплуатации / А. Н. Гибаленко, Т. С. Трофимчук // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 2 (62). – С. 119–128. doi: 10.15802/stp2016/67327.
3. ГСТУ 32.6.03.111-2002. Експлуатація залізничних мостів. Правила визначення вантажопідйомності металевих прогонових будов залізничних мостів. – Чинний від 2001–12–05. – Київ : М-во трансп. України, 2003. – 382 с.
4. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Навантаження і впливи. – Чинний від 2009–11–11. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 83 с.
5. ДБН В.2.3-6:2009. Мости та труби. Обстеження і випробування. – Чинний від 2009–11–11. – Київ : М-во регіон. розвитку та буд-ва України, 2009. – 43 с.
6. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. – Чинний від 2007–02–01. – Київ : М-во буд-ва, архітектури та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
7. Ефимов, П. П. Проектирование мостов / П. П. Ефимов. – Омск : Дантэя, 2006. – 111 с.
8. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах / Гол. упр. колійн. госп-ва Укрзалізниця. – Київ : М-во трансп. України, 2002. – 301 с.
9. Ключник, С. В. Опыт эксплуатации эстажной проезжей части / С. В. Ключник, В. В. Марочка // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : тез. докл. 72 Междунар. науч.-практ. конф. / Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2012. – С. 158.

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

10. Ключник, С. В. Обзор вариантов усиления та ремонту балок проїзної частини поверхового типу / С. В. Ключник, В. В. Марочка // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 5. – С. 35–40.
11. Пат. 109806 Україна, МПК Е 01 D 1/00, Е 01 D 19/00, Е 01 D 101/30. Вузол спирання поздовжньої балки на поперечну / Марочка Віталій Владиславович, Ключник Сергій Владиславович ; заявник та патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № u 2016 01940 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.
12. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин [Electronic resource] : зб. наук. ст. / Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. – Київ, 2015. – 816 с. – Available at: <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations/resurs2015>. – Title from the screen. – Accessed : 29.05.2017.
13. Шульман, З. А. Испытания и мониторинг инженерных сооружений / З. А. Шульман, И. З. Шульман. – Днепропетровск, ЛИРА, 2013. – 536 с.
14. Gibalenko, A. N. Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard / A. N. Gibalenko, V. Korolov, J. Filatov // Aktualnie problemy konstrukcji metalowych : Abstr. II Polish-Ukrainian International Conference APMK (27.11– 28.11.2014) / University of Technology. – Gdansk, 2014. – P. 98–102.
15. Ovchinnikov, P. Sing of finite element modeling for determination of buckling possibility in lengthwise stiffeners of orthotropic plate for bridge spans under operational load / P. Ovchinnikov, S. Klyuchnik // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 5. – С. 130–135.
16. Rust, I. Sicherheit technischer Anlagen – Eine sozial wissenschaftliche Analyse des Umgangs mit Risiken in Ingenieurpraxis und Ingenieurwissenschaft / Ina Rust ; Kassel university. – Kassel, 2004. – 394 p.
17. Weltshev, M. Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage / M. Weltshev, S. Schwarzer, F. Otremba // Chemical Engineering Transactions. – 2013. – Vol. 31. – P. 559–564. doi: 10.3303/CET1331094.

С. В. КЛЮЧНИК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГНДЛ штучних споруд, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. пошта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

## ДЕФОРМАЦІЙНО-НАПРУЖЕНИЙ СТАН ВУЗЛА ПОВЕРХОВОГО СПОЛУЧЕННЯ БАЛОК ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТА

**Мета.** Поверхове сполучення балок проїзної частини залізничних мостів найбільш просте по конструкції, але внаслідок конструктивних недоліків утворюються численні дефекти. Метою даної роботи є дослідження фактичного деформаційно-напруженого стану вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними при їх поверховому розташуванні. Необхідно також визначити можливий вплив спільної роботи поясів ферм та балочної клітки мостового полотна на їх деформаційно-напружений стан. **Методика.** Для досягнення поставленої мети проведено випробування існуючого моста. Для вимірювання деформацій (напружень) в елементах прогонової будови використовувалися тензорезистори, наклеєні на поясних кутиках поперечних і поздовжніх балок та на викружках нижніх поясних кутиків поздовжніх балок у місцях обпирання їх на поперечні балки. Для вимірювання прогинів ферм, поздовжніх та поперечної балок при статичних випробуваннях використовувалися прогиноміри Аїстова і Максимова, які встановлювалися по нижніх поясах ферм у середині прогону 0–1, а також на обох поздовжніх та однією поперечною балках із середини прольоту. Прогиніоміри кріпилися до прогінної будови та з'єднувалися дротяними зв'язками з поверхнею ґрунту. **Результати.** Автором отримано і проаналізовано деформаційно-напружений стан вузла сполучення поздовжніх балок із поперечними при їх поверховому розташуванні. Аналіз показує, що крім вертикального вигину балок має місце значний вплив горизонтального вигину поперечних балок та їх крутіння, що виникають внаслідок спільної роботи балок проїзної частини з верхніми поясами головних ферм, як у балки П0, так і в інших балок. **Наукова новизна.** У роботі проведено дослідження напружено-деформованого стану мета-

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

левих балок проїзної частини поверхового розташування з урахуванням спільної роботи балок із несучими фермами. **Практична значимість.** При випробуванні прогонової будови поїзним навантаженням у поясах поперечних балок з'являються значні додаткові напруги від горизонтального вигину поперечних балок та їх крутіння. Поява цих напружень пов'язана з включенням поздовжніх балок у спільну роботу з верхніми поясами ферм. Виникаючі дефекти в поздовжніх балках пов'язані з концентрацією місцевих напружень через конструктивні особливості поверхової проїзної частини.

*Ключові слова:* поздовжні балки; деформація; напруження; поперечні балки; металеві прогонові будови

С. В. КЛЮЧНИК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>ОНИЛ искусственных сооружений, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (050) 667 40 49, ел. почта ssser05@ukr.net, ORCID 0000-0001-7771-8377

## ДЕФОРМАЦИОННО-НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ УЗЛА ЭТАЖНОГО СОПРЯЖЕНИЯ БАЛОК ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МОСТА

**Цель.** Этажное сопряжение балок проезжей части железнодорожных мостов наиболее простое по конструкции, но вследствие конструктивных недостатков подвержено многочисленным дефектам. Целью данной работы является исследование фактического деформационно-напряженного состояния узла сопряжения продольных балок с поперечными при их этажном расположении. Необходимо также определить возможное влияние совместной работы поясов ферм и балочной клетки мостового полотна на их деформационно-напряженное состояние. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведены испытания существующего моста. Для измерения деформаций (напряжений) в элементах пролетного строения использовались тензорезисторы, наклеенные на поясных уголках поперечных и продольных балок и на выкружках нижних поясных уголков продольных балок в местах опирания их на поперечные балки. Для измерения прогибов ферм, продольных и поперечной балок при статических испытаниях использовались прогибомеры Аистова и Максимова, которые устанавливались по нижним поясам ферм в середине пролетного строения 0–1, а также на обеих продольных и одной поперечной балках в середине пролета. Прогибомеры крепились к пролетному строению и соединялись проволочными связями с поверхностью грунта. **Результаты.** Автором получено и проанализировано деформационно-напряженное состояние узла сопряжения продольных балок с поперечными при их этажном расположении. Анализ показывает, что помимо вертикального изгиба балок имеет место значительное влияние горизонтального изгиба поперечных балок и их кручения, возникающие вследствие совместной работы балок проезжей части с верхними поясами главных ферм, как у балки П0, так и у других балок. **Научная новизна.** В работе проведено исследование напряженно-деформационного состояния металлических балок проезжей части этажного расположения с учетом совместной работы балок с несучими фермами. **Практическая значимость.** При испытании пролетного строения поездной нагрузкой в поясах поперечных балок появляются значительные дополнительные напряжения от горизонтального изгиба поперечных балок и их кручения. Появление этих напряжений связано с включением продольных балок в совместную работу с верхними поясами ферм. Возникающие дефекты в продольных балках связаны с концентрацией местных напряжений из-за конструктивных особенностей этажной проезжей части.

*Ключевые слова:* продольные балки; деформация; напряжения; поперечные балки; металлические пролетные строения

### REFERENCES

1. Bychkovskiy, N. N., & Dankovtsev, A. F. (2005). *Metallicheskiye mosty*. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.
2. Gibalenko, O. M., & Trofymchuk, T. S. (2016). Metal structures survivability assessment when simulating service conditions. *Science and Transport Progress*, 2(62), 119-128. doi: 10.15802/stp2016/67327
3. Ekspluatatsiia zaliznychnykh mostiv. Pravyla vyznachennia vantazhopidomnosti metalevykh prohonovykh sporud zaliznychnykh mostiv, GSTU 32.6.03.111-2002 (2003).
4. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Navantazhennia i vplyvy, DBN V.1.2-15:2009 (2009).
5. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Obstezhennia ta vyprobuвання, DBN V.2.3-6:2009 (2009).

## ТРАНСПОРТЕ БУДІВНИЦТВО

6. Sporudy transportu. Mosty ta truby. Pravyla proektuvannia, DBN V.2.3-14:2006 (2006).
7. Yefimov, P. P. (2006). *Proektirovaniye mostov*. Omsk: Danteya.
8. Ukrzaliznytsia. (2002). Instruktsiia z vyznachennia umov propusku rukhomoho skladu po metalevykh ta zalizobetonnykh zaliznychnykh mostakh. Kyiv: Ministry of Infrastructure of Ukraine.
9. Kliuchnyk, S. V., & Marochka, V. V. (2012). Opyt ekspluatatsii etazhnoy proezzhey chasti. *Proceedings of the 72 International Scientific & Practical Conference «Problems and Prospects of Railway Transport Development», April 19-20, 2012, Dnipropetrovsk*. 158.
10. Kliuchnyk, S. V., & Marochka, V. V. (2014). Review of enhancement and repair options for roadway beams of two-level type. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 35-40.
11. Marochka, V. V., & Kliuchnyk, S. V. (2016). *UA Patent No.109806*. Ukrainian Intellectual Property Institute (UKRPATENT).
12. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. (2015). *Service life and safety of structures, buildings and machinery*. Kyiv: Paton Publishing House. Retrieved from <http://patonpublishinghouse.com/rus/compilations/resurs2015>
13. Shulman, Z. A., & Shulman, I. Z. (2013). *Ispytaniya i monitoring inzhenernykh sooruzheniy*. Dnipropetrovsk: LIRA.
14. Gibalenko, A. N., Korolov, V., & Filatov, J. (2014). Design requirements to structural steel durability based on level of industrial facility corrosion hazard. *Proceedings of the II Polish-Ukrainian International Conference Aktualnie problemy konstrukcji metalowych (APMK), November, 27-28, 2014, Gdansk*. Gdansk: University of Technology.
15. Ovchinnikov, P., & Kliuchnyk S. (2014). Using of finite element modeling for determination of buckling possibility in lengthwise stiffeners of orthotropic plate for bridge spans under operational load. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 130-135.
16. Rust, I. (2004). *Sicherheit technischer Anlagen – Eine sozial wissenschaftliche Analyse des Umgangs mit Risiken in Ingenieurpraxis und Ingenieur wissenschaft*. (Doctoral dissertation). Kassel University, Germany.
17. Weltshev, M., Schwarzer, S., & Otremba, F. (2013). Comparison of the operating life of tank containers, tank vehicles and rail tank cars for the carriage of dangerous goods in practice, analysis of causes of damage. *Chemical Engineering Transactions*, 31, 559-564. doi: 10.3303/CET1331094

*Prof. V. D. Petrenko, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. V. Ye. Volkova, D. Sc. (Tech.), (Ukraine)*  
recommended this article to be published

Received: Feb. 10, 2017

Accessed: May 17, 2017

## UDC 693.554.6

A. V. RADKEVYCH<sup>1</sup>, A. M. NETESA<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Dep. «Build Production and Geodesy», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (098) 307 81 44, e-mail kvp@dsst.gov.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517<sup>2\*</sup>Dep. «Build Production and Geodesy», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 195 50 27, e-mail andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0002-3364-3446**DETERMINATION AND RANGING OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS THAT DEFINE THE RATIONAL DECISIONS OF RE-BARS CONNECTION**

**Purpose.** The paper proposes: 1) determination and formulation of factors that influence the choice of rational method for joining re-bars of vertical support members of reinforced concrete frame; 2) determination of factor parameters; 3) ranging of factors by the expert evaluation (Delphi) method. **Methodology.** In order to achieve research objectives, it is necessary to carry out analysis of existent rebar connection methods, determination of factors and parameter variation limits for each of the methods. Performing factor ranking by the expert evaluation method. **Findings.** The results of the questioning materials of 14 experts in the area of monolithic construction allowed setting the following: when choosing the rational re-bars connections, the most significant values are the factors that define the time parameters: possibility of carcassing, time of joining the re-bars, length of rebar cage, prior operation run time, operation time of main lifting equipment. Herewith the factors that define the rebar cage parameters have a direct relation to the work performance time, as they determine the amount of bar connections in the course of building erection over wide range. Economic factors – rebar connection cost and quality control cost – have the less value. It is obvious that in the conditions of considerable construction expenses it is advantageous for an investor to increase the rebar joining cost for the work growth rate. Structural and technological factors have the least value: origin of eccentric load transmission between re-bars, possibility of use of the thermally work-hardened re-bars of A500 and higher grades, work category for implementation of works, necessity to use the scaffold and appurtenances for re-enforcement of constructions. The reason is analogical: a contractor is ready to go to complication of technology with the purpose of reduction of the facility erection terms. As the calculated Pearson's matching criterion  $\chi^2 = 47.24$  is higher than the tabular one (22.36203), then the obtained concordance coefficient  $W=0.26$  is not casual value, and that is why the obtained results make sense and can be used in further researches. **Originality.** The author obtained factors that influence the choice of the rational method for re-bars connection the most. **Practical value.** Ranging of factors will allow objective approaching to the problem of choice of re-bars connection method, optimizing the labour and material costs, and also reducing the construction time.

*Keywords:* re-bars; connection; expert evaluation; rank; factor; ranking; concordance coefficient

**Introduction**

Statistical analysis of buildings and structures in Ukraine found that one of the constructive types of engineering development is monolithic frame systems.

One of the main technological operations of the erection of such buildings is the production of re-bar cages. Modern technological methods involve joining reinforcing bars of the cages by welding or lapping. Recently there have been spread mechanical connections of reinforcing bars with the help of

threaded or crimp clutches. The presence of such a large choice of methods complicates the task of finding a rational method of joining re-bars for a particular facility, leads to rise in the construction cost and slows down the construction of the reinforced concrete frame of the building.

**Problem statement**

In the modern construction in the territory of Ukraine, various types and methods of connections are used to connect the re-bars. The use of this or that method of connection is usually the preroga-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

tive of the contractor and depends only on the equipment available to the customer. It is possible to change the connection method depending on the design requirements of regulatory documents, for example, using a lap joint in areas with seismic activity. When trying to determine the rational way of connecting, a specialist faces a number of factors that influence his choice, but it is difficult to evaluate the factors by significance. The inability to identify a more significant factor complicates the assessment, which results in a waste of resources and shorter construction time. It is necessary to assess the main factors and perform the ranking.

#### **Analysis of recent research and identification of unsolved problems.**

The method of re-bars connection is an important parameter in the construction of the building frame, but the method of choosing a rational method of connection is practically not covered in the literature. The regulatory documents [2, 3] contain only the list of admissible methods of re-bars connection – lapping, welding, mechanical connections. But there is no method of choosing between them. Traditionally, the designer chooses a necessary connection way based on the design experience, often also taking into account the cost of the connection or the speed of its execution. However, quality control is rarely taken into account, in particular its complexity for welded joints [4-6]. Due to the wide spread of various types of joints, designers and builders often do not take into account the mechanical methods of joining. But their use often leads to a significant acceleration of the process of erecting the building and reducing its cost. Thus, it is necessary to have a methodology for a comprehensive assessment of existing ways of rebar joining and selecting the most rational one for a particular project.

#### **Purpose**

To determine the factors that influence the choice of the rational method for re-bars connection the most. To perform factor ranking by the expert evaluation method.

#### **Methodology**

Analysis of advantages and disadvantages of the existing connection technology for reinforcing bars. Determination of key factors peculiar for a particular re-bars connection method. Performing factor ranking by the expert evaluation method.

#### **Findings**

There were selected 14 factors influencing the choice of a rational way of rebar joining. The names and rationales for each of them are presented below.

1. The length of the rebar cage is one of the most important parameters of the erection technology of vertical supporting structures [8, 9]. The cage length influences the total number of bar connections over the building height. The minimum height of the cage is 3 m (when connecting the re-bars with bath welding, and also when connecting with threaded or crimped clutches with reinforcement by individual bars). The maximum length of the cage can be 9 m when reinforcing with frames with a sufficient diameter of the longitudinal bars (32 mm and above).

2. The connection time of the reinforcing bars makes for the total time required to perform the connections. Since the re-bars connection is carried out on the mounting horizon, the connection time determines the early start of the next erection of formwork members. The parameter of this factor varies in the interval from 1 min (lap joint, connection by threaded couplings) to 60 min (bath-welded welding for re-bars of 40 mm in diameter).

3. The time for performance of quality control is also a component of the time required to perform the connections and depends on the quality control method and the connection type [7]. For most types of re-bars connections, a combination of several control methods is used, both for each connection and for a sample. Total time for performance of quality control in terms of one bar can be from 1 to 10 minutes.

4. The cost of the re-bars connection includes the cost of consumables (forgings and bath welding electrodes, threaded and crimp clutches for mechanical connections), as well as the cost of energy resources for making connections. The cost of re-bars connection with lap joint includes the re-bars expenditure for overlapping. The numerical

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

value of the parameter is from 60 to 220 UAH, depending on the type of connection and the diameter of the re-bars.

5. The cost of the connection quality control is in the range from 6 UAH (lap joint) to 92 UAH (bath welding).

6. The time for the completion of the preparatory operations (including the manufacture of the cage when reinforcing with cages) is one of the most important parameters for determining the labour costs and the timing required for the re-bars of the structures. Since the preparatory operations can be carried out on the reinforcement pad separately from the main construction process, often using a separate lifting mechanism, conducting operations during the preparatory period is an important way to reduce the time required to perform the connections. When reinforcing with individual bars the preparatory operations include only the cutting of the re-bars for a given length and making the clamps, while the cage assembly is made at the stage of performing the connection.

7. The work category for performing the connection determines the necessary qualifications of the workers. The need to reduce the average work category is evident. It lies in the range from 3 to 6; the latter value is indicated for bath welding of the re-bars.

8. The operating time of the main load-lifting mechanism determines the degree of stoppage of other construction processes performed in parallel with the process of reinforcing of vertical support members. One of the most common methods of joining re-bars in Ukraine with bath welding requires about 5-15 minutes of crane operation for each reinforcing bar in the cage. Often it is these time costs that determine the maximum number of welded bars during the work shift.

9. Ability to mount the cage actually reflects the possibility of making major labour-intensive operations at the stage of preparatory work. Reinforcement with pre-assembled cages significantly reduces labour costs directly on the mounting horizon.

10. The possibility of using the re-bars connection method in seismic areas is a key factor in the design phase of a building. Until recently, in the territory of Ukraine in the seismic regions (Crimea), as well as for dynamically loaded structures,

only the lap joint was used, which led to a significant re-arming of the elements, the appearance of eccentricity in the load transfer between the bars and the reduction of the protective layer [11-13].

11. Occurrence of eccentric force transfer between reinforcing bars. Actual for non-axial bar joints (lapping, some types of welding); it leads to the appearance of eccentricities, an increase in the required number of re-bars [10].

12. The possibility of using thermally work-hardened re-bars of A500 and higher grades is actual for the construction of high-rise buildings with 22 floors and higher. Such re-bars cannot be welded, and the use of low grade re-bars leads to an increase in the cross section of the element. When using thermally work-hardened re-bars of large diameters, the lap joint is economically inefficient. It is also necessary to consider the need for joining non-metallic re-bars [1].

13. The possibility of dismantling the rebar cage and reusing the connecting elements becomes an important parameter when the mounted cage is damaged during quality control or at the stage of the formwork installation. The re-bars lap joining, as well as the connection with threaded couplings, allows quickly dismantling the cage, mounting a new one and conducting further work without delaying the main process of erecting a monolithic frame of the building.

14. The need to use scaffolds (reinforcement of vertical supporting members with individual bars) and additional lifting mechanisms (rebar connection with crimp clutches) leads to an increase in labour costs and the time required to carry out work, as well as to the occurrence of dangerous factors associated with longer periods of people's presence at altitude. It is especially important when reinforcing elements located at the edges of the building, in particular for external reinforcing bars.

The ranking of factors will be carried out by the expert assessment method. For the assessment there were selected 14 experts in the field of monolithic construction: scientists, engineers, superintendents and heads of construction organizations. Each specialist received a questionnaire, where 14 factors were indicated. For each factor, the dimensionality and the parameter variation limits were given for better understanding of the factor value. The list of factors and their parameters is given in Table 1.

Table 1

**Factors influencing the choice of rational rebar connection method**

| №  | Factors                                                                                | Dimension | Parameter variation limits | Rank |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------|------|
| 1  | Length of rebar cage                                                                   | m         | 3 – 9                      |      |
| 2  | Rebar connection time                                                                  | min       | 1 – 60                     |      |
| 3  | Connection quality control time                                                        | min       | 1 – 10                     |      |
| 4  | Rebar connection cost                                                                  | UAH       | 60 – 220                   |      |
| 5  | Connection quality control time                                                        | UAH       | 6 – 92                     |      |
| 6  | Execution time for preparatory operations (including the fabrication of the cage)      | min       | 1 – 20                     |      |
| 7  | Work category for connection execution                                                 |           | 3 – 6                      |      |
| 8  | Working time of the main lifting mechanism                                             | min       | 1 – 30                     |      |
| 9  | Possibility of carcassing                                                              | –         | Yes/No                     |      |
| 10 | Possibility of application in seismic regions                                          | –         | Yes/No                     |      |
| 11 | Occurrence of eccentric load transfer between re-bars                                  | –         | Yes/No                     |      |
| 12 | Possibility of using thermally work-hardened re-bars of A500 and higher grades         | –         | Yes/No                     |      |
| 13 | Possibility of dismantling the rebar cage and reusing the connecting elements          | –         | Yes/No                     |      |
| 14 | Need to use scaffolds and additional lifting mechanisms for reinforcing the structures | –         | Yes/No                     |      |

Experts were asked to rank factors by assigning a rank to each factor, where rank 1 has the most significant factor, and rank 14 has the least significant one. In addition, the experts were asked, if necessary, to add factors that, in their opinion, are not available in the table, and to conduct the ranking taking into account the additional factors.

Based on the questionnaire data, a consolidated

ranking matrix was compiled (Table 2). The consolidated ranking matrix includes all 14 factors proposed by experts for the assessment. None of the experts added their own factor, which indicates a complete and universal coverage of the parameters. The ranking matrix with deviations is shown in Table 3.

Table 2

**Consolidated ranking matrix**

| № of sub-item.<br>Experts | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| 1                         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1                         | 9 | 6 | 8 | 8 | 2 | 5 | 4 | 1 | 3  | 3  | 2  | 1  | 14 | 8  |
| 2                         | 1 | 7 | 3 | 3 | 3 | 6 | 8 | 7 | 4  | 4  | 4  | 4  | 2  | 4  |

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

End of table 2

| № of sub-item.<br>Experts | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 3                         | 6  | 10 | 6  | 2  | 10 | 12 | 12 | 5  | 7  | 8  | 7  | 5  | 10 | 3  |
| 4                         | 5  | 8  | 13 | 14 | 9  | 9  | 15 | 3  | 11 | 1  | 8  | 2  | 1  | 5  |
| 5                         | 7  | 14 | 2  | 1  | 8  | 11 | 13 | 10 | 12 | 9  | 9  | 7  | 3  | 6  |
| 6                         | 2  | 9  | 4  | 4  | 4  | 8  | 5  | 6  | 1  | 5  | 13 | 3  | 4  | 9  |
| 7                         | 3  | 13 | 14 | 7  | 11 | 7  | 11 | 4  | 8  | 11 | 14 | 8  | 9  | 14 |
| 8                         | 4  | 11 | 1  | 5  | 5  | 10 | 6  | 9  | 9  | 6  | 1  | 6  | 7  | 7  |
| 9                         | 8  | 5  | 5  | 6  | 6  | 4  | 2  | 2  | 2  | 7  | 3  | 9  | 5  | 1  |
| 10                        | 12 | 3  | 12 | 13 | 12 | 3  | 10 | 13 | 14 | 2  | 10 | 10 | 11 | 11 |
| 11                        | 11 | 1  | 11 | 12 | 13 | 2  | 3  | 8  | 13 | 13 | 6  | 11 | 12 | 2  |
| 12                        | 13 | 2  | 10 | 11 | 7  | 1  | 7  | 12 | 10 | 10 | 5  | 12 | 13 | 10 |
| 13                        | 14 | 4  | 9  | 10 | 14 | 14 | 14 | 14 | 6  | 14 | 12 | 13 | 6  | 13 |
| 14                        | 10 | 12 | 7  | 9  | 1  | 13 | 9  | 11 | 5  | 12 | 11 | 14 | 8  | 12 |

Table 3

## Matrix of ranks

| Factors / Experts | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | Rank<br>sum | d   | d2   |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------------|-----|------|
| x <sub>1</sub>    | 9  | 6  | 8  | 8  | 2  | 5  | 3  | 1  | 3  | 3  | 2  | 1  | 14 | 8  | 73          | -32 | 1024 |
| x <sub>2</sub>    | 1  | 7  | 3  | 3  | 3  | 6  | 7  | 7  | 4  | 4  | 4  | 4  | 2  | 4  | 59          | -46 | 2116 |
| x <sub>3</sub>    | 6  | 10 | 6  | 2  | 10 | 12 | 11 | 5  | 7  | 8  | 7  | 5  | 10 | 3  | 102         | -3  | 9    |
| x <sub>4</sub>    | 5  | 8  | 13 | 14 | 9  | 9  | 14 | 3  | 11 | 1  | 8  | 2  | 1  | 5  | 103         | -2  | 4    |
| x <sub>5</sub>    | 7  | 14 | 2  | 1  | 8  | 11 | 12 | 10 | 12 | 9  | 9  | 7  | 3  | 6  | 111         | 6   | 36   |
| x <sub>6</sub>    | 2  | 9  | 4  | 4  | 4  | 8  | 4  | 6  | 1  | 5  | 13 | 3  | 4  | 9  | 76          | -29 | 841  |
| x <sub>7</sub>    | 3  | 13 | 14 | 7  | 11 | 7  | 10 | 4  | 8  | 11 | 14 | 8  | 9  | 14 | 133         | 28  | 784  |
| x <sub>8</sub>    | 4  | 11 | 1  | 5  | 5  | 10 | 5  | 9  | 9  | 6  | 1  | 6  | 7  | 7  | 86          | -19 | 361  |
| x <sub>9</sub>    | 8  | 5  | 5  | 6  | 6  | 4  | 1  | 2  | 2  | 7  | 3  | 9  | 5  | 1  | 64          | -41 | 1681 |
| x <sub>10</sub>   | 12 | 3  | 12 | 13 | 12 | 3  | 9  | 13 | 14 | 2  | 10 | 10 | 11 | 11 | 135         | 30  | 900  |

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

End of table 3

| Factors / Experts | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | Rank sum | d  | d2    |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|----|-------|
| x <sub>11</sub>   | 11  | 1   | 11  | 12  | 13  | 2   | 2   | 8   | 13  | 13  | 6   | 11  | 12  | 2   | 117      | 12 | 144   |
| x <sub>12</sub>   | 13  | 2   | 10  | 11  | 7   | 1   | 6   | 12  | 10  | 10  | 5   | 12  | 13  | 10  | 122      | 17 | 289   |
| x <sub>13</sub>   | 14  | 4   | 9   | 10  | 14  | 14  | 13  | 14  | 6   | 14  | 12  | 13  | 6   | 13  | 156      | 51 | 2601  |
| x <sub>14</sub>   | 10  | 12  | 7   | 9   | 1   | 13  | 8   | 11  | 5   | 12  | 11  | 14  | 8   | 12  | 133      | 28 | 784   |
| Σ                 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 1470     |    | 11574 |

The sums over the matrix columns are equal to each other and to the checksum; therefore, the matrix is correctly formed.

Next, we place the factors by significance (Table 4).

Table 4

## Location of factors by significance

| Factors         | Rank sum |
|-----------------|----------|
| x <sub>2</sub>  | 59       |
| x <sub>9</sub>  | 64       |
| x <sub>1</sub>  | 73       |
| x <sub>6</sub>  | 76       |
| x <sub>8</sub>  | 86       |
| x <sub>3</sub>  | 102      |
| x <sub>4</sub>  | 103      |
| x <sub>5</sub>  | 111      |
| x <sub>11</sub> | 117      |
| x <sub>12</sub> | 122      |
| x <sub>7</sub>  | 133      |
| x <sub>14</sub> | 133      |
| x <sub>10</sub> | 135      |
| x <sub>13</sub> | 156      |

Now we will assess the average degree of consistency of opinions of all experts. To do this, we

calculate the matching factor using the following formula:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)},$$

where  $S = 11574$ ,  $n = 14$ ,  $m = 14$ .

$$W = \frac{12 \cdot 11574}{14^2(14^3 - 14)} = 0.26.$$

$W = 0.26$  indicates a weak degree of consistency between the opinions of experts.

Next, we estimate the significance of the matching factor. For this purpose, we calculate the Pearson's matching criterion:

$$x^2 = \frac{12S}{mn(n+1)},$$

$$x^2 = \frac{12 \cdot 11574}{14 \cdot 14(14+1)} = 47.24.$$

The computed  $x^2$  is compared to the tabulated value for the number of degrees of freedom  $K = n - 1 = 14 - 1 = 13$  and for a given significance level  $\alpha = 0.05$ .

Since  $x^2$  is estimated 47.24 more than the tabular one (22.36203), then  $W = 0.26$  is not a random variable, and therefore the obtained results make sense and can be used in further studies.

On the basis of obtaining the rank sum (Table 4), we can calculate the weight indices of the parameters considered. The polling matrix is trans-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

formed into the matrix of transformed ranks according to the formula:

$$s_{ij} = x_{\max} - x_{ij},$$

where  $x_{\max} = 15$ . The matrix of transformed ranks is shown in Table 5.

Table 5

Matrix of transformed ranks

| № of sub-item.<br>Experts | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | $\Sigma$ | Weight $\lambda$ |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----------|------------------|
| 1                         | 6  | 9  | 7  | 7  | 13 | 10 | 11 | 14 | 12 | 12 | 13 | 14 | 1  | 7  | 136      | 0.0934           |
| 2                         | 14 | 8  | 12 | 12 | 12 | 9  | 7  | 8  | 11 | 11 | 11 | 11 | 13 | 11 | 150      | 0.103            |
| 3                         | 9  | 5  | 9  | 13 | 5  | 3  | 3  | 10 | 8  | 7  | 8  | 10 | 5  | 12 | 107      | 0.0735           |
| 4                         | 10 | 7  | 2  | 1  | 6  | 6  | 0  | 12 | 4  | 14 | 7  | 13 | 14 | 10 | 106      | 0.0728           |
| 5                         | 8  | 1  | 13 | 14 | 7  | 4  | 2  | 5  | 3  | 6  | 6  | 8  | 12 | 9  | 98       | 0.0673           |
| 6                         | 13 | 6  | 11 | 11 | 11 | 7  | 10 | 9  | 14 | 10 | 2  | 12 | 11 | 6  | 133      | 0.0913           |
| 7                         | 12 | 2  | 1  | 8  | 4  | 8  | 4  | 11 | 7  | 4  | 1  | 7  | 6  | 1  | 76       | 0.0522           |
| 8                         | 11 | 4  | 14 | 10 | 10 | 5  | 9  | 6  | 6  | 9  | 14 | 9  | 8  | 8  | 123      | 0.0845           |
| 9                         | 7  | 10 | 10 | 9  | 9  | 11 | 13 | 13 | 13 | 8  | 12 | 6  | 10 | 14 | 145      | 0.0996           |
| 10                        | 3  | 12 | 3  | 2  | 3  | 12 | 5  | 2  | 1  | 13 | 5  | 5  | 4  | 4  | 74       | 0.0508           |
| 11                        | 4  | 14 | 4  | 3  | 2  | 13 | 12 | 7  | 2  | 2  | 9  | 4  | 3  | 13 | 92       | 0.0632           |
| 12                        | 2  | 13 | 5  | 4  | 8  | 14 | 8  | 3  | 5  | 5  | 10 | 3  | 2  | 5  | 87       | 0.0598           |
| 13                        | 1  | 11 | 6  | 5  | 1  | 1  | 1  | 1  | 9  | 1  | 3  | 2  | 9  | 2  | 53       | 0.0364           |
| 14                        | 5  | 3  | 8  | 6  | 14 | 2  | 6  | 4  | 10 | 3  | 4  | 1  | 7  | 3  | 76       | 0.0522           |
| Total                     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1456     | 1                |

Now we transform the original table for expert assessment of the significance of factors influencing the choice of a rational rebar connection method, taking into account the transformed ranks. To do this, we put the resulting transformed ranks for

each factor in the initial table (Table 5). Next, we sort the factors by the rank value, from higher to lower one. Thus, we get a list of ranked factors, where the ordinal number of the factor determines the degree of its importance.

Table 6

Significance of factors influencing the choice of rational method for joining longitudinal re-bars

| № | Factors                   | Dimension | Parameter variation limits | Rank   |
|---|---------------------------|-----------|----------------------------|--------|
| 1 | 2                         | 3         | 4                          | 5      |
| 1 | Rebar connection time     | min       | 1 – 60                     | 0.103  |
| 2 | Possibility of carcassing | –         | Yes/No                     | 0.0996 |
| 3 | Length of rebar cage      | m         | 3 – 9                      | 0.0934 |

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

End of table 6

| №  | Factors                                                                                | Dimension | Parameter variation limits | Rank   |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------|--------|
| 4  | Execution time for preparatory operations                                              | min       | 1 – 20                     | 0.0913 |
| 5  | Working time of the main lifting mechanism                                             | min       | 1 – 30                     | 0.0845 |
| 6  | Connection quality control time                                                        | min       | 1 – 10                     | 0.0735 |
| 7  | Rebar connection cost                                                                  | UAH       | 60 – 220                   | 0.0728 |
| 8  | Connection quality control cost                                                        | UAH       | 6 – 92                     | 0.0673 |
| 9  | Occurrence of eccentric load transfer between re-bars                                  | –         | Yes/No                     | 0.0632 |
| 10 | Possibility of using thermally work-hardened re-bars of A500 and higher grades         | –         | Yes/No                     | 0.0598 |
| 11 | Work category for connection execution                                                 | –         | 3 – 6                      | 0.0522 |
| 12 | Need to use scaffolds and additional lifting mechanisms for reinforcing the structures | –         | Yes/No                     | 0.0522 |
| 13 | Possibility of application in seismic regions                                          | –         | Yes/No                     | 0.0508 |
| 14 | Possibility of dismantling the rebar cage and reusing the connecting elements          | –         | Yes/No                     | 0.0364 |

**Originality and practical value**

The ranking of factors that significantly influence the choice of the rational method for re-bars connection was carried out. The ranking was performed by specialists in the design and construction of multi-storey reinforced concrete frames of buildings.

The factors influencing the choice of the rebar connection method the most are determined. The time of the connections, the length of the rebar cage, the possibility of mounting the cage are the most important from the point of view of experts.

**Conclusions**

Based on expert evaluation of the significance of factors affecting the choice of a rational rebar connection method, it is determined:

– the most significant factors are those that determine the connection speed. These are the factors of time, possibility of carcassing, length of rebar cage;

– cost factors have less importance. Experts are ready to increase the cost of rebar connections in favour of reducing construction time;

– the least significant are the connection complexity factors – the need for additional devices, as well as work category. Experts are ready to increase the amount of equipment and complicate the work while reducing the construction time.

It is recommended to conduct additional studies with the development of a comprehensive methodology for selecting a rational method of re-bars connection.

**LIST OF REFERENCE LINKS**

1. Вискребенцев, В. Г. Исследование эффективности использования углеродного волокна в железобетонных пролетных строениях железнодорожных мостов / В. Г. Вискребенцев, К. И. Солдатов // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2014. – Вип. 5. – С. 16–21.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

2. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – На заміну СНиП 2.03.01-84\*. – Надано чинності 2011–01–07. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
3. ДСТУ Б В.2.6-168:2011. Арматурні та закладні вироби зварні, з'єднання зварні арматури і закладних виробів залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови (ГОСТ 10922-90, MOD). – На заміну ГОСТ 10922-90. – Надано чинності 2012–12–01. – Київ : Мінрегіон України, 2012. – 29 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-169:2011. З'єднання зварні арматури та закладних виробів залізобетонних конструкцій. Типи, конструкції та розміри (ГОСТ 14098-91, MOD). – На заміну ГОСТ 14098-91. – Надано чинності 2012–12–01. – Київ : Мінрегіон України, 2012. – 37 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-182:2011. З'єднання зварні стикові і таврові арматури залізобетонних конструкцій. Ультразвукові методи контролю якості. Правила приймання (ГОСТ 23858-79, MOD). – На заміну ГОСТ 23858-79. – Надано чинності 2012–12–01. – Київ : Мінрегіон України, 2012. – 37 с.
6. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого трьохкомпонентного бетону. Правила проектування. – Надано чинності 2011–01–06. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
7. Нетеса, А. Н. Сравнительный анализ трудоемкости и стоимости контроля качества основных способов соединения арматуры / А. Н. Нетеса // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – Вип. 8. – С. 57–64.
8. Радкевич, А. В. Внедрение инновационной технологии соединения арматуры муфтами с цилиндрической резьбой / А. Н. Нетеса, А. В. Радкевич // Эффективные технологические решения в строительстве с использованием бетонов нового поколения : материалы науч.-практ. конф. (28.10–29.10.2015). – Харьков, 2015. – С. 125–130.
9. Радкевич, А. В. Технологический регламент устройства арматурных каркасов колонн и пилонов с резьбовым соединением арматуры муфтами с цилиндрической резьбой / А. В. Радкевич, А. Н. Нетеса, А. Гаяда // Эффективные технологии в строительстве : тез. Междунар. науч.-техн. конф. (7.04–8.04.2016). – Киев, 2016. – С. 61–62.
10. Савицький, М. В. Вплив ексцентриситету на роботу стиснутих елементів в каркасі будівлі з ЛСТК / М. В. Савицький, О. Г. Зінкевич, А. М. Зінкевич // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 2. – С. 76–79.
11. Gergess, A. N. Design implications of increased live loads on continuous precast, prestressed concrete girder bridges / A. N. Gergess, R. Sen // PCI Journal. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 2. – P. 64–79. doi: 10.15554/pcij.03012013.64.79.
12. Rodríguez, M. E. Seismic behavior of a type of welded precast concrete beam-column connection / M. E. Rodríguez, M. Torres-Matos // PCI Journal. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 81–94. doi: 10.15554/pcij.06012013.81.94.
13. Seismic retrofit of reinforced concrete buildings in Japan using external precast, prestressed concrete frames / K. Takeda, K. Tanaka, T. Someya [et al.] // PCI Journal. – 2013. – Vol. 58. – Iss. 3. – P. 41–61. doi: 10.15554/pcij.06012013.41.61.

А. В. РАДКЕВИЧ<sup>1</sup>, А. М. НЕТЕСА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38(098) 307 81 44, ел. пошта [kvp@dsst.gov.ua](mailto:kvp@dsst.gov.ua), ORCID 0000-0001-6325-8517

<sup>2\*</sup>Каф. «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, ел. пошта [adreynetesa@meta.ua](mailto:adreynetesa@meta.ua), ORCID 0000-0002-3364-3446

## ВИЗНАЧЕННЯ ТА РАНЖУВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ, ЩО ОБУМОВЛЮЮТЬ РАЦІОНАЛЬНІ РІШЕННЯ З'ЄДНАННЯ АРМАТУРИ

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**Мета.** В роботі передбачається знайти: 1) визначення та формулювання факторів, які впливають на вибір раціонального способу з'єднання арматури вертикальних несучих елементів монолітних залізобетонних каркасів; 2) визначення параметрів факторів; 3) ранжування факторів методом експертного оцінювання. **Методика.** Для досягнення мети дослідження необхідно провести аналіз існуючих способів з'єднання арматури, визначення чинників та меж зміни параметрів для кожного зі способів. Ранжування чинників виконано методом експертного оцінювання. **Результати.** За даними обробки матеріалів експертного опитування чотирнадцяти експертів в області монолітного будівництва встановлено наступне: найбільше значення при виборі раціонального з'єднання арматури мають чинники, які обумовлюють параметри часу: можливість монтажу каркасами, час з'єднання арматурних стержнів, довжина арматурного каркаса, час виконання підготовчих операцій, час роботи основного вантажопідйомного механізму. При цьому чинники, що обумовлюють параметри арматурного каркаса, мають пряме відношення до часу виконання робіт, оскільки вони визначають кількість арматурних стиків по мірі зведення будівлі в широких межах. Менше значення мають економічні чинники – вартість арматурного з'єднання та вартість контролю якості. Очевидно, що в умовах значних матеріальних витрат на зміст будівництва інвестору вигідно збільшити вартість з'єднань арматури для росту темпів робіт. Найменше значення мають конструктивні та технологічні чинники: виникнення позацентрової передачі навантаження між арматурними стержнями, можливість використання термічно зміцненої арматури класів А 500 і вище, розряд для виконання робіт, необхідність використання риштувань та додаткових пристосувань для армування конструкцій. Причина аналогічна: підрядник готовий йти на ускладнення технології з метою скорочення термінів зведення об'єкту. Оскільки розрахунковий критерій узгодження Пірсона  $\chi^2 = 47,24$  більше табличного (22,36203), то отриманий коефіцієнт конкордації  $W = 0,26$  – величина не випадкова, а тому отримані результати мають сенс та можуть використовуватися в подальших дослідженнях. **Наукова новизна.** Авторами визначені чинники, що в найбільшій мірі впливають на вибір раціонального способу з'єднання арматури. **Практична значимість.** Ранжування чинників дозволить об'єктивно підходити до проблеми вибору способу з'єднання арматури, оптимізувати витрати праці та ресурсів, а також скоротити терміни будівництва.

**Ключові слова:** арматура; з'єднання; експертне оцінювання; ранг; чинник; ранжування; коефіцієнт конкордації

А. В. РАДКЕВИЧ<sup>1</sup>, А. Н. НЕТЕСА<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (098) 307 81 44, эл. почта kvp@dsst.gov.ua, ORCID 0000-0001-6325-8517

<sup>2\*</sup>Каф. «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, эл. почта andreynetes@meta.ua, ORCID 0000-0002-3364-3446

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАНЖИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИХ РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ АРМАТУРЫ

**Цель.** В работе предполагается найти: 1) определение и обозначение факторов, которые влияют на выбор рационального способа соединения арматуры вертикальных несущих элементов монолитных железобетонных каркасов; 2) определение параметров факторов; 3) ранжирование факторов методом экспертного оценивания. **Методика.** Для достижения цели исследования необходимо провести анализ существующих способов соединения арматуры, определение факторов и пределов изменения параметров для каждого из способов. Ранжирование факторов выполняется методом экспертного оценивания. **Результаты.** По итогам обработки материалов экспертного опроса четырнадцати экспертов в области монолитного строительства установлено следующее: наибольшее значение при выборе рационального соединения арматуры имеют факторы, которые обуславливают параметры времени: возможность монтажа каркасами, время соединения арматурных стержней, длина арматурного каркаса, время выполнения подготовительных операций, время работы основного грузоподъемного механизма. При этом факторы, которые обуславливают параметры арматурного каркаса, имеют прямое отношение ко времени выполнения работ, поскольку они определяют количество арматурных стыков по мере возведения здания в широких пределах.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Меньшее значение имеют экономические факторы – стоимость арматурного соединения и стоимость контроля качества. Очевидно, что в условиях значительных материальных расходов на содержание строительства инвестору выгодно увеличить стоимость соединений арматуры для роста темпов работ. Наименьшее значение имеют конструктивные и технологические факторы: возникновение внецентровой передачи нагрузки между арматурными стержнями, возможность использования термически упрочненной арматуры классов А 500 и выше, разряд для выполнения работ, необходимость использования подмостей и дополнительных приспособлений для армирования конструкций. Причина аналогична: подрядчик готов идти на осложнение технологии с целью сокращения сроков возведения объекта. Поскольку расчетный критерий согласования Пирсона  $\chi^2 = 47,24$  больше табличного (22,36203), то полученный коэффициент конкордации  $W = 0,26$  – величина не случайная, а потому полученные результаты имеют смысл и могут использоваться в дальнейших исследованиях. **Научная новизна.** Авторами определены факторы, в наибольшей мере влияющие на выбор рационального способа соединения арматуры. **Практическая значимость.** Ранжирование факторов позволит объективно подходить к проблеме выбора способа соединения арматуры, оптимизировать расходы труда и ресурсов, а также сократить сроки строительства.

**Ключевые слова:** арматура; соединение; экспертное оценивание; ранг; фактор; ранжирование; коэффициент конкордации

## REFERENCES

1. Vyskrebentsev, V. G., & Soldatov, K. I. (2014). Research of efficiency of using carbon fiber in armored concrete spans of railway bridges. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 5, 16–21.
2. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia, DBN V.2.6-98:2009 (2011).
3. Armaturni ta zakladni vyroby zvarni, ziednannia zvarni armatury i zakladnykh vyrobiv zalizobetonnykh konstruktsii. Zahalni tekhnichni umovy, DSTU B V.2.6-168:2011 (2012).
4. Ziednannia zvarni armatury ta zakladnykh vyrobiv zalizobetonnykh konstruktsii. Typy, konstruktsii ta rozmyry, DSTU B V.2.6-169:2011 (2012).
5. Ziednannia zvarni stykovi i tavrovi armatury zalizobetonnykh konstruktsii. Ultrazvukovi metody kontroliu yakosti. Pravyla pryimannia, DSTU B V.2.6-182:2011 (2012).
6. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkoho trokhkomponentnoho betonu. Pravyla proektuvannia, DSTU B V.2.6-156:2010 (2011).
7. Netesa, A. N. (2015). Comparative of analysis of labour intensiveness and cost of control of quality of basic methods of connection of armature. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 8, 57–64.
8. Radkevych, A. V., & Netesa, A. N. (2015). Introduction of innovative technology of connection of armature muffs with a cylindrical screw-thread. *Proceedings of the Conference on Effective technological decisions in building with the use of concretes of new generation, October 28-29, 2015, Kharkov*. 125–130.
9. Radkevych, A. V., Netesa, A. N., & Gayada, A. (2016). Technological regulation of device of armature frameworks of columns and pylons with the threaded connection of armature by muffs with a cylindrical screw-thread. *Proceedings of the I International Conference on Effective Technologies in Construction, April 7-8, 2016, Kyiv*. 61–62.
10. Savytskyi, M. V., Zinkevych, O. H., & Zinkevych, A. M. (2012). Eccentricity Influence on Work of the Lightweight Steel Framing Buildings' Compressed Elements. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 2, 76–79.
11. Gergess, A. N., & Sen R. (2013). Design implications of increased live loads on continuous precast, prestressed concrete girder bridges. *PCI Journal*, 58(2), 64–79. doi: 10.15554/pcij.03012013.64.79
12. Rodríguez, M. E., & Torres-Matos, M. (2013). Seismic behavior of a type of welded precast concrete beam-column connection. *PCI Journal*, 58(3), 81–94. doi: 10.15554/pcij.06012013.81.94
13. Takeda, K., Tanaka, K., Someya, T., Sakuda, A., & Ohno, Y. (2013). Seismic retrofit of reinforced concrete buildings in Japan using external precast, prestressed concrete frames. *PCI Journal*, 58 (3), 41–61. doi: 10.15554/pcij.06012013.41.61

*Prof. O. M. Pshynko, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. V. R. Mlodetskyi, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Feb. 10, 2017

Received: May 18, 2017

## ЗМІСТ

### **ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ**

**Л. В. АМЕЛІНА, М. М. БІЛЯЄВ**  
ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ  
ПОВІТРЯ В РАЗІ РАПТОВОГО ВИКИДУ  
АМІАКУ ..... 7

**М. М. БІЛЯЄВ, О. С. СЛАВІНСЬКА,  
Р. В. КИРИЧЕНКО**  
ПРОГНОЗ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО  
ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ  
З УРАХУВАННЯМ ХІМІЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ  
ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ..... 15

### **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**Ю. М. ДАЦУН**  
ОЦІНКА РІВНЯ ВІДПОВІДНОСТІ  
ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНОГО ВИРОБНИЦТВА ..... 23

**А. Я. КУЗИШИН**  
ВИЗНАЧЕННЯ РАМНОЇ СИЛИ ЕЛЕКТРОВОЗА ВЛ80  
ПРИ РУСІ НА КРИВИХ ДІЛЯНКАХ КОЛІЇ ..... 32

**О. А. ТЕРЕЩЕНКО**  
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ  
ВАГОНІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ  
ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ В УМОВАХ  
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ..... 45

### **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**

**Г. К. ГЕТЬМАН, С. Л. МАРІКУЦА**  
ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ІЗ  
АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ ..... 56

**А. Ю. ДРУБЕЦЬКИЙ**  
РОЗРАХУНОК МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ  
ВДОСКОНАЛЕНОЇ УНІВЕРСАЛЬНОЇ МАГНІТНОЇ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ..... 66

**К. О. СОРОКА, Т. П. ПАВЛЕНКО, Д. О. ЛИЧОВ**  
СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИБОРУ  
ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ РУХУ ЗАСОБІВ  
ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ  
ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ..... 77

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**А. Ф. ГОЛОВЧУК**  
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ  
ПОКАЗНИКІВ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНИХ  
ЗАСОБІВ ..... 92

### **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**Ю. Г. ЧАБАК, Т. В. ПАСТУХОВА,  
В. Г. ЕФРЕМЕНКО, І. О. ВАКУЛЕНКО,  
І. О. ВОЛОСЕНКО**  
КОМПОЗИЦІЙНЕ ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВЕ  
ПОКРИТТЯ «СТАЛЬ Р18/ЧАВУН 230Х28Г3» ..... 102

### **НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ**

**П. Г. АНОФРІЄВ**  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ  
ВІДЦЕНТРОВОЇ ЛИВАРНОЇ МАШИНИ ДЛЯ  
ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ ..... 112

### **РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ**

**Ю. П. БОРОНЕНКО, І. О. ФІЛІПОВА**  
ВИБІР КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ  
ВАГОНІВ ІЗ МАЛОЮ МАСОЮ ТАРИ ..... 121

**С. В. МЯМЛІН, О. ЛУНІС, Л. О. НЕДУЖА**  
ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ХОДОВИХ ЧАСТИН  
ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ..... 130

**О. В. ТРЕТЬЯКОВ, О. О. ТРЕТЬЯКОВ,  
М. В. ЗІМАКОВА, А. А. ПЕТРОВ**  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА СПЕКТРІВ  
УДАРНОГО ВІДГУКУ РУХОМОГО СКЛАДУ ..... 147

### **ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО**

**С. В. КЛЮЧНИК**  
ДЕФОРМАЦІЙНО-НАПРУЖЕНИЙ СТАН ВУЗЛА  
ПОВЕРХОВОГО СПОЛУЧЕННЯ БАЛОК ПРОЇЗНОЇ  
ЧАСТИНИ ЗАЛІЗНИЧНОГО МОСТА ..... 160

**А. В. РАДКЕВИЧ, А. М. НЕТЕСА**  
ВИЗНАЧЕННЯ ТА РАНЖУВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ, ЩО ОБУМОВЛЮЮТЬ  
РАЦІОНАЛЬНІ РІШЕННЯ З'ЄДНАННЯ  
АРМАТУРИ ..... 171

## СОДЕРЖАНИЕ

### **ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

**Л. В. АМЕЛИНА, Н. Н. БЕЛЯЕВ**  
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ВОЗДУХА В СЛУЧАЕ ВНЕЗАПНОГО ВЫБРОСА  
АММИАКА ..... 7

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, Е. С. СЛАВИНСКАЯ, Р. В.  
КИРИЧЕНКО**  
ПРОГНОЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО  
ВОЗДУХА ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА С  
УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ  
ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ..... 15

### **ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

**Ю. Н. ДАЦУН**  
ОЦЕНКА УРОВНЯ СООТВЕТСТВИЯ  
ЛОКОМОТИВРЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ..... 23

**А. Я. КУЗЫШИН**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАМНОЙ СИЛЫ ЭЛЕКТРОВОЗА  
ВЛ80 ПРИ ДВИЖЕНИИ НА КРИВЫХ  
УЧАСТКАХ ПУТИ ..... 32

**О. А. ТЕРЕЩЕНКО**  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ  
ВАГОНОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ  
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ  
ИНФОРМАЦИИ ..... 45

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

**Г. К. ГЕТЬМАН, С. Л. МАРИКУЦА**  
ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ С  
АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ..... 56

**А. Е. ДРУБЕЦКИЙ**  
РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ  
УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ  
МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ..... 66

**К. А. СОРОКА, Т. П. ПАВЛЕНКО, Д. А. ЛЫЧОВ**  
СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА  
СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВ  
ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ  
РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ..... 77

### **ИНФОРМАЦИОННО- КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**А. Ф. ГОЛОВЧУК**  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНЫХ  
СРЕДСТВ ..... 92

### **МАТЕРИАЛОЗНАВСТВО**

**Ю. Г. ЧАБАК, Т. В. ПАСТУХОВА,  
В. Г. ЕФРЕМЕНКО, И. А. ВАКУЛЕНКО,  
И. А. ВОЛОСЕНКО**  
КОМПОЗИЦИОННОЕ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЕ  
ПОКРЫТИЕ «СТАЛЬ Р18/ЧУГУН 230Х28ГЗ» ..... 102

### **НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ**

**П. Г. АНОФРИЕВ**  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИНАМИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ЛИТЕЙНОЙ  
МАШИНЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ..... 112

### **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**Ю. П. БОРОНЕНКО, И. О. ФИЛИППОВА**  
ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ  
ЭЛЕМЕНТОВ ВАГОНОВ С МАЛОЙ  
МАССОЙ ТАРЫ ..... 121

**С. В. МЯМЛИН, О. ЛУНИС, Л. А. НЕДУЖАЯ**  
ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ  
ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ..... 130

**А. В. ТРЕТЬЯКОВ, О. А. ТРЕТЬЯКОВ,  
М. В. ЗИМАКОВА, А. А. ПЕТРОВ**  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПЕКТРОВ  
УДАРНОГО ОТКЛИКА ПОДВИЖНОГО  
СОСТАВА ..... 147

### **ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**

**С. В. КЛЮЧНИК**  
ДЕФОРМАЦИОННО-НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
УЗЛА ЭТАЖНОГО СОПРЯЖЕНИЯ БАЛОК ПРОЕЗЖЕЙ  
ЧАСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МОСТА ..... 160

**А. В. РАДКЕВИЧ, А. Н. НЕТЕСА**  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАНЖИРОВАНИЕ  
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ФАКТОРОВ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИХ  
РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ  
АРМАТУРЫ ..... 171

# CONTENTS

## **TRANSPORT ECOLOGY**

**L. V. AMELINA, M. M. BILIAIEV**  
NUMERICAL SIMULATION OF AIR POLLUTION IN  
CASE OF UNPLANNED AMMONIA RELEASE ..... 7

**M. M. BILIAIEV, O. S. SLAVINSKA,  
R. V. KYRYCHENKO**  
PREDICTION OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION  
BY EMISSIONS OF MOTOR TRANSPORT TAKING  
INTO ACCOUNT THE CHEMICAL TRANSFORMATION  
OF HARMFUL SUBSTANCE ..... 15

## **OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS**

**Y. M. DATSUN**  
CONFORMANCE RATING FOR LOCOMOTIVE REPAIR  
PRODUCTIONS ..... 23

**A. Y. KUZYSHYN**  
DETERMINATION OF FRAME FORCE FOR ELECTRIC  
LOCOMOTIVE VL80 WHEN MOVING IN THE CURVED  
TRACK SECTIONS ..... 32

**O. A. TERESHCHENKO**  
SIMULATION OF CARS ACCUMULATION PROCESSES  
FOR SOLVING TASKS OF OPERATIONAL PLANNING  
IN CONDITIONS OF INITIAL INFORMATION  
UNCERTAINTY ..... 45

## **ELECTRIC TRANSPORT**

**H. K. HETMAN, S. L. MARIKUTSA**  
SELECTION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE  
NOMINAL MODE ELECTRIC TRAINS WITH  
ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE ..... 56

**A. Y. DRUBETSKYI**  
CALCULATION OF MAGNETIC CHARACTERISTICS  
OF TRACTION ELECTRIC ENGINE USING  
THE IMPROVED UNIVERSAL MAGNETIC  
CHARACTERISTICS ..... 66

**K. O. SOROKA, T. P. PAVLENKO, D. A. LYCHOV**  
SYSTEM FOR AUTOMATIC SELECTION OF THE SPEED  
RATE OF ELECTRIC VEHICLES FOR REDUCING THE  
POWER CONSUMPTION ..... 77

## **INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING**

**A. F. GOLOVCHUK**  
MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING  
THE INDICATORS OF TRACTIVE VEHICLES ..... 92

## **MATERIAL SCIENCE**

**Y. G. CHABAK, T. V. PASTUKHOVA,  
V. G. EFREMENKO, I. O. VAKULENKO,  
I. A. VOLOSENKO**  
COMPOSITE IMPULSED-PLASMA COATING «STEEL  
T1/CAST IRON CR28MN3» ..... 102

## **NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODES. MACHINES AND MECHANISMS**

**P. G. ANOFRIEV**  
EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMICS OF  
CENTRIFUGAL CASTING MACHINES FOR  
PRODUCTION OF MILL ROLLS ..... 112

## **ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION**

**Y. P. BORONENKO, I. O. FILIPPOVA**  
SELECTION OF CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF CAR  
ELEMENTS WITH SMALL EMPTY WEIGHT ..... 121

**S. V. MYAMLIN, O. LUNYS, L. O. NEDUZHA**  
PECULIARITIES OF RUNNING GEAR CONSTRUCTION  
OF ROLLING STOCK ..... 130

**A. V. TRETIKOV, O. A. TRETIKOV,  
M. V. ZIMAKOVA, A. A. PETROV**  
EXPERIMENTAL EVALUATION OF SHOCK SPECTRUM  
RESPONSE OF ROLLING STOCK ..... 147

## **TRANSPORT CONSTRUCTION**

**S. V. KLUCHNIK**  
STRESS-STRAIN STATE OF BEAM STAGED  
CONNECTION POINT OF THE RAILWAY  
BRIDGE TRACK-WAY ..... 160

**A. V. RADKEVYCH, A. M. NETESA**  
DETERMINATION AND RANGING  
OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL  
FACTORS THAT DEFINE THE RATIONAL  
DECISIONS OF RE-BARS CONNECTION ..... 171

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

### **Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:**

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

### **Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:**

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) рецензія на статтю з місця роботи авторів;
- 4) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;
- 5) Оригінал експертного висновку.

**Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є:** наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

### **Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:**

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

### **З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:**

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

**АСПІРАНТУРА**

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна ЗАПРОШУЄ для навчання

на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальностями:

- ❖ 033 Філософія
- ❖ 051 Економіка
- ❖ 073 Менеджмент
- ❖ 101 Екологія
- ❖ 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології
- ❖ 144 Теплоенергетика
- ❖ 192 Будівництво та цивільна інженерія
- ❖ 273 Залізничний транспорт
- ❖ 275 Транспортні технології (за видами)

Підготовка аспірантів здійснюється за денною та заочною формою навчання за рахунок Держбюджету України та коштів фізичних, юридичних осіб. Термін навчання 4 роки.

Етапи вступної кампанії у 2017 році:

- прийом заяв та документів – з **21 серпня по 03 вересня 2017 року;**
- терміни проведення вступних іспитів – з **04 вересня по 10 вересня 2017 року;**
- початок навчання в аспірантурі – **2 жовтня 2017 року.**

Звертатися за адресою: 49010, Україна, м. Дніпро, вул. В. Лазаряна, 2,  
☎ +38(056) 373-15-63, e-mail: aspirantura\_diit@ndch.diit.edu.ua



Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan invites for postgraduate studies in the field of:

- ❖ 033 Philosophy
- ❖ 051 Economy
- ❖ 073 Management
- ❖ 101 Ecology
- ❖ 122 Computer Science and Information Technology
- ❖ 144 Power System
- ❖ 192 Construction and Civil Engineering
- ❖ 273 Railway Transport
- ❖ 275 Transport Technologies (by types)

Training of postgraduate students in the University is carried out in full-time and correspondence forms. The standard period of study is 4 years.

Stages of admission to postgraduate school in 2017:

- acceptance of applications and documents – **from 21/08/2017 to 03/09/2017;**
- timing of entry exams – **from 04/09/2017 to 10/09/2017;**
- beginning of postgraduate studies – **2/10/2017**

49010, Ukraine, Dnipro, V. Lazaryana St., 2, tel.: +38 (056) 373 15 63,  
e-mail: aspirantura\_diit@ndch.diit.edu.ua

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

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

№ 3 (69) 2017

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська  
Комп'ютерне верстання – А. О. Каїра, О. В. Помінова  
Літературна обробка – Ю. Г. Дішкант

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 21,86. Тираж 300 пр. Зам. №

**Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна**

*Адреса редакції, видавця:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Друк:*

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60  
Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Научное издание

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

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 3 (68) 2017

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – А. И. Миргородская  
Компьютерная верстка – А. О. Каира, О. В. Поминова  
Литературная обработка – Ю. Г. Дишкант

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 21,86. Тираж 300 экз. Зак. №

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна**

*Адрес редакции, издателя:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днипро, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Печать:*

Издательство «Герда», 49000, г. Днепр, пр. Д. Яворницкого, 60  
Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO  
UNİVERSİTETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS. BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 3 (69) 2017

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – А. І. Myrhorodska  
Desktop publishing – А. О. Kaira, О. V. Pominova  
Redaction – Yu. H. Dishkant

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 21,86. Circulation 300. Order no

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

*Address of editor and editorial office*

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Printing*

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60