



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



---

# **НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ**

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 1 (67)

---

.. 2017 ..

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

№ 1 (67) 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*  
*Розвиток вищої школи*

Дніпро

2017

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

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

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

*ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):*

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., Гаврилук В. І., Гетьман Г. К., Главацький К. Ц., Гненний О. М., Головкова Л. С., Гончаров К. В., Горобець В. Л., Доценко О. М., Дудкіна В. В., Ейтутіс Г. Д., Жуковицький І. В., Заблудовський В. О., Казакевич М. І., Капіца М. І., Копитко В. І., Костін М. О., Кравець В. В., Краснюк А. В., Кривчик Г. Г., Кузнецов В. Г., Курган М. Б., Муха А. М., 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., Скалозуб В. В., Сніжко Л. О., Урсуляк Л. В., Шинкаренко В. І., Штапенко Е. П., Яришкіна Л. О.

*ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:*

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

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р.  
Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки).  
Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.  
Друкується за рішенням вченої ради університету від 13.02.2017 р., протокол № 6

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

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

Видання публікується з 1936 р.:

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

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

## НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

## НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА

ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 1 (67) 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*  
*Развитие высшей школы*

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., Боднар 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., Гненний О. Н., Головова Л. С., Гончаров К. В., Горобец В. Л., Доценко Е. Н., Дудкина В. В., Жукович 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., Яришкіна 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); Стржеleckи 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 13.02.2017 г., протокол № 6

Издатель

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

Адрес  
учредителя

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днепро, 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. 1 (67) 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*  
*High School Development*

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., Skalozeb V. V., Snizhko L. O., Ursulyak L. V., Vakulenko I. O., Vlasova T. I., Volkova V. Ye., Yarishkina L. O., Zabludovskiy V. O., Zhukovytzky 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); Kuanyshov 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 Academy, 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 was registered by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine.  
 Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012  
 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 r. no. 1528 (technical sciences).  
 Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, Global Impact Factor, eLibrary.ru, DOAJ, Index Copernicus, DRJI.  
 Published according to the Academic Council decision of the University from 13.02.2017, Protocol no. 6

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

Address of Founder St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;  
 e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: <http://stp.diit.edu.ua/>

Edition is being published since 1936:

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

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

UDC 656.259.1:517.443

O. O. HOLOLOBOVA<sup>1\*</sup>, V. I. HAVRYLIUK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gololobova\_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

<sup>2</sup>Dep. «Automation, Telemechanics and Communications», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail gvi\_dp@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

### APPLICATION OF FOURIER TRANSFORM AND WAVELET DECOMPOSITION FOR DECODING THE CONTINUOUS AUTOMATIC LOCOMOTIVE SIGNALING CODE

**Purpose.** The existing system of automatic locomotive signaling (ALS) was developed at the end of the last century. This system uses the principle of a numerical code which is implemented on the basis of relay engineering, and therefore, it is exposed to various types of interferences. Over the years, the system has been upgraded several times, but the causes of faults and failures in its operation are still the subject of research. It is known that the frequency and the phase modulation of signal has a higher interference immunity as compared to the amplitude modulation. Therefore, the purpose of the article is to study the possibility of using the frequency methods such as Fourier series expansion and wavelet decomposition to extract the informational component of the received code from ALS signals under the action of various types of interferences. **Methodology.** One can extract the information unavailable in time representation of the signal using the signal studies in the frequency domain. The wavelet decomposition has been used for this purpose. This makes it possible to represent the local characteristics of the signal and to provide time-frequency decomposition in two spaces at the same time. Due to the high accuracy of the signal representation it is possible to analyze the time localization of spectral components and eliminate interference components even in the case of coincidence of interference frequency with the signal carrier frequency. **Findings.** To compare informativity of the methods of Fourier expansion and wavelet decomposition it was studied the reference and noisy signal of green fire code using the software package MATLAB. Detailed analysis of the obtained spectral characteristics showed that the wavelet decomposition provides a more correct decoding of the signal. **Originality.** Replacing the electromagnetic relays in the ALS system by microprocessor hardware involves the use of some mathematical tool for decoding, in order to obtain more information about the code. More often than not, as a mathematical tool, the classical Fourier decomposition is used. But because of a number of drawbacks in this method, it was suggested to use the wavelet decomposition, which has a number of advantages and accounts the disadvantages of the Fourier transform. **Practical value.** The presented method of code signal research can be the basis for developing dynamic model of the ALS receiver and decoder using digital processing module, which will enable to increase the reliability and accuracy of extraction of the code information component.

**Key words:** automatic locomotive signaling; Fourier transform; wavelet decomposition; interference immunity; amplitude modulation; shift; scale; time-frequency domain



## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Introduction**

The existing system of automatic locomotive signaling of continuous action (ALSC) has been developed and started to operate more than 40 years ago. It was built using electromagnetic relay with a numeric code, and has significant disadvantages in spite of a series of upgrades.

The disadvantages of the system include: the limited informative value (three code dispatches and five signal indications on locomotive light-signal); indications of the locomotive light-signal do not reflect the speed limit of passing of traffic guide lights and station lights, depending on the length of the block section and the required speed limit on it; low reliability of locomotive devices is due to the coding by amplitude modulated signal, which has low interference immunity. It is subjected to changes in the duration of the pulses and pauses, which causes failures when applying the codes for a locomotive. The system can receive codes from the next track. It is impossible to use it on the high-speed sections because of the low information content and large inertia [2, 24].

ALSC signaling occurs in specific conditions, peculiar only to this system. Firstly, the signal in each track circuit is transmitted only from its own source and its level in the rails continuously increasing as the train moves. Secondly, the locomotive transition from the one track circuit to another is accompanied by a short interruption in the track signal reception and a dramatic decrease of signal current in the rails. In addition, track circuits, connecting the moving locomotive with the signal transmitter are simultaneously used both in the auto-lock system and on the electrified railways to pass the reverse traction current. The sources of harmonic interferences are the traction substations and the networks of direct and alternating current, as well as the traction drive of locomotive. This particularly applies to electric drives with asynchronous traction motors widely used in recent years [8].

The problems of protection from the main sources of interference at the railway transport, which lead to failures in the operation of signaling and communication equipment, their research and identification, were considered in numerous scientific studies, but they are still relevant [23].

It is known that the amplitude modulation which is used in ALSC for transmission of numeric

code combination has low interference immunity as compared to the frequency and phase one. This is explained by the so-called passive pauses, i.e. the lack of signals in the pauses. As a result, upon the receipt of code combination the total signal energy in a cycle is proportional to the ratio of the total duration of all pulses and the duration of code combination. Thus, the difference in energy level of different ALSC codes is from 6 to 11 dB.

Applicable coding principle also has some disadvantages, which do not allow the use of well-known schemes for constructing an optimal receiver. Discrete signal transmission theory is based on the concept of a symbol having a predetermined duration, frequency, and it is not applied to code combinations of the ALSC system. Consequently, it is impossible to use the systems of clock and frame synchronizations, pulse distortion equalizers. For this reason, the interference immunity is reduced almost by 6 dB.

Another factor influencing the interference immunity of ALSC receivers is the signal degradation associated with the carrier frequency. As a rule, filter systems of data transmission in the signals should contain at least eight periods of carrier for each symbol. The exception is the systems with the minimum phase modulation types, operable with a signal/interference ratio at least 20 dB, which cannot be achieved in the channel ALSC. The pulse duration «RY» transmitter KPT-5 is about 0.23 seconds. When a carrier frequency of 25 Hz in a pulse will be at least six periods. The amount of signal degradation in this case is 0.8, i.e. its capacity is reduced by 2 dB.

The amount of losses of the interference immunity of the system is 14 dB. Accordingly, the error probability is increased tenfold as compared to the optimal receiver.

The analysis shows that in ALSC system especially at a frequency of 25 Hz it in principle impossible to obtain high interference immunity [7].

In addition, the railway lines almost always have a longitudinal traction current asymmetry that arises, for example, when breaking the wire rail-bonds or when connecting to one of the rails the earthings of traffic lights supports, masts, and other metal constructions. Therefore, with the electric traction the track transformer core is magnetized by the traction current. During the train movement the current value is changing, and the parasitic

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

modulation of signal current by the traction one takes place. In connection with this the increase in signal current is not always effective and sometimes it results in increase of ALSC failures. It should be noted that with the advent of more powerful locomotives, this phenomenon has become even more pronounced [19, 20].

### Purpose

In view of the above mentioned the work is aimed to study the possibility of using the frequency methods (Fourier transform and wavelet decomposition) to increase the reliability and credibility of extraction the informational component of the received code from amplitude-modulated ALSC signals under the action of various types of interferences. The implementation of this research in the future may be the basis for the development of a new receiver of the ALSC system with improved interference immunity.

### Methodology

In the existing ALSC system the principle of operation of decoding devices is based on the analysis of amplitude and time characteristics of the received signal. Information value is the number of pulses in the signal, and the protective one is a long interval at the end of the code. On this basis, shortening or lengthening pulses and intervals, filling the long interval or numerical distortions can lead to incorrect reception of the code [3, 6].

Often the information, which is not noticeable in the time representation of the signal, is shown in its frequency representation. Using the Fourier transform (FT) one can study the noisy ALSC code signal comprising interferences from various sources. With the use of FT, a signal is decomposed into elementary harmonic vibrations with different frequencies and all the necessary properties and formulas are expressed using one basis function  $\exp(j\omega t)$  or two real functions  $\sin(\omega t)$  and  $\cos(\omega t)$ . This gives the spectral information about the signal and describes its behavior in the frequency domain [16, 17, 21, 22].

The Fourier transform is described by the formula:

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \exp(int).$$

in which the basis function is:

$$\exp(it) = \cos t + i \sin t,$$

As a result of the ALSC signal decomposition it is obtained the basic carrier frequency 25, 50 or 75 Hz (depending on the type of track circuits) and interference frequency. Based on the method of correlation reception according to spectral feature in the amplitude-frequency dependence appropriate ALSC codes can be recognized. But it should be noted that the FT makes it possible to determine the frequency content of the signals, but one cannot determine at what time point there is one or another frequency. This makes the method of spectral analysis unusable for processing of noisy non-periodic signals containing interferences, for which the value of occurrence time is of paramount importance. Moreover, the interferences coinciding in frequency with the desired signal will be decoded as the code elements, which in turn may lead to incorrect representation of signal indication on locomotive traffic light.

In case of decoding the ALSC code signal a significant information load carries the temporal localization of the spectral components and the corresponding time-frequency signal representation, which can be implemented using the wavelet decomposition (WD). As compared to the signal decomposition in Fourier series the wavelets can represent local features of the signal much more accurately and to provide a two-dimensional scan, in which the frequency and the coordinates are regarded as independent variables. This makes it possible to analyze the signal in two spaces at the same time.

The wavelet decomposition is described by the formula:

$$f(t) = \sum_{j,k=-\infty}^{\infty} c_{jk} \Psi_{jk}(t),$$

with arbitrary parameters of basis function (which is also called the mother wavelet) – scaling factor  $j$ , and the shift parameter  $k$ :

$$\Psi_{jk}(t) = |a|^{-1/2} \Psi((t-k)/j),$$

In addition to Fourier transform one can use for signal processing the Short Time Fourier Transform, which is the time, frequency and amplitude function. However, considering the «Heisenberg

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Uncertainty Principle», this method of processing does not give the opportunity to measure the frequency and time with high accuracy. In turn, the wavelet decomposition makes it possible to reduce the influence of «Heisenberg uncertainty principle» on the obtained time-frequency representation of the signal, where the shift of mother wavelet can be considered as the time elapsed from the time  $t=0$  (since it shows the wavelet location in time), and the scale is the quantity inverse to the frequency.

By analyzing the time intervals equal to the duration of pulses and frequency components contained in it, it is possible to fix the presence of the corresponding code. At this the interference frequency appearing outside the time pulse intervals, even repeating the basic carrier frequency will not carry a critical information load, which in turn will prevent erroneous decryption of the code [4, 12, 14].

### Findings

Firstly, it was taken the signal containing information on a green signal indication (G code), without interferences, obtained in the actual oper-

ating conditions (Fig. 1). Using the MATLAB programs let us carry out the Fourier transform (Fig. 2) [9, 10, 11] on this signal. Analyzing the Fig. 2, we can see the maximum amplitude surge is at the frequency of 50 Hz and the signal current harmonics is at the frequencies multiples of 50. Since this signal has the correct amplitude and time parameters, we accept it as a reference.

Further we expand this signal by continuous one-dimensional wavelet decomposition with the help of MATLAB pack (Fig. 3), using the Daubechies wavelet with a center frequency of 0.7143 Hz.

In the first field is the amplitude-time characteristic of the signal, in the second field is the wavelet spectrum in which using the color gradation are shown:

- the minimal frequencies, which are present in the signal using dark brown color;
- maximal frequencies (in this case 50 Hz) that are present in the signal using the milky white color.

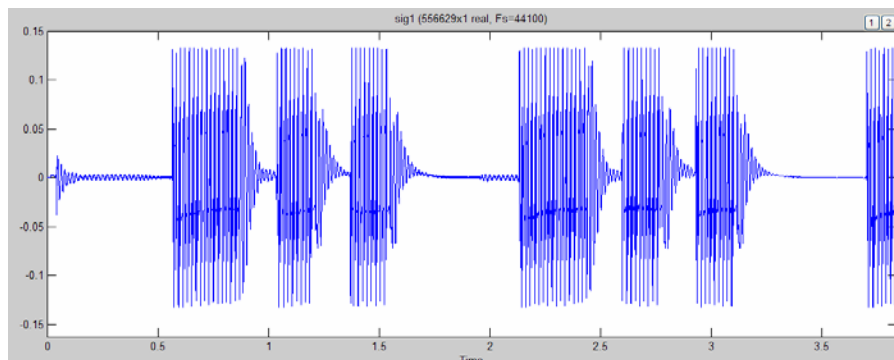


Fig. 1. Code of green fire

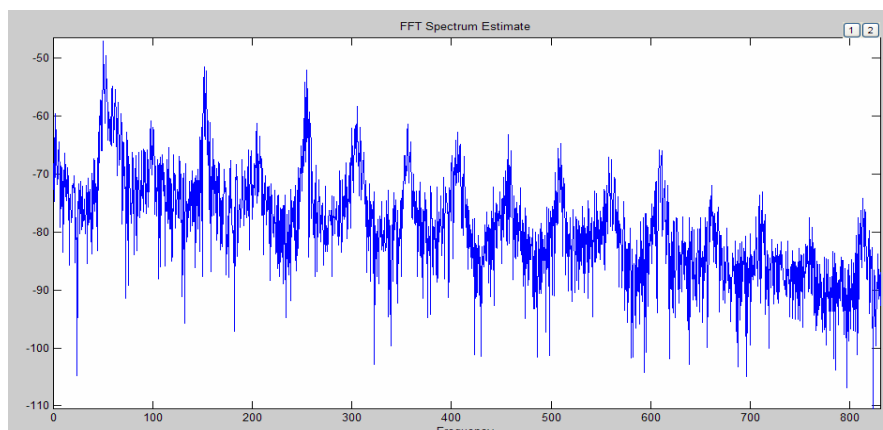


Fig. 2. The spectral composition of green fire code

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

It can be seen that the entire period of time interval of the code G pulse is filled with the maximal frequency (50 Hz). Time intervals of pauses are not sharp; the signal frequency is reduced and gradually comes to zero. This informs that the signal current in these sections (almost black sections of the spectrum) disappeared.

As in the case of Fourier transform, the wavelet function is characterized by coefficients. But in this case, we are talking about the scale factors (scale), which are visualized in the third field of the Fig. 3. Local maxima of these coefficients are in the fourth field of the Figures. If we draw an analogy with the time-frequency dependency, then

the scale will be the reverse value to the frequency, since the small scales correspond to the upper frequencies of the analyzed signal, and the large scales – to the lower frequencies.

This dependence is easy to trace in the Fig. 4. Here on the scale of the range 1-97 pulses and pauses of green code are clearly visible, and on the scale of the range 129-577 pauses are filled with tapered continuous graph of dark brown color. This indicates the presence of low-frequency interferences, which are not essential for decoding the code almost in the entire time interval of the signal current presence [15].

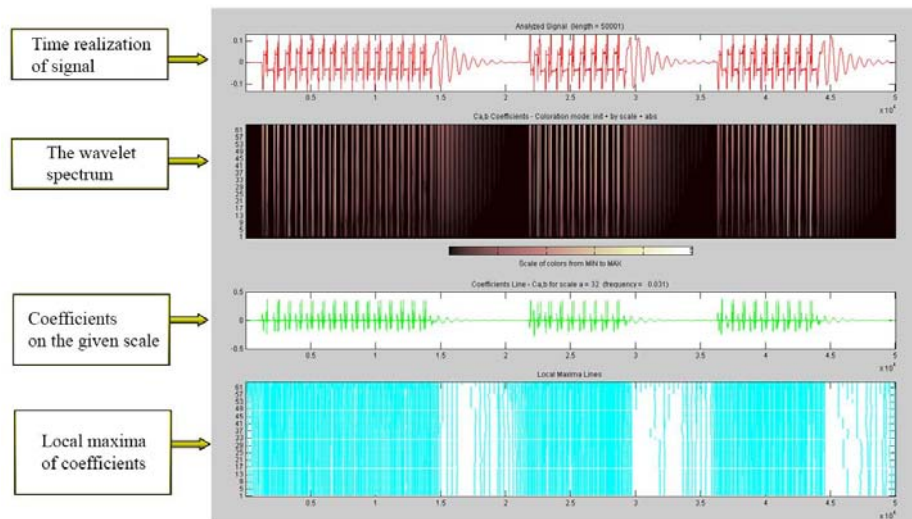


Fig. 3. The spectral composition of green fire code in continuous one-dimensional wavelet decomposition

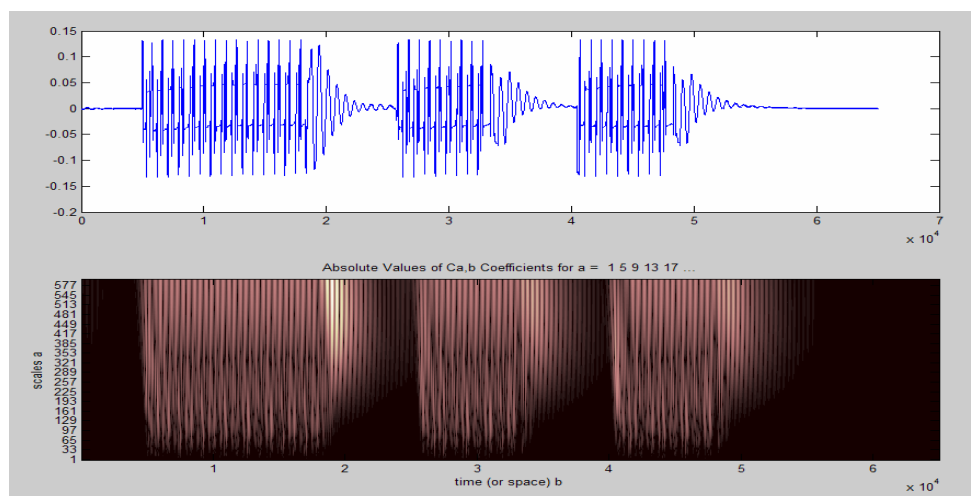


Fig. 4. Time-frequency dependence of green fire code during continuous one-dimensional wavelet decomposition

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

The Fig. 5 shows noisy signal in comparison with the reference one, which contains information about green signal indication (G code) obtained under real operating conditions. The figure shows that there is high amplitude of interference, the time of occurrence of which coincides with the time slot of the G code intervals, resulting in their considerable distortions. Using MATLAB let us carry out the Fourier transform on this signal (Fig. 6). Analyzing the Figure 6, it can be noted that some part of interferences has significant spikes at higher frequencies of 380, 620, 1020 Hz, which cannot result in erroneous decoding of code, and the other part of interferences coincides with the carrier frequency of 50 Hz, which could have a fundamental importance to identify the boundaries of the intervals and pauses.

Let us apply continuous one-dimensional wavelet decomposition with the help of MATLAB package (Fig. 7) to the one period of G code using the Daubechies wavelet as in the first example. In this Figure it is clearly seen that the first pause of the G code is filled by the interferences, which coincide with the carrier frequency of 50 Hz (white-milky color of the verticals). Having the ability to monitor the frequency, which is not localized in time, the interference data may cause incorrect decryption of the code. Wavelet analysis gives the possibility to track the presence of the carrier frequency in relation to the time of existence of the spectral component that enables more correct signal decoding.

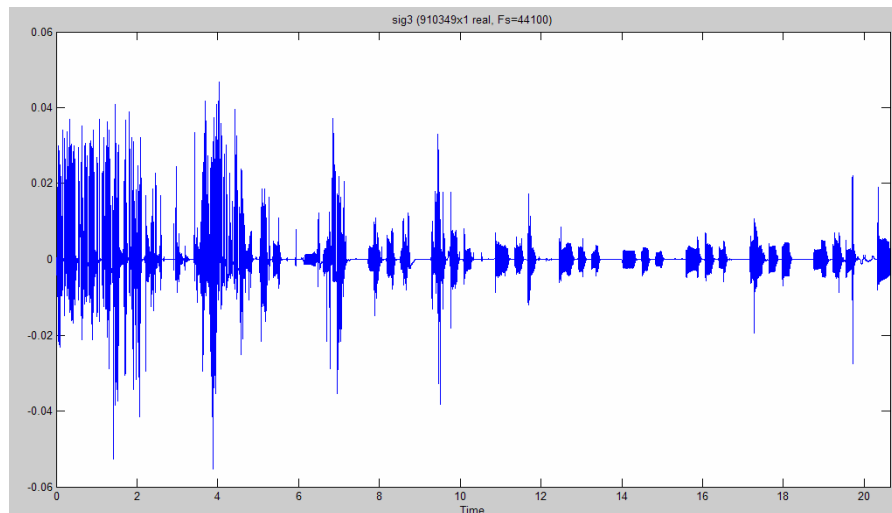


Fig. 5. The green light code containing significant interferences

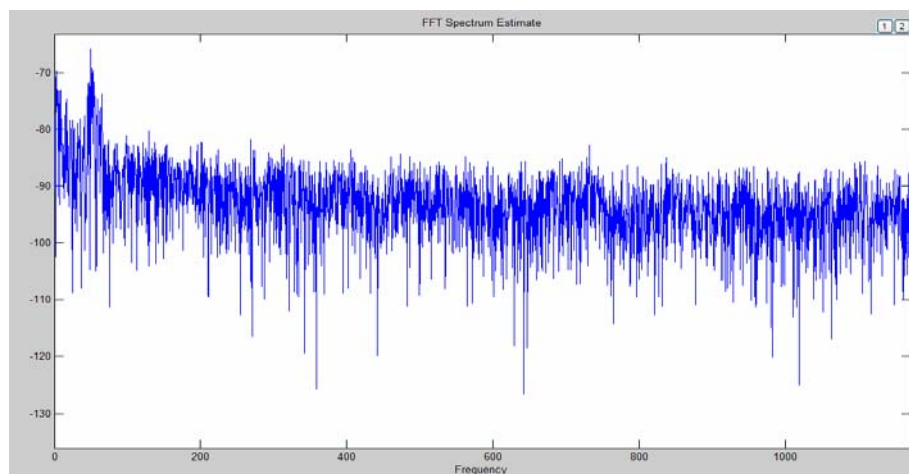


Fig. 6. The spectral composition of the green light code containing significant interferences

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

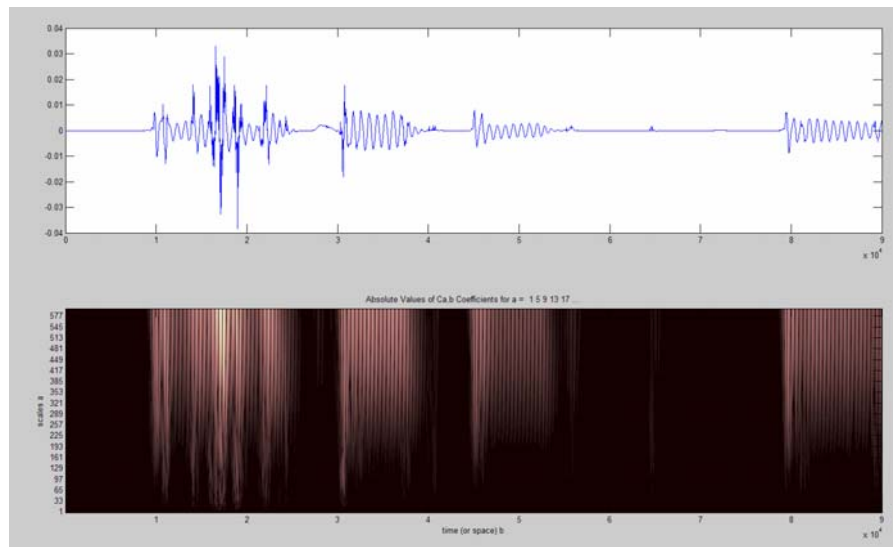


Fig. 7. Time-frequency dependence of green fire code with interferences during continuous one-dimensional wavelet transformation

### Originality and practical value

Upgrading existing ALSC system involves replacing relay by the microprocessor hardware, which has a huge number of advantages. In turn, the digital processing of the received code signal increases reliability that reduces the number of failures in the system operation.

Digital processing of the signal involves the use of a mathematical tool to convert the signal in order to obtain more information about it, which is not available in its original form. Among many well-known signal transformations, such as the Short Time Fourier Transform, Wigner transform and others, the most popular is the classical Fourier transform. By Fourier series expansion of the signal one can determine the value of amplitude and phase both of the studied signal and the interferences, affecting the work of ALSC devices, as well as the distribution density of probability of the code signals, interferences and their statistical characteristics [1, 5, 13]. But there are some disadvantages of this analysis:

- the limited informative value of the nonstationary signal analysis and the fact that it is almost impossible to analyze their peculiarities (breaks, steps, peaks, etc.), since their «dissipation» in the entire frequency range of the spectrum takes place;
- representation of the global information about the frequencies of the studied signal and the lack of representation of the local signal properties

with rapid temporal changes in its spectral composition.

Therefore, it is necessary a mathematical optimal signal processing method that can take into account these drawbacks. In this article the wavelet decomposition is considered as a possible alternative, which has all the advantages of Fourier transforms, but it has a number of advantages:

- wavelet bases can be well localized in both frequency and time;
- wavelet bases can be represented by variety of basic functions, the properties of which are focused on the solution of various problems.

This article WD is used to analyze the ALSC signal code, the expansion of the reference and the noisy G code followed by conclusions about the peculiarities of this expansion is carried out. Based on the above mentioned method of the code signal study one can develop a dynamic model of receiver and ALSC decoder, in which the module of digital signal processing applying the wavelet decomposition will be used. This will increase the interference immunity of the locomotive ALSC devices as a whole.

### Conclusions

Sending messages about the signals of track traffic lights or the block sections vacancy using the ALSC to the moving locomotive is carried out by electrical signals which are transmitted along

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

the rails and are perceived by the locomotive receiver. The messages during transmission are subjected to distortions that may occur when converting a message during transmission or reception and under the influence of interferences.

Considerable part of interferences may enter the frequency range of the useful signal component and lead to failures in the ALSC operation. Signal decoding and analyzing it in the amplitude-frequency domain, which can be carried out using the FT does not provide comprehensive information about the received code. Information on the

signal local features can be obtained by expanding it in the time-frequency domain using WD.

However, wavelet analysis cannot always substitute the Fourier analysis. Many theorems of wavelet analysis are proved by Fourier expansions. Thus, these two types of analysis are rather complementary than mutually exclusive. Improvement of decoding principles by using modern technical devices and methods of digital signal processing are promising for the development of ALSC receiver with high reliability of noisy signals reception [18].

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Алексеев, К. А. Очерк «Вокруг CWT» [Electronic resource] / К. А. Алексеев. – Available at: <http://matlab.exponenta.ru/wavelet/book3/index.php>. – Title from the screen. – Accessed : 30.01.2017.
2. Ананьева, О. М. Прием сигналов АЛСН в условиях действия двухкомпонентной помехи / О. М. Ананьева, М. Г. Давиденко // Информ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2015. – № 5. – С. 52–56. doi: 10.18664/ikszt.v0i5.55748.
3. Ананьева, О. М. Синтез нелинейного приемника сигналов АЛСН в условиях действия аддитивной двухкомпонентной помехи / О. М. Ананьева, М. Г. Давиденко // Информ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2015. – № 6. – С. 46–50. doi: 10.18664/ikszt.v0i6.60191.
4. Астафьева, Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н. М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170. doi: 10.3367/UfNr.0166.199611a.1145.
5. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – Москва : Высш. шк., 2000. – 448 с.
6. Бойник, А. Б. Корреляционный прием и дешифрация кода АЛСН по спектральному признаку / А. Б. Бойник, М. Н. Чепцов, А. М. Трунаев // Информ.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2008. – № 2. – С. 64–68.
7. Бушуев, В. И. Явление феррорезонанса в фазочувствительных рельсовых цепях частотой 50 Гц / В. И. Бушуев, С. В. Бушуев // Автоматика, связь, информатика. – 2004. – № 3. – С. 31–32.
8. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи / В. И. Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 7–15. doi: 10.15802/stp2015/55352.
9. Дремин, И. М. Вейвлеты и их использование / И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, № 5. – С. 465–501. doi: 10.3367/UfNr.0171.200105a.0465.
10. Дьяконов, В. П. Вейвлет-анализ в MATLAB реальных осциллограмм [Electronic resource] / В. П. Дьяконов // Измерения в технике и связи. – С. 19–25. – Available at: [http://www.tmi-s.com/upload/kipis\\_articles/article\\_Dyakov\\_3-2010.pdf](http://www.tmi-s.com/upload/kipis_articles/article_Dyakov_3-2010.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 27.01.2017.
11. Дьяконов, В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений : спец. справ. / В. Дьяконов, И. Абраменкова. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 608 с.
12. Илюшин, Я. А. Теория и применение вейвлетов / Я. А. Илюшин // Вейвлеты. – 2009. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
13. Каганов, В. И. Радиотехника+компьютер+Math CAD / В. И. Каганов. – Москва : Горячая линия, 2001. – 413 с.
14. Левкович-Маслюк, Л. Введение в вейвлет-анализ : учеб. курс / Л. Левкович-Маслюк, А. Переберин. – Москва : ГрафиКон'99, 1999. – 218 с.
15. Мистецкий, В. Разработка. Непрерывное wavelet преобразование [Electronic resource] / В. Мистецкий // Хабрахабр. – 2010. – Available at: <https://habrahabr.ru/post/103899/>. – Title from the screen. – Accessed : 17.01.2017.
16. Новиков, Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов : учеб. пособие / Л. В. Новиков. – Санкт-Петербург : ИАП РАН. – 1999. – 152 с.
17. Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – Москва : ДМК Пресс, 2005. – 304 с.



## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

18. Сотник, В. О. Нейромережева модель розпізнавання тривалості імпульсів та інтервалів кодів АЛСН / В. О. Сотник, М. М. Бабаєв, М. М. Чепцов // 36. наук. пр. Донец. ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2013. – Вип. 36. – С. 67–78.
19. Чепцов, М. Н. Метод определения параметров безопасности программного обеспечения в микропроцессорных системах управления движением поездов / М. Н. Чепцов // 36. наук. пр. Донец. ін-ту залізн. трансп. – Донецьк, 2005. – Вип. 2. – С. 39–45.
20. Djukanovic, S. A Parametric Method for Multicomponent Interference Suppression in Noise Radars / S. Djukanovic, V. Popovic // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2012. – Vol. 48. – Iss. 3. – P. 2730–2738. doi: 10.1109/taes.2012.6237624.
21. Lewalle, J. Введение в анализ данных с применением непрерывного вейвлет-преобразования [Electronic resource] / J. Lewalle ; пер. с англ. Грибунина В. Г. – Available at: <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/lewallle.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 27.01.2017.
22. Polikar, R. Введение в вейвлет-преобразование [Electronic resource] / R. Polikar ; пер. с англ. Грибунина В. Г. – Available at: <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/tutorial.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 27.01.2017.
23. Said, A. A New Fast and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees / A. Said, W. A. Pearlman // Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 1996. – Vol. 6. – Iss. 3. – P. 243–250. doi: 10.1109/76.499834.
24. Study of transmission lines effect on the system operation of continuous automatic cab signaling / O. O. Hololobova, V. I. Havryliuk, M. O. Kovryhin, S. Yu. Buriak // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53) – С. 17–28. doi: 10.15802/stp2014/30833.

О. О. ГОЛОЛОВОВА<sup>1\*</sup>, В. І. ГАВРИЛЮК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта [gololobova\\_oksana@i.ua](mailto:gololobova_oksana@i.ua), ORCID 0000-0003-1857-8196

<sup>2</sup>Каф. «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта [gvi\\_dp@mail.ru](mailto:gvi_dp@mail.ru), ORCID 0000-0001-9954-4478

## ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є І ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ДЕШИФРАЦІЇ КОДУ АЛСН

**Мета.** Існуюча система автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) була розроблена в кінці минулого століття. У даній системі використовується принцип числового коду, реалізований на базі релейної техніки, у зв'язку з чим вона схильна до впливу різних перешкод. За минулі роки система була неодноразово модернізована, але причини збоїв та відмов у її роботі, як і раніше, залишаються предметом досліджень. Відомо, що частотна і фазова модуляція сигналу має вищу завадостійкість у порівнянні з амплітудною модуляцією. Тому в роботі була поставлена мета – дослідити можливість застосування частотних методів, таких як розкладання в ряд Фур'є та вейвлет-перетворення для вилучення із сигналів АЛС інформаційної складової про прийнятий код в умовах дії різних перешкод. **Методика.** За допомогою дослідження сигналу в частотній області можна витягти інформацію, недоступну в тимчасовому поданні сигналу. Для цієї мети було використано вейвлет-перетворення, яке дає можливість представляти локальні особливості сигналу та забезпечувати частотно-часове розкладання відразу в двох просторах. Завдяки високій точності представлення сигналу з'являється можливість аналізувати тимчасову локалізацію спектральних компонентів і виключити складові перешкод, навіть у разі збігу частоти перешкоди з частотою сигналу. **Результати.** Для порівняння інформативності методів розкладання Фур'є та вейвлет-перетворення було досліджено за допомогою програмного пакету MATLAB еталонний та зашумлений сигнал коду зеленого вогню. Докладний аналіз отриманих спектральних характеристик показав, що вейвлет-перетворення дає більш коректну дешифрацію сигналу. **Наукова новизна.** Заміна електромагнітних реле в системі АЛС на мікропроцесорну апаратуру передбачає застосування будь-якого математичного інструменту для дешифрування коду з метою отримання про нього додаткової інформації. Найчастіше, як математичний інструмент, використовується класичне перетворення Фур'є. Але, в силу наявності ряду недоліків в даному методі, було запропоновано використовувати вейвлет-перетворення, яке має ряд переваг і враховує недоліки перетворення Фур'є.



## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Практична значимість.** Наведений метод дослідження кодового сигналу можна покласти в основу розробки динамічної моделі приймача і дешифратора АЛС із використанням модуля цифрової обробки, що дасть можливість підвищити надійність та достовірність вилучення інформаційної складової коду.

**Ключові слова:** автоматична локомотивна сигналізація; перетворення Фур'є; вейвлет-перетворення; завадостійкість; амплітудна модуляція; зрушення; масштаб; частотно-тимчасова область

О. А. ГОЛОЛОВА<sup>1\*</sup>, В. И. ГАВРИЛЮК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта gololobova\_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

<sup>2</sup>Каф. «Автоматика, телемеханика и связь», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта gvi\_fr@mail.ru, ORCID 0000-0001-9954-4478

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ И ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ДЕШИФРАЦИИ КОДА АЛСН

**Цель.** Существующая система автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) была разработана в конце прошлого века. В данной системе используется принцип числового кода, реализованный на базе релейной техники, в связи с чем она подвержена влиянию различных помех. За прошедшие годы система была неоднократно модернизирована, но причины сбоев и отказов в ее работе по-прежнему остаются предметом исследований. Известно, что частотная и фазовая модуляция сигнала имеет более высокую помехоустойчивость в сравнении с амплитудной модуляцией. Поэтому в работе была поставлена цель – исследовать возможность применения частотных методов, таких как разложение в ряд Фурье и вейвлет-преобразование для извлечения из сигналов АЛС информационной составляющей о принимаемом коде в условиях действия различных помех. **Методика.** С помощью исследования сигнала в частотной области можно извлечь информацию, недоступную во временном представлении сигнала. Для этой цели было использовано вейвлет-преобразование, которое дает возможность представлять локальные особенности сигнала и обеспечивать частотно-временное разложение сразу в двух пространствах. Благодаря высокой точности представления сигнала появляется возможность анализировать временную локализацию спектральных компонент и исключить составляющие помех, даже в случае совпадения частоты помехи с несущей частотой сигнала. **Результаты.** Для сравнения информативности методов разложения Фурье и вейвлет-преобразования был исследован с помощью программного пакета MATLAB эталонный и зашумленный сигнал кода зеленого огня. Подробный анализ полученных спектральных характеристик показал, что вейвлет-преобразование дает более корректную дешифрацию сигнала. **Научная новизна.** Замена электромагнитных реле в системе АЛС на микропроцессорную аппаратуру предполагает применение какого-либо математического инструмента для дешифрации кода с целью получения о нем дополнительной информации. Чаще всего, как математический инструмент, используется классическое преобразование Фурье. Но, в силу наличия ряда недостатков в данном методе, было предложено использовать вейвлет-преобразование, которое имеет ряд преимуществ и учитывает недостатки преобразования Фурье. **Практическая значимость.** Приведенный метод исследования кодового сигнала можно положить в основу разработки динамической модели приемника и дешифратора АЛС с использованием модуля цифровой обработки, что даст возможность повысить надежность и достоверность извлечения информационной составляющей кода.

**Ключевые слова:** автоматическая локомотивная сигнализация; преобразование Фурье; вейвлет-преобразование; помехоустойчивость; амплитудная модуляция; сдвиг; масштаб; частотно-временная область

## REFERENCES

1. Alekseev, K. A. Ocherk «Vokrug CWT». (n.d.). Retrieved from <http://matlab.exponenta.ru/wavelet/book3/index.php>
2. Anan'yeva, O. M., & Davidenko, M. G. (2015). The reception of the signals of continuous automatic cab signaling (CACS) under the conditions of two-component interference effect. *Information and Control Systems at Railway Transport*, 5, 52-56. doi: 10.18664/ikszt.v0i5.55748

## АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

3. Anan'yeva, O. M., & Davidenko, M. G. (2015). Synthesis of the nonlinear receiver of CACS signals in the conditions of the additive two-component interference. *Information and Control Systems at Railway Transport*, 6, 46-50. doi: 10.18664/ikszt.v0i6.60191
4. Astaf'eva, N. M. (1996). Wavelet analysis: basic theory and some applications. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 11(166), 1145-1170. doi: 10.3367/UFNr.0166.199611a.1145
5. Baskakov, S. I. (2000). *Radiotekhnicheskiye tsepi i signaly*. Moscow: Vysshaya shkola.
6. Boynik, A. B., Cheptsov, M. N., & Trunaev, A. M. (2008). Korrelyatsionnyy priyem i deshifratsiya koda ALSN po spektralnemu priznaku. *Information and Control Systems at Railway Transport*, 2, 64-68.
7. Bushuev, V. I., & Bushuev, S. V. (2004). Yavleniye ferrozonansa v fazochuvstvitelnykh relsovykh tsepyakh chastotoy 50 Gts. *Automation, Communication and Informatics*, 3, 31-32.
8. Havrilyuk, V. I., Shcheka, V. I., & Meleshko, V. V. (2015). Testing New Types of Rolling Stock for Electromagnetic Compatibility With Signaling and Communication Devices. *Science and Transport Progress*, 5(59), 7-15. doi: 10.15802/stp2015/55352
9. Dremine, I. M., Ivanov, O. V., & Nechitailo, V. A. (2001). Wavelets and their uses. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 5(171), 465-501. doi: 10.3367/UFNr.0171.200105a.0465
10. Dyakonov, V. (2010). Wavelet signal analysis of actual oscillograms using Math. *Test & Measuring Instruments and Systems*, 3, 19-25. Retrieved from [http://www.tmi-s.com/upload/kipis\\_articles/article\\_Dyakonov\\_3-2010.pdf](http://www.tmi-s.com/upload/kipis_articles/article_Dyakonov_3-2010.pdf)
11. Dyakonov, V. & Abramenkova, I. (2002). *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy: spetsialnyy spravochnik*. Saint Petersburg: Piter.
12. Ilyushin, Y. A. (2009). *Teoriya i primeneniye veyvletov*. [CD].
13. Kaganov, V. I. (2001). *Radiotekhnika+kompyuter+Math CAD*. Moscow: Goryachaya liniya.
14. Levkovich-Maslyuk, L., & Pereberin, A. (1999). *Vvedeniye v veyvlet-analiz*. Moscow: Grafikon'99.
15. Mistetskiy, V. (2010). Razrabotka. Nepreryvnoye wavelet preobrazovaniye. *Habrahabr*. Retrieved from <https://habrahabr.ru/post/103899/>
16. Novikov, L. V. (1999). *Osnovy veyvlet-analiza signalov*. St. Petersburg: IAI RAS.
17. Smolentsev, N. K. (2005). *Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB*. Moscow: DMK Press.
18. Cotnyk, V. O., Babaiev, M. M., & Cheptsov, M. M. (2013). Neiromerezheva model rozpoznavannia tryvalosti impulsiv ta intervaliv kodiv ALSN. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, 36, 67-78.
19. Cheptsov, M. M. (2005). The method of determination of parameters software safety in microsystems by moving the trains. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, 2, 39-45.
20. Djukanovic, S., & Popovic, V. (2012). A Parametric Method for Multicomponent Interference Suppression in Noise Radars. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 48(3), 2730-2738. doi: 10.1109/taes.2012.6237624
21. Lewalle, J. (n.d.) *Vvedeniye v analiz dannykh s primeneniym nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya* (V. G. Gribunin, Trans.). Saint Petersburg Autex. Retrieved from <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/lewall.pdf>
22. Polikar, R. (n.d.) *Vvedeniye v veyvlet-preobrazovaniye* (V. G. Gribunin, Trans.). St. Petersburg: Autex. Retrieved from <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/tutorial.pdf>
23. Said, A., & Pearlman, W. A. (1996). A New Fast and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees. *Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 6(3), 243-250. doi: <https://doi.org/10.1109/76.499834>
24. Hololobova, O. O., Havryliuk, V. I., Kovryhin, M. O., & Buriak, S. Y. (2014). Study of transmission lines effect on the system operation of continuous automatic cab signaling. *Science and Transport Progress*, 5(53), 17-28. doi: 10.15802/stp2014/30833

*Prof. A. V. Kovalenko, D. Sc. (Phys-Math.); Associate Prof. V. I. Profatilov, Ph.D. (Tech.) recommended this article to be published*

Accessed: Oct. 12, 2016

Received: Jan. 04, 2017

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК [504.3:622.411.52]:656.2

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, М. О. ОЛАДИПО<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 0000-0002-1531-7882

<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 Oladipo.toye@outlook.com, ORCID 0000-0001-7945-6657

### РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИМАГИСТРАЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ УГЛЯ

**Цель.** Научная работа предполагает разработку 3D численной модели для прогноза загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов в железнодорожном вагоне. **Методика.** Для решения поставленной задачи разработана трехмерная численная модель, основанная на применении уравнения переноса пылевых загрязнений в атмосферном воздухе под действием ветра и атмосферной турбулентной диффузии. Для численного интегрирования моделирующего уравнения переноса пыли использовалась неявная разностная схема. При построении разностной схемы осуществляется предварительное расщепление исходного уравнения переноса на последовательность решения трех уравнений. Первое из них учитывает перенос пыли по траекториям, второе уравнение – перенос пыли под действием атмосферной турбулентной диффузии, а третье уравнение – изменение концентрации пыли в атмосферном воздухе за счет ее эмиссии из вагонов. Неизвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной схеме – методу бегущего счета, что обеспечивает простую численную реализацию уравнений расщепления. Разработанная численная модель составляет основу специализированной компьютерной программы. На основе построенной численной модели проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы на железнодорожной станции при движении состава с углем. **Результаты.** Разработана 3D численная модель, которая относится к классу «screening models». Данная модель учитывает основные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере при транспортировке угля. Предложенная численная модель требует небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности. Эта модель может использоваться для оперативных расчетов динамики загрязнения атмосферного воздуха при перевозке угля железнодорожным транспортом. Выполнены расчеты по определению концентрации загрязнителя и формированию зоны загрязнения на станции Епуги. Представлены результаты физического эксперимента, позволяющие рекомендовать применение дополнительных бортов специальной формы для минимизации выноса угольной пыли из полувагонов. **Научная новизна.** Авторами создана 3D численная модель, позволяющая учесть существенные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пыли в атмосфере. Модель позволяет рассчитывать формирование зон загрязнения при перевозке угля железнодорожным транспортом. **Практическая значимость.** Рассмотрена эффективная численная модель класса «screening models» для экспресс-расчета уровня загрязнения атмосферы при транспортировке угля железнодорожным транспортом. Модель может быть применена при разработке мероприятий по охране окружающей среды при эксплуатации железнодорожного транспорта. Предложенная модель позволяет оперативно рассчитать 3D перенос пыли в атмосферном воздухе.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы; железнодорожный транспорт; перевозка угля; численное моделирование

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

## Введение

Транспортировка угля в Нигерии осуществляется железнодорожным транспортом (рис. 1), поскольку страна имеет достаточно хорошо развитую сеть железных дорог. Однако, транспортировка угля осуществляется в полувагонах, вследствие чего происходит вынос угольной пыли [6, 12, 14]. При таком выносе угольной пыли происходит интенсивное загрязнение транспортного коридора и прилегающей территории.



Рис. 1. Перевозка угля в Нигерии

Fig. 1. Transportation of coal in Nigeria

Особенно опасен такой процесс загрязнения, когда состав проходит через железнодорожные станции (рис. 2), вблизи селитебных зон или по территории промышленных объектов [13, 15]. В этой связи возникает важная задача по прогнозированию интенсивности загрязнения транспортного коридора и прилегающей территории при перевозке угля [13, 16, 17].

Рис. 2. Железнодорожная станция Enugu (Нигерия):  
1 – место «входа» состава с углем в расчетную областьFig. 2. Railway station Enugu (Nigeria):  
1 – «entry» point of the train with coal into the computational region

Анализ литературных источников, посвященных этой проблеме, показал, что для прогнозирования процесса загрязнения воздушной среды используется модель Гаусса [3, 5, 8], реализованная в виде кода «AERMOD» [10]. Данный пакет программ позволяет рассчитать загрязнение окружающей среды в приближении «постоянно действующий точечный источник». Модель Гаусса является эффективным инструментом оценки уровня загрязнения воздушной среды, но не учитывает профиль скорости ветра, движение источника эмиссии. Применение CFD моделей для решения этой задачи требует использования мощных компьютеров и значительных затрат времени на получение прогнозных данных. В этой связи, важно отметить, что актуальной задачей является разработка эффективных численных моделей, позволяющих учитывать основные физические факторы, влияющие на формирование зоны загрязнения в транспортном коридоре при движении состава с углем и разработка методов по минимизации выноса угольной пыли из полувагонов [4, 6, 16].

## Цель

Целью данной работы является разработка 3D численной модели для прогноза уровня загрязнения атмосферы при эмиссии пылевых загрязнений из полувагонов. Ставится задача создания модели, которая позволяла бы учитывать основные физические факторы рассеивания пыли в атмосфере, движение источника эмиссии (состав с углем) и при этом требовала бы малых затрат компьютерного времени при практической реализации (эта модель группы «screening models»).

*Математическая модель.* Прогноз уровня загрязнения атмосферы при выносе пылевых загрязнений из полувагона осуществляется на базе фундаментального уравнения массопереноса [1, 2, 7, 9, 11]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_g)C}{\partial z} = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)) \delta(z-z_i), \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества (пылевой загрязнитель);  $u, v, w$  – компоненты

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вектора скорости воздушного потока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса загрязнителя от «насыпи» в полувагоне;  $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты источника выброса;  $w_g$  – скорость гравитационного оседания пыли;  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [1, 2, 7, 9]. Отметим, что координаты источника эмиссии (полувагонов с углем) зависят от времени. Таким образом, с помощью задания зависимости  $x_i=f(t), y_i=f(t)$  можно моделировать изменения положения вагонов в расчетной области с течением времени, то есть моделировать движение состава с углем.

В разработанной численной модели используются следующие зависимости для задания профиля ветра и вертикального коэффициента атмосферной диффузии [3, 5]:

$$u=u_1\left(\frac{z}{z_1}\right)^p, \mu_z=k_1\left(\frac{z}{z_1}\right)^m, \mu_x=\mu_y=k_0u, \quad (2)$$

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

**Численное решение.** Для численного интегрирования уравнения (1) используются неявные разностные схемы [1, 2, 9, 11]. Предварительно данное уравнение расщепляется на дифференциальном уровне на последовательность следующих уравнений:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_g)C}{\partial z} + \sigma C = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)) \delta(z-z_i).$$

Первое уравнение данной системы описывает перенос пыли по траекториям. Второе уравнение описывает перенос пыли за счет атмосферной турбулентной диффузии. Третье уравнение учитывает изменение концентрации пыли в атмосферном воздухе под действием

источников эмиссии (вынос пыли из полувагонов). Численное интегрирование этих уравнений выполняется на прямоугольной разностной сетке. Для численного интегрирования первого уравнения этой системы используется попеременно-треугольная неявная разностная схема. Для численного интегрирования второго уравнения данной системы используется метод суммарной аппроксимации. Для численного интегрирования третьего уравнения используется метод Эйлера.

Применяемая неявная попеременно-треугольная разностная схема строится таким образом, чтобы на каждом шаге расщепления неизвестное значение концентрации пыли определялось по явной схеме бегущего счета [1, 2]. Это позволяет получить простые рекуррентные соотношения, которые удобны для программирования. Для программной реализации разработанной численной модели использовался FORTRAN. Создан специализированный код «Coal Dust Emission».

Для проведения расчетов на базе этого кода необходимо задать:

1. Класс устойчивости атмосферы.
2. Профиль скорости ветра.
3. Скорость движения состава, направление движения.
4. Интенсивность выделения пыли от насыпи в полувагоне.

Отметим, что время расчета 3D задачи и задачи массопереноса составляет порядка 6 сек. Таким образом, разработанный код позволяет быстро проводить серийные расчеты в течение одного рабочего дня.

## Результаты

Пример практического использования разработанного кода «Coal Dust Emission» показан ниже. Рассматривался процесс движения состава с углем на железнодорожной станции Епуги (Нигерия). Ставилась задача по определению интенсивности загрязнения транспортного коридора при вхождении состава с углем на станцию. На рис. 2 (позиция 1) показана точка «входа» состава на станцию. Стрелкой, на данном рисунке, показано направление движения состава.

На последующих рисунках показана зона пылевого загрязнения (уровень  $z = 1,7 \text{ м}$ ) для различных моментов времени.



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Рис. 3. Зона пылевого загрязнения на станции Enugu ( $t = 15$  с)Fig. 3. Dust-polluted zone at the Enugu station ( $t = 15$  sec.)Рис. 4. Зона пылевого загрязнения на станции Enugu ( $t = 37$  с)Fig. 4. Dust-polluted zone at the Enugu station ( $t = 37$  sec.)

Как видно из представленных рисунков, при движении состава формируется обширная зона пылевого загрязнения. Это значит, что под влияние источника эмиссии пыли попадают работники станции – монтеры пути, сцепщики, сигналисты и т.д. Также очевидно, что пылевое загрязнение может проникнуть внутрь вагонов, находящихся рядом составов. В этой связи возникает важная задача по минимизации выноса угольной пыли из полувагонов. Ниже рассматривается новый подход к решению этой задачи.

**Рабочая гипотеза.** Для минимизации выноса угольной пыли из полувагона предлагается осуществить геометрическое воздействие на воздушный поток, который обтекает полувагон с грузом угля. Для этого рекомендуется установить на полувагон дополнительные борта специальной формы, например, как показано на рис. 5 (борт типа «внутреннее крыло»). Для

обоснования, предложенной конструкции борта, проведем рассуждения с использованием методов системного анализа. Для этой цели рассмотрим эмпирическую зависимость для оценки интенсивности пылевыведения от поверхности угля в полувагоне. Эта зависимость имеет вид [6]:

$$Q = \rho V_B S t (0,10837 \frac{\rho \times V_B^2}{\rho_{OB}} + 0,1703 \frac{j_B}{g} - 0,3217 \omega - 0,3546) 10^{-2}, \quad (3)$$

где  $Q$  – потери угля при транспортировке;  $\rho$  – плотность воздуха;  $V_B$  – скорость воздуха вблизи обтекаемой поверхности;  $S$  – площадь поверхности, из которой выдувается груз;  $t$  – продолжительность процесса выдувания груза;  $\rho_{OB}$  – объемная масса груза;  $d$  – средний диаметр частиц груза;  $g$  – ускорение свободного падения;  $j_B$  – ускорение вертикальных колебаний вагона;  $\omega$  – влажность воздуха.

Зависимость (3) достаточно «полно» учитывает те факторы, которые определяют интенсивность эмиссии пыли от поверхности груза. Это дает нам определенный *ключ* к решению задачи – если необходимо изменить интенсивность пылевыведения, надо «воздействовать» на конкретный фактор, увеличить его или уменьшить в зависимости от того, с каким знаком «плюс» или «минус» входит в формулу (3) этот фактор. Например, если изменить влажность груза (параметр  $\omega$ ) и ее увеличить, то интенсивность пылевыведения – уменьшится, так как в формулу (3) данный параметр входит со знаком «минус». На практике такой подход реализуется путем подачи воды на поверхность груза перед его отправкой, то есть путем увлажнения угля. Аналогично рассуждая, мы приходим к выводу, что если уменьшить скорость воздушного потока  $V_B$  вблизи обтекаемой поверхности (локальная скорость), то можно уменьшить интенсивность пылевыведения. Поэтому, для минимизации интенсивности пылевыведения при перевозке угля, будем «воздействовать» на этот параметр. Воздействие будем проводить в направлении уменьшения параметра  $V_B$ . Например, такое воздейст-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вие можно осуществить геометрическим путем – то есть, как указывалось выше, применить дополнительный борт с «внутренним крылом» (рис. 5).

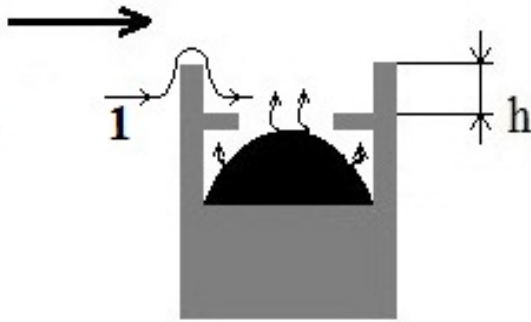


Рис. 5. Дополнительный борт типа «внутреннее крыло»:  
1 – линия тока

Fig. 5. Additional board of «inner wing» type:  
1 – stream line

При использовании такой конструкции происходит удлинение линий тока частиц воздуха, входящих внутрь полувагона, а значит – происходит локальное уменьшение скорости  $V_v$  воздушного потока. То есть при применении такого борта происходит *геометрическое* воздействие на воздушный поток.

Для подтверждения рабочей гипотезы был проведен физический эксперимент в лаборатории кафедры «Гидравлика и водоснабжение» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Результаты физического эксперимента представлены ниже.

На рис. 6 представлены результаты эксперимента по оценке размеров зоны загрязнения, если используется полувагон без дополнительных бортов с «шапкой груза».

Как видно из рис. 6, возле полувагона сформировалась обширная зона загрязнения, длина которой составляет более четырех «калибров». Видно, что произошел вынос различных фракций угля. Более крупные фракции осели вблизи вагона.

Данный эксперимент подтверждает, что при использовании полувагонов без дополнительных бортов, формируется большая зона загрязнения в транспортном коридоре и за его пределами.

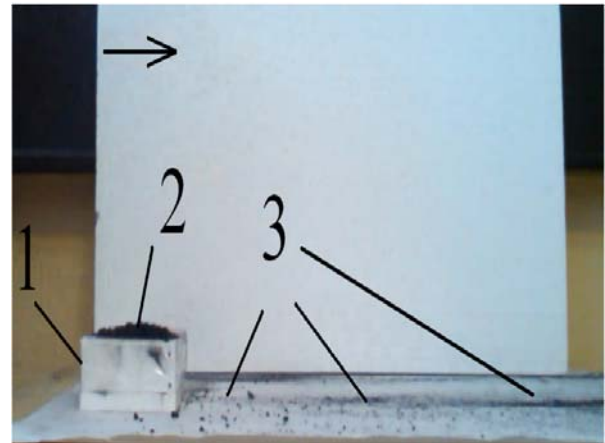


Рис. 6. Зона загрязнения при отсутствии дополнительных бортов на модели полувагона:

1 – модель вагона; 2 – «шапка груза»;  
3 – зона загрязнения

Fig. 6. Pollution zone in the absence of additional boards at the model of gondola car:

1 – model of the car; 2 – «cargo cap»; 3 – pollution zone

На рис. 7 показана модель полувагона с дополнительными бортами типа «внутреннее крыло», а на рис. 8 представлены результаты эксперимента по оценке зоны загрязнения за таким полувагоном.



Рис. 7. Модель полувагона с дополнительными бортами типа «внутреннее крыло»:  
1 – «внутреннее крыло»

Fig. 7. Gondola car model with additional boards, type «inner wing»:  
1 – «inner wing»

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

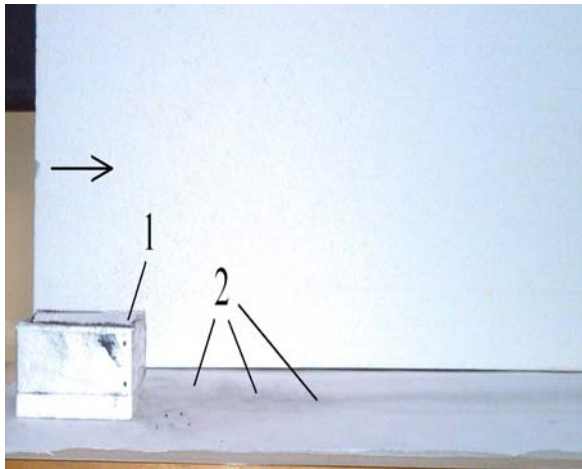


Рис. 8. Зона загрязнення при использовании дополнительных бортов типа «внутреннее крыло»:

1 – модель вагона; 2 – зона загрязнения

Fig. 8. Pollution zone at additional boards usage, type «inner wing»:

1 – the car model; 2 – pollution zone

Как видно из рис. 8, формирующаяся зона загрязнения значительно меньше как по площади, так и по интенсивности. Также видно, что в отличие от предыдущего варианта (то есть вагон без дополнительных бортов), здесь произошел вынос, в основном, мелких фракций угля.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов подтверждают выдвинутую рабочую гипотезу о возможной минимизации выноса угольной пыли из полувагона за счет использования дополнительных бортов типа «внутреннее крыло».

### Научная новизна и практическая значимость

Создана 3D численная модель, позволяющая рассчитывать динамику загрязнения воздушной среды при движении железнодорожного состава с углем. Предложенная модель дает возможность при моделировании учесть наиболее существенные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере.

Особенностью предложенной численной модели является использование стандартной исходной информации, быстрота в получении расчетных данных и удобство анализа получаемых результатов прогноза.

Для минимизации процесса выноса угольной пыли из полувагона предложено использовать дополнительные борты типа «внутреннее крыло».

Представлены результаты физического эксперимента, подтверждающие эффективность такого подхода.

### Выводы

Рассмотрена эффективная 3D численная модель, которая относится к классу «screening models» для расчета динамики загрязнения атмосферы при перевозке угля железнодорожным транспортом. Модель позволяет рассчитать процесс загрязнения атмосферного воздуха с учетом метеоситуации, скорости движения состава, интенсивности пылевыведения.

Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении их развития для расчета аэродинамики обтекания состава на базе уравнений Навье-Стокса и уравнений массопереноса.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2013. – 159 с.
2. Беляев, Н. Н. Моделирование аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. В. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 29–38. doi: 10.15802/stp2014/29973.
3. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
4. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
5. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

6. Воробйов, Є. О. Запобігання забруднення повітря пилом під час транспортування вугілля / Є. О. Воробйов, М. О. Ніколенко, І. О. Худякова // Вісті АДІ ДВНЗ «ДонНТУ». – Горлівка, 2005. – № 1. – С. 34–38.
7. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
8. Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер. – Москва : Мир, 1980. – 539 с.
9. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
10. AERMOD: Description of model formulation [Электронный ресурс]. – USA, North Carolina, 2004. – 91 p. – Режим доступа: [https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_mfd.pdf](https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf). – Загл. с экрана. – Проверено : 23.01.2017.
11. Biliaiev, M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
12. Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study / B. Fabiano, F. Curro, A. P. Reverberi, E. Palazzi // Process Safety and Environmental Protection. – 2014. – Vol. 92. – Iss. 2. – P. 150–159. doi: 10.1016/j.psep.2013.01.002.
13. Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes : IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. – Lyon, 2012. – Vol. 105. – 714 p.
14. Emmitt, G. D. Fugitive coal dust: An old problem demanding new solutions / G. D. Emmitt // Port Technology International. – 1999. – No. 9. – P. 125–128.
15. Full cost accounting for the life cycle of coal / P. R. Epstein, J. J. Buonocore, K. Eckerle [et al.] // Annals of the New York Academy of Sciences. – 2011. – Vol. 1219. – Iss. 1. – P. 73–98. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x.
16. Initial Report on the Independent Review of Rail Coal Dust Emissions Management Practices in the NSW Coal Chain / Chief Scientist & Engineer. – Sydney NSW, Australia, 2015. – 75 p.
17. Szabo, M. F. Environmental assessment of coal transportation / M. F. Szabo. – Cincinnati, Ohio : Environmental Protection Agency, 1978. – 142 p.

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, М. О. ОЛАДІПО<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 0000-0002-1531-7882

<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 [Oladipo.toye@outlook.com](mailto:Oladipo.toye@outlook.com), ORCID 0000-0001-7945-6657

## РОЗРАХУНОК ДИНАМІКИ ЗАБРУДНЕННЯ ПРИМАГІСТРАЛЬНОЇ ТЕРИТОРІЇ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГІЛЛЯ

**Мета.** Наукова робота передбачає розробку 3D чисельної моделі для прогнозу забруднення атмосфери при транспортуванні сипучих вантажів у залізничному вагоні. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі розроблена тривимірна чисельна модель, заснована на застосуванні рівняння переносу пилових забруднень в атмосферному повітрі під дією вітру та атмосферної турбулентної дифузії. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння транспорту пилу використовувалася неявна різницева схема. При побудові різницевої схеми здійснюється попереднє розщеплення вихідного рівняння переносу на послідовність розв'язання трьох рівнянь. Перше з них враховує перенесення пилу по траєкторіях, друге рівняння – перенесення пилу під дією атмосферної турбулентної дифузії, а третє рівняння – зміна концентрації пилу в атмосферному повітрі за рахунок її емісії з вагонів. Невідоме значення концентрації забруднювача на кожному кроці розщеплення визначається за явною схемою – методу біжучого рахунку, що забезпечує просту чисельну реалізацію рівнянь розщеплення. Розроблена чисельна модель становить основу спеціалізованої комп'ютерної програми. На основі побудованої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент по оцінці рівня забруднення атмосфери на залізничній станції під час руху потяга з вугіллям. **Результати.** Розроблено 3D чисельну модель, яка відноситься до класу «screening models». Дана модель враховує основні

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання пилових забруднень в атмосфері при транспортуванні вугілля. Запропонована чисельна модель вимагає невеликих витрат комп'ютерного часу при практичній реалізації на комп'ютерах малої та середньої потужності. Ця модель може використовуватися для оперативних розрахунків динаміки забруднення атмосферного повітря при перевезенні вугілля залізничним транспортом. Виконано розрахунки по визначенню концентрації забруднювача та формуванню зони забруднення на станції Enugu. Представлені результати фізичного експерименту, що дозволяють рекомендувати застосування додаткових бортів спеціальної форми для мінімізації виносу вугільного пилу з напіввагонів. **Наукова новизна.** Авторами створена 3D чисельна модель, що дозволяє врахувати істотні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання пилу в атмосфері. Модель дозволяє розраховувати формування зон забруднення при перевезенні вугілля залізничним транспортом. **Практична значимість.** Розглянута ефективна чисельна модель класу «screening models» для експрес-розрахунку рівня забруднення атмосфери при транспортуванні вугілля залізничним транспортом. Модель може бути застосована при розробці заходів із охорони навколишнього середовища при експлуатації залізничного транспорту. Запропонована модель дозволяє оперативно розрахувати 3D перенесення пилу в атмосферному повітрі.

*Ключові слова:* забруднення атмосфери; залізничний транспорт; перевезення вугілля; чисельне моделювання

M. M. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, M. O. OLADIPO<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 0000-0002-1531-7882

<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 Oladipo.toye@outlook.com, ORCID 0000-0001-7945-6657

## CALCULATION OF POLLUTION DYNAMICS NEAR RAILWAY TERRITORY DURING COAL TRANSPORTATION

**Purpose.** The article is aimed to develop 3D numerical model for the prediction of atmospheric pollution during transportation of bulk cargo in the railway car. **Methodology.** To solve this problem, it was developed three-dimensional numerical model, based on the use of the transport equation of dust pollution in the air by the wind and atmospheric turbulent diffusion. For the numerical integration of the simulating equation of the dust transport the implicit difference scheme was used. When constructing a difference scheme, it was carried out prior splitting of the original transport equation into the sequence of solutions of three equations. The first of them takes into account the transport of dust in paths, the second equation – dust transport under the influence of atmospheric turbulent diffusion, and the third equation – change of the dust concentration in the air due to its emissions from the cars. Unknown value of the pollutant concentration at every step of splitting is determined by the explicit scheme – the method of running account, which provides a simple numerical implementation of splitting equations. The developed numerical model is the basis for specialized computer program. On the basis of the constructed numerical model we carried out a computational experiment to assess the level of air pollution at the railway station during the motion of train with coal. **Findings.** Authors developed 3D numerical model, which belongs to the class of «screening models». This model takes into account the main physical factors affecting the process of dispersion of dust pollution in the atmosphere during coal transportation. The proposed numerical model requires low cost of computer time in the practical implementation on small and medium-power computers. This model can be used for rapid calculations of the dynamics of air pollution when transporting coal by rail. Calculations to determine the pollutant concentration and formation of the contamination zone at Enugu station were performed. The results of physical experiment, allow us to recommend the use of additional specially shaped boards to minimize the removal of coal dust from gondola cars. **Originality.** It was created 3D numerical model that makes it possible to take into account significant physical factors that influence the process of dust dispersion in the atmosphere. The model allows calculating the formation of pollution zones during transportation of coal by rail. **Practical value.** The effective numerical model of the class «screening models» for rapid calculation of the level of air pollution from coal transport by rail was considered. The model can be applied in the development of environmental protection measures in the operation of rail transport. The proposed model allows you to quickly calculate the 3D transfer of dust in the air.

*Keywords:* air pollution; railway transport; coal transportation; numerical simulation

## REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Gunko, Y. Y., & Mashikhina, P. B. (2013). *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy*. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Biliaiev, M. M., Berlov, O. V., & Shevchenko, A. V. (2014). Simulation of the accidental pollution after the emergency in to the storage of rocket solid propellant. *Science and Transport Progress*, 5(53), 29-38. doi: 10.15802/stp2014/29973
3. Berlyand, M. Y. (1985). *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat.
4. Berlyand, M. Y. (1975). *Sovremennyye problemy atmosfernoй diffuzii i zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat.
5. Bruyatskiy, Y. V. (2000). *Teoriya atmosfernoй diffuzii radioaktivnykh vybrosov*. Kyiv: Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy.
6. Vorobyov, Y. O., Nikolenko, M. O., & Khudyakova, I. O. (2005). Zapobihannya zabrudnennia povitria pylom pid chas transportuvannya vuhillia. *Visti ADI DVNZ «DonNTU»*, 1, 34-38.
7. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka.
8. Wark, K., & Warner, C. F. (1980). *Zagryazneniye vozdukha. Istochniki i kontrol*. Moscow: Mir.
9. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka.
10. U.S. Environmental Protection Agency. (2004). *AERMOD: Description of model formulation*, No. EPA-454/R-03-004. USA, North Carolina. Retrieved from [https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_mfd.pdf](https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf)
11. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security, series C: Environmental Security*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15
12. Fabiano, B., Curro, F., Reverberi, A. P., & Palazzi, E. (2014). Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(2), 150-159. doi: 10.1016/j.psep.2013.01.002
13. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2012). *Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes*, 105. Lyon: International Agency for Research on Cancer.
14. Emmitt, G. D. (1999). Fugitive coal dust: An old problem demanding new solutions. *Port Technology International*, 9, 125-128.
15. Epstein, P. R., Buonocore, J. J., Eckerle, K., Hendryx, M., Stout III, B. M., Heinberg, R., ... & Glustrom, L. (2011). Full cost accounting for the life cycle of coal. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 73–98. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x
16. NSW Chief Scientist & Engineer. (2015). *Initial Report on the Independent Review of Rail Coal Dust Emissions Management Practices in the NSW Coal Chain*. Sydney: NSW. Retrieved from [http://www.chiefscientist.nsw.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0009/79884/Initial-Report\\_Review-rail-coal-dust-emissions.pdf](http://www.chiefscientist.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0009/79884/Initial-Report_Review-rail-coal-dust-emissions.pdf)
17. Szabo, M. F. (1978). *Environmental assessment of coal transportation*. Cincinnati, Ohio: Environmental Protection Agency.

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

Поступила в редколлегию: 30.09.2016

Принята к печати: 12.01.2017

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

UDC 330.322.1:656.2

V. V. ZHELEZNIAK<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Finance and Economic Security», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 74, e-mail zheleznyak.2009@yandex.ua, ORCID 0000-0002-0224-4178

### ECONOMIC AND LEGAL GROUNDS FOR INVESTMENT IN DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

**Purpose.** In Ukraine, as in many countries of the world, transport is one of the most fundamental sectors of the national economy, important part of the industrial and social spheres. But in the conditions of industry reforming there are problems of investing in development of rail transport. So the work is devoted to the grounds of potentially available sources of investment in infrastructure of railway transport of Ukraine. The work stresses the importance of the problem of attracting foreign investment in the economy, highlights the proposals to solve this problem. **Methodology.** To solve the problems of this class the work presents the proposed methods of analysis, synthesis and comparison, deduction, induction, logic and abstraction. It becomes necessary to search for and study of new conceptual approaches to organization of investment processes at railway transport enterprises, appropriate management and financial decisions and schemes of railway infrastructure development. **Findings.** The paper shows ways to optimize investment for modernization and technical re-equipment of the transport complex of Ukraine. It proposes the ways of attracting capital of investors for development of transport infrastructure: 1) compliance with European laws and regulations; 2) reforming of the tax system of Ukraine; 3) combating corruption in the country; 4) implementation of public-private partnership tools into the mechanism of state regulation of investment processes; 5) creating a favorable investment climate for implementation of rail transport infrastructure projects; 6) creating a system of compensation to investors; 7) guarantees of transport infrastructure investment protection. **Originality.** The work offers the sources of investment for development of railway infrastructure in Ukraine, which should include: state budget funds, use of targeted loans and leasing. The main direction of the state policy concerning infrastructure should be a gradual transition of activity in creation and operation of infrastructure facilities from a spending unit (that is a burden for the state) to efficient business through public-private partnerships. **Practical value.** Using these results will ensure the confidence of potential investors to invest in the development of transport infrastructure with income security.

**Keywords:** transport infrastructure; investment; investment activities; government regulation; rail transport

#### Introduction

Worldwide specialists, scholars and transport industry experts confirm that the investment in infrastructure and their increase is effective, efficient, proven by many countries, as well as reliable means of stimulating economic growth in the country. Investment in transport infrastructure development, in the short term, creates new jobs and solves social problems, in the medium term stimu-

lates economic growth in the region, territories, and in the long run creates the effect which reduces transportation costs as a whole, the economy shows certain indicators of growth and, consequently, the quality of life in general is improved.

The problem of disparity between development of rail transport and its infrastructure and the needs of the economy in recent years has significantly deteriorated. Modernization and development of

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

railway transport requires significant investments and the issues related to decision-making, preparation and execution are especially difficult. Although the main problem is access to investment resources (budget funds, access to foreign resources, ability to start charging for rail transportation infrastructure, ability to attract private capital), the analysis shows that improvements can take place through diversification of investments in development of railway transport.

### Purpose

Today, the development of railway transport infrastructure is a prerequisite for Ukraine's integration into the global transport space. World experience shows that investment in railway transportation infrastructure, despite high capital intensity and long payback periods, may be of interest to private investors as «long-term money» instruments provided the guaranteed acceptable (estimated) level of profitability.

The dynamic development of rail transport generates a multiplier effect in key sectors of the Ukrainian economy. Thus, one of the key instruments of economic stabilization of Ukraine could become investments in large infrastructure projects of rail transport. Implementation of such projects, on the one hand, will increase national wealth, and on the other hand, will form the real foundation for economic modernization, i.e. the transition to an innovative development path.

The purpose of this article is grounds of potentially available sources of investment in infrastructure of railway transport of Ukraine. The work stresses the importance of the problem of attracting foreign investment in the economy, highlights the proposals to solve this problem.

### Methodology

To achieve this goal there are proposed methods of analysis, synthesis and comparison, deduction, induction, logic and abstraction. It becomes necessary to search for and study of new conceptual approaches to organization of investment processes at railway transport enterprises, appropriate management and financial decisions and schemes of railway infrastructure development.

Problems of sustainable development of rail transport of Ukraine, effective management and development of its infrastructure in terms of scarce

investment resources are highlighted in the researches of such leading scientists of Ukraine, as: I. M. Aksonov [1], A. H. Iliashenko [4], M. Makarenko, M. Tsvietov [6], Yu. Ye. Pashchenko, O. I. Nykyforuk [8], D. Preiher, O. Sobkevych, O. Yemelianov [9, 10], Ye. Sych, V. Ilchuk [11], N. I. Bohomolova [2], V. L. Dykan, S. P. Loza [3], S. A. Starykh, T. S. Sulakshyn [12] and others. Despite the considerable amount of research, today there is no single approach to the priorities of the financial provision of railway infrastructure. There are unresolved problems of finding reliable sources of investment, development of effective mechanisms for financing rail transport, which requires further research of theory and practice of regulation of investment processes in Ukraine.

### Findings

Accelerated economic development of Ukraine is possible only in case of efficient use of transport infrastructure as a major component of the national transport system and its dynamic development, especially in terms of potential for our country to become a member of WTO, adoption by the Government of Ukraine the financial obligations to the IMF, World Bank and EBRD, implementation of the FTA with the European Free Trade Association (EFTA). In this connection it is necessary to develop and implement an effective strategy for the development of the transport industry of the country, primarily on the basis of finding innovative model of infrastructure restructuring intended for extension of public relations and acceleration of material flows. This requires fulfilment of the country's transport system potential by upgrading the rolling stock, road and rail network branching off, eliminating of disparities of national network in relation to international transport corridors and eliminating of obstacles and barriers to the movement of transnational freight flows, renewal of national shipping by sea and river fleet, updating and strengthening of the air force fleet, including by means of attracting home-produced aircrafts, expansion of regulatory and contractual framework and the geographic structure of transportation.

The purpose of Ukrainian transport integration into the EU transport service market is the state's striving to ensure the development of exports of transport services, to improve the use of

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

transit potential, the competitiveness of domestic transport in the international transport service market [1].

Solving problems of improving the quality of transportation process management in terms of entry into the global transport system should be brought to the international standards of transport infrastructure, which requires significant capital investment from various sources of funding into the modernization of equipment and the purchase of rolling stock [15, 17].

Improved quality of transport services and efficiency transportation will ensure investment in transport, which will improve the economic situation in the country; that is why the legal issues of investment activity, using marketing approach, play a crucial role at the current stage of development of market relations [4].

The relations between cargo owner and transport operator during conducting domestic and international cargo transportation are regulated by the laws and regulations that constitute the legal basis.

Organization of international transportation is regulated by interstate agreements where there is a wide range of participants in the transportation process, regulation of relationship between states on the use of international transport routes and vehicles, the procedure of establishing interstate relations while transporting the goods [8].

The components of the international arrangement are conventions and agreements, which include the general activity principles of individual transport means, organization of international transportation, commercial conditions of freight and passenger transportation, fares, freight rates for the transport and handling of goods, conditions of overload, storage and transportation of high-security freight, environmental pollution and its prevention, as well as other organizational, technical, commercial and legal issues. Implementation of international transportation is controlled in various international transport organizations.

In recent years, the role of foreign investment in the economic development of the countries has been growing. For Ukraine, as for any young state that intends to stabilize its economy and to gradually gain its rightful place on the world stage, the topical issue is attracting foreign investment.

The investment policy is directed on the safe operation of transport and promotes increasing of the technical level of the production base, formed in accordance with transport structures, which differ in terms of their development and competitiveness at the domestic and foreign markets and are divided into companies with sufficient technical and economic potential, capable of to develop independently and improve their own funds to cover expenses that are not reimbursed with published tariffs [6].

Attracting foreign investment is for many years a priority task of Ukraine's economy that in terms of economic crisis requires special attention from the state. Today the situation that has developed with the investment attractiveness of Ukraine could be better.

Investment activity should be developed by means of the investment sources in the form of issuance of securities of development and construction of transportation facilities, use of own sources of transport enterprises for the purchase of shares of transport engineering companies. Here-with it is necessary to ensure the efficiency of investments through their implementation on a competitive basis. Improved investment can be achieved through the use of leasing for replacement and renewal of vehicle fleet and industrial equipment [9].

The practice of developed countries shows the crucial role of investment in solving marketing problems, indicating the importance and necessity of detailed study of investment activities and relations arising in the course of their conducting in Ukraine [16].

The current strategy is to find an investor for whom there are created the appropriate conditions of repurchase of property complex or buyout of a strategic enterprise and to focus on industrial investor who produces, performs works or provides services similar to those of the undertaking privatized. According to experts, such investors may become mainly foreign multinational structures or ventures with participation of domestic and foreign capital [10, 11].

Today Ukraine has the sufficient legal framework that is the basis for the implementation of strategic directions of development of the national transportation system in the medium term, namely Transport Strategy of Ukraine till 2020, Strategy of

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Development of Railway Transport till 2020, Marine Doctrine till 2035, Strategy of Development of Domestic Aircraft Industry till 2020, Concept of the State Target Program of Airport Development till 2020 and other applicable regulations [13, 14].

The existing legislative acts in Ukraine set the special mode of investment, stipulate that entities that implement investment projects are exempt from import duty and VAT at the time of import into Ukraine of equipment, materials, etc. for investment projects; exempt fully or partially from the income tax, obtained from implementation of investment projects [2, 3].

Given the importance of foreign investment and the need to harmonize Ukrainian legislation and the legislation of countries – potential investors, this legal relationship may be regulated both by domestic (national) law and international agreements.

### Originality and practical value

One of the tasks of modernization of Ukraine's economy is creating favourable conditions and real opportunities for the development of the economic potential of railway transport of Ukraine on the basis of intensive development of its infrastructure.

Enhanced use of external and internal investment resources will accelerate structural transformation in the rail industry and contribute to the implementation of strategic projects to upgrade infrastructure and ensure high quality standards of rail service in Ukraine.

The work offers the sources of investment for development of railway infrastructure in Ukraine, which should include: state budget funds, use of targeted loans and leasing. The main direction of the state policy concerning infrastructure should be a gradual transition of activity in creation and operation of infrastructure facilities from a spending

unit that is a burden for the state to efficient business through public-private partnerships.

Public-private partnership is an effective financial mechanism for development of railway infrastructure, which will lead not only to modernization and updating of the material and technical facilities, improving of volume and quality of work, but also will promote investment processes in Ukraine, creating the most powerful launch to the development of related industries.

Using these results will ensure the confidence of potential investors to invest in the development of transport infrastructure with income security.

### Conclusions

Ensuring effective demand for transport, cost-effective operation of rail transport in conditions of economic crisis and active inflation in the country requires huge efforts.

The presented ways of optimizing investment activities and their legal support show that a crucial role in attracting investor capital for upgrading and modernization of the transport sector is played by knowledge of legislation in the field of foreign and domestic relationships that will allow carrying out the investment policy in the legal field. This will ensure the confidence of future investors in the process of investment in transport infrastructure development with income security.

Herewith the mechanism for investment in railway infrastructure upgrading in Ukraine must include (in addition to commonly recognized transport infrastructure financing sources): the state budget funds, the use of targeted loans to accelerate the resolution of issues relating to bottlenecks, in particular, the use of such sources as the issue of debt securities; project and mezzanine financing, syndicated loans and leasing.

### LIST OF REFERENCE LIKS

1. Аксенов, И. М. Эффективность пассажирских железнодорожных перевозок : монография // И. М. Аксенов. – Киев : Транспорт Украины, 2004. – 284 с.
2. Богомолова, Н. І. Фінансова стратегія розвитку залізничного транспорту: сутність та особливості формування [Electronic resource] / Н. І. Богомолова // Ефективна економіка. – 2012. – № 1. – Available at: <http://www.economy.nayka.com.ua/index.php?operation=1&iid=881>. – Title from the screen. – Accessed : 26.01.2017.
3. Дикань, В. Л. Сучасні тенденції та особливості інвестування в Україні / В. Л. Дикань, С. П. Лоза // Вісн. економіки транспорту і промисловості : зб. наук.-практ. ст. / Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2006. – № 15-16. – С. 13–20.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

4. Ільяшенко, А. Х. Державне регулювання макроекономічних умов інвестування / А. Х. Ільяшенко // Інвестиції: практика та досвід. – 2007. – № 6. – С. 16–18.
5. Командровська, В. Є. Проблеми залучення іноземних інвестицій у транспортну інфраструктуру України / В. Є. Командровська, І. І. Любезна // Наук. вісн. Ужгор. нац. ун-ту. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. – Ужгород, 2015. – № 5. – С. 61–66.
6. Макаренко, М. Транспортний сектор економіки України: тенденції та проблеми розвитку / М. Макаренко, М. Цвєтов // Економіст. – 2007. – № 6. – С. 24–27.
7. Михайличенко, К. М. Розвиток залізничного транспорту України в умовах здійснення структурних реформ у галузі та забезпечення економічної безпеки держави / К. М. Михайличенко // Стратегічні пріоритети. – 2014. – № 4 (33). – С. 70–76.
8. Пашенко, Ю. Є. Транспортно-дорожній комплекс України в процесах міжнародної інтеграції : монографія / Ю. Є. Пашенко, О. І. Никифорок. – Ніжин : Аспект-Поліграф, 2008. – 192 с.
9. Прейгер, Д. К. Перспективні шляхи та механізми інтеграції ринку транспортних послуг України до країн ЄС. Аналітична записка [Electronic resource] / Д. К. Прейгер, О. В. Собкевич, О. Ю. Ємельянова. – Available at: <http://www.niss.gov.ua/articles/475>. – Title from the screen. – Accessed : 26.01.2017.
10. Прейгер, Д. К. Реалізація потенціалу транспортної інфраструктури України в стратегії посткризового економічного розвитку. Аналітична доповідь / Д. К. Прейгер, О. В. Собкевич, О. Ю. Ємельянова. – Київ : НІСД, 2011. – 37 с.
11. Сич, Є. М. Інноваційно-інвестиційні комплекси транспортної галузі: методологія формування та розвитку : монографія / Є. М. Сич, В. П. Ільчук. – Київ : Логос, 2006. – 264 с.
12. Старых, С. А. Мировые тенденции инвестирования в развитие железных дорог / С. А. Старых, Т. С. Сулашкин // Экономика железных дорог. – 2012. – № 1. – С. 64–75.
13. Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року [Electronic resource] : розпорядж. Каб. Міністрів України від 16 груд. 2009 р. № 1555-р. – Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1555-2009-%D1%80>. – Title from the screen. – Accessed : 26.01.2017.
14. Транспортна стратегія України на період до 2020 року [Electronic resource]. – Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80>. – Title from the screen. – Accessed : 26.01.2017.
15. Investing in the railway: Seventh Report of Session 2014-15 [Electronic resource] // House of Commons Transport Committee. – London : The Stationery Office Limited, 2015. – 60 p. – Available at: <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201415/cmselect/cmtran/257/257.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 26.01.2017.
16. Oberhelman, D. Road to Growth: The Case for Investing in America's Transportation Infrastructure [Electronic resource] / D. Oberhelman. – Business Roundtable, 2015. – 33 p. – Available at: <http://businessroundtable.org/sites/default/files/2015.09.16%20Infrastructure%20Report%20-%20Final.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 26.01.2017.
17. Rail infrastructure and rolling stock: investments, asset renewal and regulation [Electronic resource] / ed. by M. Finger, N. Bert, D. Kupfer // European Transport Regulation Observer. – 2014. – Iss. 03. – 14 p. – Available at: <http://fsr.eui.eu/Documents/WorkshopPaper/Transport/2014/140428InfrastructureRollingStockObserver.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 26.01.2017.

В. В. ЖЕЛЕЗНЯК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Фінанси та економічна безпека», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 74, ел. пошта [zheleznyak.2009@yandex.ua](mailto:zheleznyak.2009@yandex.ua), ORCID 0000-0002-0224-4178

## ЕКОНОМІКО-ПРАВОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІНВЕСТИЦІЙ У РОЗВИТОК ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

**Мета.** В Україні, як і в багатьох країнах світу, транспорт є однією з найбільш ґрунтовних галузей національної економіки, важливішою складовою частиною виробничої та соціальної сфери. Але в умовах реформування галузі існують проблеми інвестування в розвиток підприємств залізничного транспорту. Тому наукова робота присвячена обґрунтуванню потенційно доступних джерел інвестування в розвиток інфраструктури залізничного транспорту України. Зауважено на важливості проблеми залучення іноземних інвестицій



## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

в економіку, висвітлено пропозиції щодо розв'язання цієї проблеми. **Методика.** Для вирішення задач такого класу в роботі запропоновано застосувати методи аналізу, синтезу та порівняння, дедукції, індукції, логіки та абстрагування. Адже стають необхідними пошук і дослідження нових концептуальних підходів щодо організації інвестиційних процесів на підприємствах залізничного транспорту, відповідних управлінських, фінансових рішень та схем розвитку інфраструктури залізничного транспорту. **Результати.** У роботі наведено шляхи оптимізації інвестиційної діяльності для модернізації та технічного переоснащення транспортного комплексу України. Запропоновано шляхи залучення капіталів інвесторів у розвиток транспортної інфраструктури: 1) відповідність європейським нормативно-правовим актам; 2) реформування податкової системи України; 3) подолання корупції у країні; 4) впровадження інструментів державно-приватного партнерства у механізмі державного регулювання інвестиційних процесів; 5) створення сприятливого інвестиційного клімату для реалізації інфраструктурних проектів залізничного транспорту; 6) створення системи відшкодування збитків інвесторам; 7) надання гарантій захисту інвестицій у розвиток транспортної інфраструктури. **Наукова новизна.** Запропоновано джерела інвестування в розвиток залізничної інфраструктури в Україні, який має включати: кошти державного бюджету, використання цільових позик, лізинг. Основним напрямом державної політики щодо інфраструктури повинен стати поступовий перехід діяльності зі створення й експлуатації об'єктів інфраструктури з витратної сфери (що є тягарем для держави) – в ефективний бізнес на основі державно-приватного партнерства. **Практична значимість.** Використання наведених результатів дозволить забезпечити довіру майбутніх інвесторів до вкладення коштів у розвиток інфраструктури транспорту з гарантією одержання зароблених прибутків.

*Ключові слова:* транспортна інфраструктура; інвестиції; інвестиційна діяльність; державне регулювання; залізничний транспорт

В. В. ЖЕЛЕЗНЯК<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Финансы и экономическая безопасность», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 74, эл. почта zheleznyak.2009@yandex.ua, ORCID 0000-0002-0224-4178

## ЭКОНОМИКО-ПРАВОВОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНВЕСТИЦИЙ В РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

**Цель.** В Украине, как и во многих странах мира, транспорт является одной из наиболее фундаментальных отраслей национальной экономики, важной составной частью производственной и социальной сферы. Но в условиях реформирования отрасли существуют проблемы инвестирования в развитие предприятий железнодорожного транспорта. Поэтому работа посвящена обоснованию потенциально доступных источников инвестирования в развитие железнодорожного транспорта Украины. Отмечена важность проблемы привлечения иностранных инвестиций в экономику, освещены предложения для решения этой проблемы. **Методика.** Для решения задач такого класса в работе предложено использовать методы анализа, синтеза и сравнения, дедукции, индукции, логики и абстрагирования. Ведь становится необходимым поиск и исследование новых концептуальных подходов касательно организации инвестиционных процессов на предприятиях железнодорожного транспорта, соответствующих управленческих, финансовых решений и схем развития инфраструктуры железнодорожного транспорта. **Результаты.** В работе приведены пути оптимизации инвестиционной деятельности для модернизации и технического переоснащения транспортного комплекса Украины. Предложены пути привлечения капиталов инвесторов в развитие транспортной инфраструктуры: 1) соответствие европейским нормативно-правовым актам; 2) реформирование налоговой системы Украины; 3) преодоление коррупции в стране; 4) внедрение инструментов государственно-частного партнерства в механизме государственного регулирования инвестиционных процессов; 5) создание благоприятного инвестиционного климата для реализации инфраструктурных проектов железнодорожного транспорта; 6) создание системы возмещения убытков инвесторам; 7) предоставление гарантий защиты инвестиций в развитие транспортной инфраструктуры. **Научная новизна.** Предложены источники инвестирования в развитие железнодорожной инфраструктуры в Украине, которые должны включать: средства государственного бюджета, использования целевых займов, лизинг. Основным направлением государственной политики в отношении инфраструктуры должен стать постепенный переход деятельности по созданию и эксплуатации объектов инфраструктуры с расходной сферы (что является бременем для государства) – в эффективный бизнес на основе государственно-частного партнерства. **Практическая значимость.** Использование приведенных

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

результатов позволит обеспечить доверие будущих инвесторов к вложению средств в развитие инфраструктуры транспорта с гарантией получения заработанных доходов.

*Ключевые слова:* транспортная инфраструктура; инвестиции; инвестиционная деятельность; государственное регулирование; железнодорожный транспорт

## REFERENCES

1. Aksenov, I. M. (2004). *Effektivnost passazhirskikh zheleznodorozhnykh perevozok*. Kyiv: Transport Ukrainy.
2. Bohomolova, N. I. (2012). Financial Strategy of the Railway: Essence and Features Formation. *Efektivna ekonomika*, 1. Retrieved from <http://www.economy.nayka.com.ua/index.php?operation=1&iid=881>
3. Dykan, V. L., & Loza, S. P. (2006). Suchasni tendentsii ta osoblyvosti investuvannia v Ukraini. *The Bulletin of Transport and Industry Economics*, 15-16, 13-20.
4. Iliashenko, A. K. (2007). Derzhavne rehuliuвання makroekonomichnykh umov investuvannia. *Investytsi: praktyka ta dosvid*, 6, 16-18.
5. Komandrovskaya, V. Y., & Lyubezna, I. I. (2015). The problems of attracting foreign investments in transport infrastructure of Ukraine. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove hospodarstvo*, 5, 61-66.
6. Makarenko, M., & Tsvetov, M. (2007). Transportnyi sektor ekonomiky Ukrainy: tendentsii ta problemy rozvytku. *Ekonomist*, 6, 24-27.
7. Mykhailychenko, K. (2014). Development of rail transport in the context of the implementation of structural reforms in the sector and the economic security of the state. *Strategic Priorities*, 4(33), 70-76.
8. Pashchenko, Y. Y., & Nykyforuk, O. I. (2008). *Transportno-dorozhnyi kompleks Ukrainy v protsesakh mizhnarodnoi intehtatsii*. Nizhyn: Aspekt-Polihrif.
9. Preiher, D. K., Sobkevych, O. V., & Yemelianova, O. Y. *Perspektyvni shliakhy ta mekhanizmy intehtatsii rynku transportnykh posluh Ukrainy do krain YeS. Analychna zapyska*. Retrieved from <http://www.niss.gov.ua/articles/475>
10. Preiher, D. K., Sobkevych, O. V., & Yemelianova, O. Y. (2011). *Realizatsiia potentsialu transportnoi infrastruktury Ukrainy v stratehii postkryzovoho ekonomichnoho rozvytku. Analychna dopovid*. Kyiv: NISD.
11. Sych, Y. M., & Ilchuk, V. P. (2006). *Innovatsiino-investytsiini komplekсы transportnoi haluzi: metodolohiia formuvannia ta rozvytku*. Kyiv: Lohos.
12. Starykh, S. A., & Sulakshin, T. S. (2012). Mirovyie tendentsii investirovaniya v razvitiye zheleznykh dorog. *Ekonomika zheleznykh dorog*, 1, 64-75.
13. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2009). *Stratehiia rozvytku zaliznychnoho transportu na period do 2020 roku* (Ordinance No. 1555-r). Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1555-2009-%D1%80>
14. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2010). *Transportna stratehiia Ukrainy na period do 2020 roku* (Ordinance No. 2174-r). Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80>
15. House of Commons Transport Committee. (2015). *Investing in the Railway. Seventh Report of Session 2014-15*. London: The Stationery Office Limited. Retrieved from <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201415/cmselect/cmtran/257/257.pdf>
16. Oberhelman, D. (2015). *Road to Growth: The Case for Investing in America's Transportation Infrastructure*. Business Roundtable. Retrieved from <http://businessroundtable.org/sites/default/files/2015.09.16%20Infrastructure%20Report%20-%20Final.pdf>
17. Finger, M., Bert, N., & Kupfer, D. (Eds.). (2014). Rail infrastructure and rolling stock: investments, asset renewal and regulation. *European Transport Regulation Observer*, 03. Retrieved from <http://fsr.eui.eu/Documents/WorkshopPaper/Transport/2014/140428InfrastructureRollingStockObserver.pdf>

*Prof. V. V. Bobyl, Dr. Sc. (Ec.), (Ukraine); Ass. Prof. V. Ye. Vlasiuk, Dr. Sc. (Ec.), (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Sep. 07, 2016

Received: Dec. 29, 2016

## UDC 656.2.078(477)

R. PITTMAN<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>U.S. Department of Justice, Antitrust Division, Economic Analysis Group, 450 5<sup>th</sup> St., NW, No. 9004, Washington, DC, 20530, USA, tel. +1 (202) 307 63 67, e-mail Russell.Pittman@usdoj.gov, ORCID 0000-0001-9498-0561

## REFORMING AND RESTRUCTURING UKRZALIZNYTSIA: A CRUCIAL TASK FOR UKRAINIAN REFORMERS

**Purpose.** This article examines options available for Ukraine as the country considers proposals to reform and restructure Ukrzaliznytsia. **Methodology.** The basic restructuring options observed internationally are presented, and the literature concerning their impacts and effectiveness is reviewed. **Findings.** The creation of competition among freight train companies has been found to improve system performance, but the EU policy prescription of complete vertical separation may not be required in order to achieve this. The Americas-style policy of horizontal separation has also been found to improve system performance, and may be more appropriate for a country as large as Ukraine and a railway as dependent on freight operations as Ukrzaliznytsia. **Originality.** Most of the literature on railways restructuring focuses on vertical separation or third party access, while the focus here is on a policy option arguably more appropriate to Ukraine. **Practical value.** Ukraine's economy is dependent on the efficient shipment of bulk commodities such as coal, iron ore, steel, and grains – commodities that travel most economically over long distances by rail. The successful reform and restructuring of Ukrzaliznytsia will be a crucial part of Ukrainian economic reforms going forward.

**Keywords:** Ukrzaliznytsia; railways; reform; restructuring; vertical separation; horizontal separation; competition; investment

### Introduction

If the Ukrainian economy is to be successfully restructured going forward, a restructured railway system will have to be part of the picture. Ukraine's economy depends on the production and sale of a number of bulk commodities, including coal, iron ore, steel, and agricultural products, that require shipment by rail in order to reach both domestic and export markets economically.

The Ukrainian Railway – Ukrzaliznytsia, UZ – was formed as a joint stock company in 2015 from what had been six separate regional railways, each with a good deal of autonomy. UZ suffers from aging locomotives and rolling stock as well as a badly depreciated infrastructure that causes traffic bottlenecks at crucial locations. An important first step in creating a viable railway going forward will be to find ways to attract investment into the system. Given competing demands on government resources, the international experience suggests that this will likely have to focus on private sector participation. Attracting private sector participation, in turn, will likely require a restructuring strategy that relies on market forces and competition rather than government decision makers to direct strategy and operations into the future.

In this paper we first discuss in more detail the crucial role that UZ plays in the Ukrainian economy. We follow with a survey of the world experience with railways restructuring: a large number of countries have already undertaken the task of converting aging government-owned monopoly railways into more dynamic and competitive transport enterprises, and their experience in very diverse settings may have important lessons to offer. We then examine the current state of rail reform plans in Ukraine. We conclude with discussions of an alternative path forward that seems most likely to be successful in Ukraine, based on both the experience elsewhere and the country's current situation.

### Purpose

The purpose of this article is to examine the options available for Ukraine as the country considers proposals to reform and restructure Ukrzaliznytsia.

### Methodology

For this purpose, we begin with a more detailed discussion of the crucial role that Ukrzaliznytsia plays in the economy of Ukraine. We follow with a review of the current literature regarding the international experience with railway costs and with different railway reform models.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

*Ukrainian Railways and the Ukrainian Economy.* Ukraine's economy is based on the production of bulk commodities that generally travel most economically by rail – especially given the relatively poor condition of the country's road and highway system [3, 4, 8, 51]. Ukraine is among the top ten world producers of iron ore, steel, coking coal, wheat, corn, and sunflower oil. Coal (both utility and coking) is the leading commodity carried by rail, making up about a fourth of annual volume; steel, iron ore, and related products make up another quarter; and grains and building materials make up a good portion of the rest. Container traffic has a small but growing presence, especially as transit traffic. A good deal of the freight traffic originates in the east, including coal from the Donbas, iron ore and steel from the Kryvbas, and import and transit traffic from the Russian Federation.

The railway itself is the fourteenth largest in the world in track-km and the sixth most densely operated (as measured by ton-kilometers plus passenger kilometers per track-km). It is a freight-dominant railway, carrying the seventh highest total of ton-km of freight in the world (and not far behind Kazakhstan for sixth place). On the other hand, compared with the railways of other medium to large countries, UZ also carry a large number of passengers – around twenty percent of traffic, a considerably greater percentage than the Russian and Kazakh railways, for example. The combination of export traffic and transit traffic makes up 59 percent of the freight tonnage [9]; a significant portion of this has been freight originating in Russia and ultimately departing from Ukraine either by rail to the west (especially to Poland, the Slovak Republic, and Hungary) or by sea to the south (especially via greater Odessa).

As noted above, UZ was formed in 2015 from the six regional railways that had survived Ukraine's declaration of independence from the USSR in 1991, each of which had enjoyed a good deal of autonomy: the Donetsk Railway, the Lviv Railway, the Odessa Railway, the Southern Railway (Kharkiv), the Southwestern Railway (Kyiv), and the Near-Dnipro Railway (Dnipropetrovsk). (See Fig. 1.) The Donetsk, Near-Dnipro, and Odessa had traditionally been the most heavily used and the most important for freight, given their locations centered on coal mining (Donetsk), iron ore and steel production (Near-Dnipro), and port activities

(Odessa). Before the formation of JSC UZ in 2014, both international lenders and local reformers had expressed frustration at the inability of the central government and/or railway administration to impose more effective centralized control on these regional lines.

UZ freight tariffs are set on the same basis that was used when the Ukrainian railways were a part of Soviet Railways: on the old tariff book Tariff 10-01. As in Russia, Tariff 10-01 separates freight tariffs into three broad classes of commodities that may be roughly categorized as raw materials, intermediate goods, and final products:

- Class I commodities include coal, ores, timber, and construction materials such as sand, stone, and concrete.

- Class II includes oil, grain, fertilizers, food, and a broad collection of intermediate goods.

- Class III contains finished chemicals and metals, machinery, and most finished manufactured goods.

Individual tariffs in each category are then determined using a declining scale for distance of haul and adjusting for shipment size and charges for loading and unloading. The overall rationale behind the tariff structure is basically twofold: to encourage long-distance shipments at affordable rates, and to charge for shipping each commodity no more than a target percentage of its delivered price [22, 39].

Like many railways around the world, UZ is required to cross-subsidize loss-making passenger operations from the profits of its freight operations [5]. Also like many railways around the world, this requirement to cross-subsidize passenger operations has made it more difficult for the railway to devote sufficient resources to the maintenance of current equipment and the acquisition of new equipment [2]. Worse, weak corporate governance at UZ has led to a procurement system characterized by low quality inputs purchased at high cost [10]. Even more importantly, large, politically influential shippers pay preferential tariffs that at best cover only direct costs [11, 45]. The result is that the locomotive and rolling stock parks are heavily depreciated and generally in poor operating condition; likewise, the track infrastructure is heavily depreciated and exhibits costly bottlenecks in several regions of the country [10, 11, 12]. A high priority going forward will be a reform plan that is able to attract large flows of investment into infrastructure, locomotives, and rolling stock [2, 6, 7].



Fig. 1. Six Ukrainian Railways

*The World Experience with Railways Restructuring.* The decades of the 1990's and the 2000's were everywhere periods of neoliberal reform and privatization strategies in general and in the railways sector in particular [19]. As in other infrastructure sectors, railways reforms around the world have tended to focus both on the introduction of private-sector participation and on the possibilities for the creation of competition in the context of what has been traditionally considered a natural monopoly. Also as in other infrastructure sectors, economists around the world have tended to favor the structural separation of going concerns as a sort of default option – as the generally preferred method of restructuring to create competition among users of a network. It has only been recently that much scholarly attention has been paid to the potentially negative cost implications of this policy in industries as diverse as railways, electricity, telecommunications, and water [40, 41, 46, 55].

A great deal of the policy debate regarding railways restructuring has concerned the possible creation of competition among multiple train-operating companies over a monopoly track infra-

structure. With this possibility has come the question of whether such competition would be more effective in the presence of complete «vertical separation» between infrastructure and train operations, or whether a less drastic «third party access» regime – under which the incumbent UZ would remain vertically integrated but would be required to provide infrastructure access to independent train-operating companies under regulated terms and conditions – would be sufficient to support the introduction of competition, perhaps accompanied by some kind of «accounting separation» of the incumbent with the creation of an overall holding company. Although Britain's pioneering experience with complete vertical separation is generally considered a cautionary tale, the competition directorate of the European Community continues to push member countries in that direction.

As an alternative, minority voices in the debate have called for the creation of competition among multiple vertically integrated railway enterprises – a strategy sometimes termed «horizontal separation» to contrast it with «vertical separation» [7, 41]. Under such a strategy, each railway enterprise runs trains on only the infrastructure that it con-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

trols, but shippers hope to enjoy either «parallel competition» – competing railway lines serving the same origin-destination pairs, as is common in the United States and Canada – or «geographic competition» – competing railway lines radiating out from common points, as in Mexico and Argentina. Fig. 2 shows a stylized version of the Mexican railway system as it was restructured in the 1990's, with three vertically integrated companies competing mostly to carry freight in multiple directions between Mexico City and different ports and US gateways.

One notably successful aspect of the implementation of the horizontal separation model has been the attraction of private investments into these rail systems, initially in the form of bids for multi-decade franchise rights, and subsequently in the form of investments in to the infrastructure, locomotives, and rolling stock of the newly created vertically integrated railways. In both Brazil and Mexico, for example, the governments required the controlling rights of each franchise to be held by

domestic investors, but encouraged the participation of international investors. Table 1 shows the winning bids for the franchise rights that resulted from the franchising in the two countries and the lengths of the principal railways. I calculate that the ten franchised freight railways average just over 4000 track-km in length, and that the average winning bid was US\$95,700 per track-km, in late 1990's US\$.

Furthermore, in the fifteen years following the restructuring in Mexico, private investments into the system totaled over US\$6 billion – more than double the amount required and pledged by the consortia that won the [53].

As the railways reform debate has progressed and different options have been pursued in different countries, there come to be greater appreciation of the possibility that different reform strategies might be appropriate in different countries and environments. There has in many cases also come to be a differentiation in the strategic options pursued for freight and passenger operations [27].



Fig. 2. Geographic competition: the restructured Mexican railways

Table 1

**Values of winning bids for Brazilian and Mexican rail concessions. Source: Campos (2001);  
Villa and Sacristán-Roy (2013); author's calculations.**

	Date of Concession	Length (track-km)	Winning bid (US\$ million, at contemporaneous exchange rates)
<b>Mexico</b>			
Northeast	1997	4 296	\$1 400
Southeast	1998	1 484	\$322
Pacific-Northwest	1998	8 454	\$527
<b>Brazil</b>			
Oeste	1996	1 621	\$61.2
Centro-Leste	1996	7 080	\$310.7
Sudeste	1996	1 674	\$871.5
Tereza Cristina	1997	164	\$16.5
Sul	1997	6 586	\$193.4
Nordeste	1998	4 534	\$13.1
Paulista	1999	4 236	\$123.7
<b>Totals</b>		40,129	\$3 839
<b>Average</b>		4 013	\$384
<b>Average omitting Tereza Cristina</b>		4 441	\$425
<b>Average US\$/km</b>	\$95,700		
<b>Average US\$/km, omitting Tereza Cristina</b>	\$95,600		

Britain is a good example. As mentioned, that country has been one of the pioneers in the creation of competition in railways. Originally the focus was on complete vertical separation and the creation of competition among multiple independent train-operating companies in both the freight and passenger areas. However, eventually it came to be widely believed that in an era of both widespread automobile ownership and discount airlines, passenger rail was dependent on government subsidies simply to survive. In that case on-track passenger rail competition was not sustainable, and the focus of policy moved to the creation of competition for monopoly franchises to control particular regional passenger rail operations in the tradition of Chadwick [16] and Demsetz [23].

On the other hand, on the freight side the introduction of on-track competition has led to vigorous

duopoly competition between the old English, Welsh, and Scottish Railway (EWS, now a subsidiary of the German rail freight company DB Schenker) and Freightliner [36]. More generally, around the world, freight-dominant railway systems pay their own way without large-scale government subsidies, and in fact generally earn profits, pay taxes, and cross-subsidize passenger operations.

Empirical efforts to evaluate systematically the outcomes of the recent spate of railways reforms around the world, and especially to isolate the relative performance of different reform models, have been hampered by problems of data availability and quality, the short time period involved since reforms have been implemented, differences among railways sectors in different countries, and the possible endogeneity of reforms – both the re-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

form decision itself and the reform path chosen. The best and most recent studies suggest that most reform efforts have led to improved efficiency, though in addition to possible endogeneity one possible explanation here is simply that increased attention to industry structure and efficiency by itself leads to improvements. Among the more specific findings:

- Where competition has been created among multiple train-operating companies (TOC's) – so-called «above-the-rail» competition – for *passenger* operations, the European experience suggests that generally fares have been reduced and services have improved, but costs have increased, presumably reflecting the sacrifice of firm-level economies of density of operations [36, 37, 48].

- Where competition has been created above-the-rail for *freight*, the European experience has been more conspicuously successful, with incumbents in several countries rapidly losing market share to more nimble entrants [20, 24, 31].

- In general, reforms that have allowed additional TOC's to use the infrastructure have been found to increase operational efficiency as measured by data envelope analysis and stochastic production frontiers [21, 29, 49]. However, it is not at all certain that complete vertical separation is more conducive to the introduction of competition or to increased efficiency than is a third party access model, perhaps structured around accounting separation of the incumbent [35, 49].

- The alternative strategy of horizontal separation of freight railways – the creation of multiple competing vertically integrated freight railways – has in several cases succeeded in attracting a great deal of private investment into previously moribund state operated railways and diverted significant levels of traffic from road back to rail, to the benefit of shippers, the broader economy, and the environment [15, 25, 32, 52, 53].

- The vertical separation and third-party access models have mostly been applied in small-to-medium sized countries in Europe where passenger operations dominate the railways business. The horizontal separation model has mostly been applied in larger countries in the Americas where freight operations dominate the railways business – though some smaller Latin American countries have followed this strategy as well, including Colombia, Peru, and Uruguay [32, 41].

Of course any discussion of the restructuring of

existing railway enterprises raises the issue of the structure of railway costs. This is an issue that has been much examined in the empirical literature, though there are inevitably differences in results based on samples, assumptions, and techniques. We may summarize the discussion regarding three important aspects of railway cost functions as follows:

- It seems by now well established that there are economies of vertical integration in railways, and thus that complete vertical separation increases transactions costs and operating costs – though the magnitude of increase is very much in dispute. Vertical separation seems to increase costs more than otherwise a) in rail systems that are very densely operated, and b) in rail systems with a high proportion of freight traffic vis-à-vis passenger [27, 35]. The former likely reflects straightforward advantages of intrafirm rather than interfirm coordination of operations, while the latter likely reflects the greater track wear caused by heavy freight trains, and the difficulty of getting the inter-firm incentives set just right to address that problem [44].

- Economies of scale, *as measured by system size*, seem to be exhausted at relatively moderate scales of operation. Savignat and Nash [50] report a consensus in the literature that only relatively small railways operate at a level of unexhausted economies of system size, and Wilson [54] finds that at the mean of his sample, US class I railways are operating with slight diseconomies of system size. The results of Bitzan [13] suggest a flattening of the cost curve for system size at around 5 000 miles, while Chapin and Schmidt [17] also find a flattening of the cost curve, but at about twice that mileage level. More recently, Christensen Associates [18] conclude that all the major U.S. railways are operating in a range of constant returns to scale, and have been for many years. Note that the average size of the concessions granted in Brazil and Mexico was in the 4000-4500 track-km range (Table 1).

- It appears, on the other hand, that economies of scale *as measured by density of operations* persist in more railway settings. Econometric studies have generally found that most existing freight railways are operating at levels where economies of density are not yet exhausted; this is the conclusion of a review of the literature by Savignat and Nash [50] and of studies of US class I railways by



## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Wilson [54], Ivaldi and McCullough [29], and Bitzan [13]. Only recently has Christensen Associates [18] concluded that the major U.S. railways have likely exhausted all available economies of density, which is consistent with widespread reports of congestion and the difficulty of securing service on the major lines.

### Findings

Ukraine by now has a long history of announced plans for restructuring the Ukrainian Railways, but unfortunately very little record of actually implementing changes [1]. Governments introduced detailed reform plans in 2006, then again in 2009, and then again in 2011, with the 2011 plan looking very much like the Russian plan: three stages of reforms, beginning with the creation of a single joint stock company Ukrzaliznytsia and the separation of the operating and regulatory functions of the existing railways, moving through the spin-off of noncore activities, the elimination of the requirement that freight operations cross-subsidize passenger operations, and the freeing of tariffs for goods enjoying a «competitive transport market», and concluding by 2019 with a system of «equal access to the infrastructure facilities for all economic entities». Thus far the creation of JSC UZ has been the only significant result of the reform plans.

Since there were apparently no plans in Ukraine (again as in Russia) to separate control of the incumbent infrastructure from the incumbent locomotives and train operation, the broad plan just described sounded like it might refer to an eventual third party access regime, with independent carriers owning their own locomotives and running their own trains over the UZ infrastructure. In fact, however, in both Ukraine and Russia one stated goal of the reforms was to allow privately owned and operated passenger trains, but not – or at least not mentioned – freight trains [42].

All this changed in 2015, as the Infrastructure Ministry under Andriy Pyvovarsky introduced legislation, enacted by the Rada, that would «corporatize» but not «privatize» JSC UZ while allowing entry into the market by independent train operating companies carrying either passengers or freight. UZ as the infrastructure operator would be required to provide non-discriminatory access to the infrastructure under a regulated set of tariffs,

which would be monitored and regulated by a National Commission on Transport Regulation. That new commission would also regulate some passenger and freight tariffs, but others would be freed. An infrastructure maintenance and investment fund would be created through a specified component of both shipper tariffs and access charges.

In other words, Ukraine has taken the first steps toward emulating the European rail restructuring model of third-party access (though not full vertical separation) regimes for both passenger and freight, with UZ continuing to operate its own trains in competition with independent TOC's.

This reform model clearly has the potential to stimulate significant improvements vis-à-vis the UZ status quo. As noted above, third-party, independent *freight* TOC's have offered quite effective competition to incumbent, vertically integrated TOC's in a number of European countries – beginning in the east in Poland and Romania, but gradually moving west, especially as German incumbent DB and French incumbent SNCF have begun offering services in other countries. Particularly in Eastern Europe, some of the new TOC's entering into freight service have been large shippers of bulk freight integrating backward into transport operations in order to create alternatives for shipping both their inputs and their outputs. The result has been new investments not only in rolling stock but also in locomotives, as well as increased options and improved service for shippers, thus strongly supporting economic growth.

It seems likely that a number of large Ukrainian shippers would be candidates for backward vertical integration into TOC's in order to improve the quality of their own logistics (or to obtain better service from UZ by threatening to do so), including the agribusinesses Kernel and Nibulon and coal miner and electricity generator DTEK. Similarly, based on their past and current strategies, one would expect not only Germany's DB and France's SNCF but also Poland's PKP and, in a hoped-for peaceful future, Russia's RZhD to be interested in extending their train operations into Ukraine, if given the opportunity.

The appearance of independent *passenger* TOC's seems less likely, though certainly not impossible. As noted above, in most countries passenger rail services would not survive without subsidies from either governments or freight operations, so the likelihood of the entry of a second

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

passenger TOC into the market to offer competition to a (presumably government-subsidized) UZ passenger TOC seems not high. An exception might be at the high end of the market; in Russia, for example, two high quality TOC's have entered the popular Moscow-St. Petersburg market to offer high end service at unregulated rates [28, 34].

What about resources for investment into the infrastructure? This is where the international experience with the third party access reform model has been less conspicuously successful. As noted above, the Ukrainian plan calls for the formation and segregation of an investment fund that would be financed through a specified component of both shipper tariffs and access charges. If this mechanism works as intended, it could solve the common problem of the difficulty of funding state-owned railway infrastructure. However, based on worldwide experience, one may justifiably harbor doubts that both UZ management and the government will be able to show the discipline to use such a (potentially) large pot of funds for their intended purposes only [2, 41].

A sober prediction may be that the current Ukrainian reform plan may be quite successful in encouraging private investment in rolling stock and locomotives and in creating competition for freight railroad haulage and perhaps even passenger railroad service, but ultimately a disappointment in encouraging and protecting the infrastructure investments required for the successful operation of a modern, heavily used freight railway. Since, as noted at the beginning of this paper, this issue is likely to be a crucial one for the future effectiveness of UZ in contributing to Ukrainian economic reform and growth, this may be a serious drawback to the adoption of this reform model in Ukraine.

And this in turn may argue for consideration of an alternative reform plan: a Mexican-style division of the entire UZ enterprise into two or three independent, vertically integrated railway companies, competing for the business of shippers mostly at points commonly served but perhaps over some parallel lines as well. This option has been seriously discussed, though so far rejected, as a reform plan for RZhD in Russia [26], and it would appear to hold a number of attractions for Ukraine as well – though a number of complications as well. Fig. 3 shows one published version of a Russian scenario.

The main advantages of such a plan are straightforward to list: the creation of competition

for shippers, the maintaining of economies of vertical integration, and the likely willingness of private investors to offer significant bids for long-term franchise fees and, upon winning a franchise, to invest significant amounts into the maintenance and upgrading of their new railway infrastructures. As noted above, for the 10 railways franchised in the late 1990's in Brazil and Mexico, the winning bid was almost US\$100,000 per track-km. The International Transport Forum calculates that just under 50 percent of the substantial investments made by the two largest Mexican concessionaires between 2007 and 2012 were allocated to track infrastructure – about US\$1 billion total over that six-year period [38].

The most important points for originating traffic on UZ are the coal mining areas around Donetsk in the east and the iron ore and steel making areas around Dnipropetrovsk and Kryvyi Rih in the center-east. The port area around Odessa both originates and terminates a good deal of Black Sea freight. Generally, the heaviest freight flows go (or have gone until recently) directly between the Russian border, through the Donbas and the Kryvbas, and either to the Odessa port area in the south, to Kyiv in the center north, or to the western border crossings with Hungary, the Slovak Republic, and Poland.

Thus in the same way that both published scenarios for horizontal separation in the Russian railways begin with the notion of geographic competition based on multiple railways serving the coal-producing Kuzbas from different directions [26, 47], a promising basis for horizontal competition in the Ukrainian railways in a hoped-for peaceful future could be the creation of an east-facing railway connecting shippers originating coal, iron ore, and/or steel products with border crossings of the Russian Federation. RZhD would likely be one of several bidders for the franchise rights for this «Eastern Ukrainian Railway».

At the western termination points of this Eastern Ukrainian Railway, the track infrastructure serving multiple shippers could be jointly controlled – as it is in Mexico – by the railway companies competing to carry freight in both directions as well as either the regional or federal government and/or the most important shippers themselves. From those points at the western termination of the Eastern Ukrainian Railway, either one or two additional railway enterprises could be created. The

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

map on the Fig. 4 adds two independent railways heading west from the coal and steel regions, with shippers at Kharkiv enjoying geographic competition from three railways heading in three different directions, shippers at Kyiv, Odessa, and points in the Donbas and Kryvbas served by two railways,

and both eastern and western borders served as well by two railways. Both large domestic shippers and foreign railway companies like Deutsche Bahn, PKP, and SNCF are potential bidders for the long-term franchise rights to such railways [43].

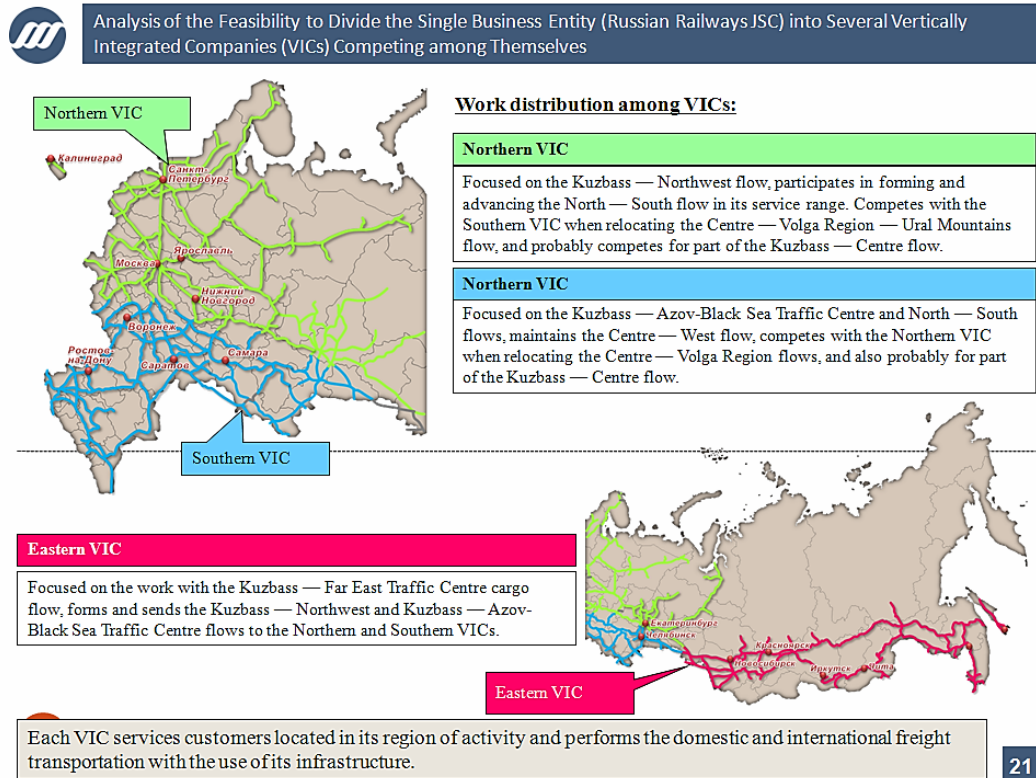


Fig. 3. One plan for a horizontally separated Russian railways system, from the Institute of Natural Monopolies Research, Moscow (RSPP, 2013)

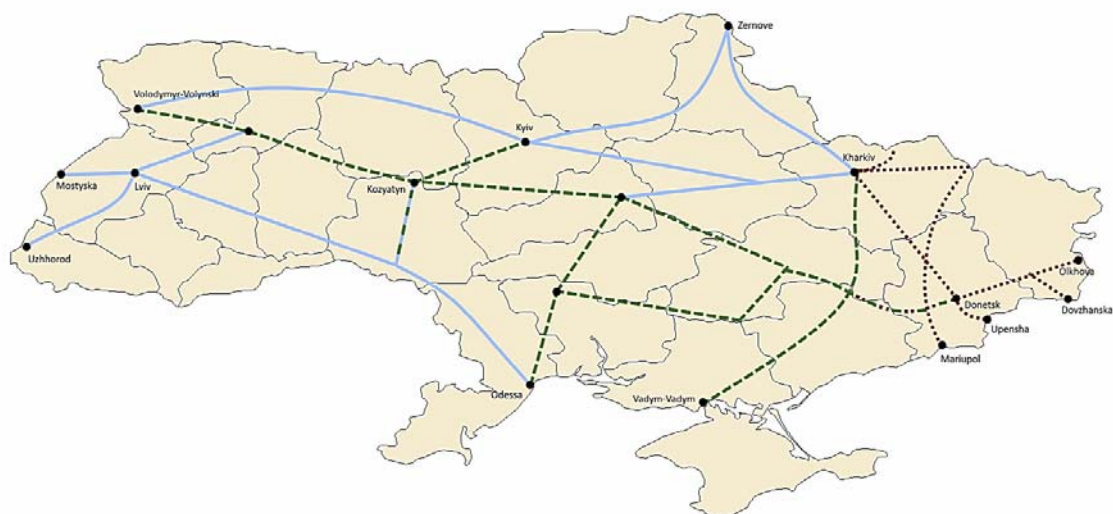


Fig. 4. One possible plan for three competing, horizontally separated railways in Ukraine

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Obviously, however, much more work would have to be done to actually craft three (for example) potentially coherent railway enterprises from the overall national network.

### Originality and Practical Value

For now, at least, Ukraine labors under the significant burden of active hostilities in its eastern region at the same time as politicians, activists, and analysts work to create and implement economic reforms that would successfully create a dynamic and productive market economy. At a time when even the overall outlines of the future Ukrainian economy are uncertain, the railways are not at the top of many lists for attention. Yet Ukraine's economy of resource extraction, heavy industry, and agriculture promises to be dependent the existence of a reliable railway system for quite a long time, and a successful effort to get railway reforms right would be an important step in that direction.

To date, the European experience with vertical separation and third-party access regimes has appeared to enjoy considerably greater influence in the Ukrainian railways reform debates (and the Russian, and the Kazakh) than has the North and South American experience with horizontal separation. This is probably unfortunate, since the size of the country as well as the dominance of freight in its railway operations arguably makes the latter experience more directly applicable, and more likely to be adaptable in a straightforward manner to the Ukrainian context. In particular, if the country continues along the basic path of the European railways reform agenda, it is likely to achieve the same results: increased private investment in roll-

ing stock, but continued dependence on the unreliable state budget for funding for both locomotives and infrastructure.

### Conclusions

As conclusion I have argued here that the North and South American experience suggests that a country like Ukraine could use the horizontal separation strategy to carve two or three independent, vertically integrated freight railways from the existing system, railways of a size that has been shown to be viable in Brazil and Mexico, and that in a hoped-for peaceful future, international investors would likely be willing to bid large amounts for control rights to railway franchises so created as well as to then spend large amounts of their own capital to upgrade the competing regional railways. I have argued that the principal advantages of such a reform strategy are the creation of rail competition at multiple locations, the preservation of economies of vertical integration, and the likely elimination of the need for the Ukrainian railways to remain in the lengthy queue for government resources to upgrade and maintain the rolling stock, locomotives, and infrastructure.

Whether such a scenario is in fact the optimal path for the Ukrainian railways going forward is a question that clearly merits much deeper examination. The stakes at issue suggest that a simple decision to follow the previously adopted Russian-style reform plan may lock out the potential for much more promising options, and for a more dynamic and vibrant railway to support Ukrainian economic growth.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Гриценко, Н. В. Комплексний огляд реформування залізничного транспорту України / Н. В. Гриценко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 249–253.
2. Козаченко, Д. Реформи на запасній колії [Electronic resource] / Д. Козаченко, А. Верлан, О. Кутателадзе // Голос України. – 2015. – 22 жовт. – Available at: <http://www.golos.com.ua/article/260179>. – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
3. Логвінова, Н. О. Економіко-математичне обґрунтування розподілу поїздопотоків на напрямку залізничних перевезень з паралельними ходами Знам'янка–Одеса / Н. О. Логвінова // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 2 (44). – С. 92–98. doi: 10.15802/stp2013/12994.
4. Макушенко, І. Модернізація тарифної системи Укрзалізниці – Quo Vadis? [Electronic resource] / І. Макушенко // VoxUkraine. – 2015. – Available at: <http://voxukraine.org/2015/11/06/modernizatsiya-taryfnoi-systemy-ukrzeliznytsi-quo-vadis-ua/>. – Title from Screen. – Accessed : 18.01.2017.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

5. Марценюк, Л. В. Вдосконалення процесу вантажних перевезень та механізму управління ними / Л. В. Марценюк, А. В. Вишнякова // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 2 (50). – С. 41–48. doi: 10.15802/stp2014/23743.
6. Марценюк, Л. В. Вплив залізничного транспорту на розвиток національної економіки України / Л. В. Марценюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 274–278.
7. Петренко, Е. А. Проблема монополізму на залізничному транспорті / Е. А. Петренко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 40. – С. 296–300.
8. Садловська, І. П. Аналіз сучасних вантажопотоків в Україні та напрями їх розвитку / І. П. Садловська // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 42. – С. 317–324.
9. Фінансовий план ПАТ «Укрзалізниця» на 2016 рік [Electronic resource] / Міністерство інфраструктури України. – 2016. – Available at: <http://mtu.gov.ua/news/26510.html>. – Title from Screen. – Accessed : 18.01.2017.
10. Arslanov, M. Interview with the Deputy Minister of Infrastructure: How Ukrzaliznytsia Will Be Reformed [Electronic resource] / Centre for Transport Strategies. – 2015. – Available at: [http://en.cfts.org.ua/articles/interview\\_with\\_the\\_deputy\\_minister\\_of\\_infrastructure\\_how\\_ukrzaliznytsia\\_will\\_be\\_reformed](http://en.cfts.org.ua/articles/interview_with_the_deputy_minister_of_infrastructure_how_ukrzaliznytsia_will_be_reformed). – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
11. Arslanov, M. The Agenda: the Tasks Facing the New Head of the Infrastructure Ministry [Electronic resource] / Centre for Transport Strategies. – 2014. – Available at: [http://en.cfts.org.ua/articles/the\\_agenda\\_the\\_tasks\\_facing\\_the\\_new\\_head\\_of\\_the\\_infrastructure\\_ministry](http://en.cfts.org.ua/articles/the_agenda_the_tasks_facing_the_new_head_of_the_infrastructure_ministry). – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
12. Arslanov, M. Ukrzaliznytsia Steps On Its Brakes: Why Its Reform Has Slowed Down [Electronic resource] / M. Arslanov / Centre for Transport Strategies. – 2013. – Available at: [http://en.cfts.org.ua/articles/ukrzaliznytsia\\_steps\\_on\\_its\\_brakes\\_why\\_its\\_reform\\_has\\_slowed\\_down](http://en.cfts.org.ua/articles/ukrzaliznytsia_steps_on_its_brakes_why_its_reform_has_slowed_down). – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
13. Bitzan, J. D. The Structure of Railroad Costs and the Benefits/Costs of Mergers / J. D. Bitzan // Research in Transportation Economics. – 1999. – Vol. 5. – P. 1–52. doi: 10.1016/S0739-8859(99)80003-1.
14. Bonner, B. New infrastructure minister: «There will be no corruption» [Electronic resource] // KyivPost. – 2016. – Available at: <https://www.kyivpost.com/article/content/reform-watch/new-infrastructure-minister-there-will-be-no-corruption-here-412912.html>. – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
15. Campos, J. Lessons from railway reforms in Brazil and Mexico / J. Campos // Transport Policy. – 2001. – Vol. 8. – Iss. 2. – P. 85–95. doi: 10.1016/S0967-070x(01)00007-5.
16. Chadwick, E. Results of Different Principles of Legislation in Europe: of Competition for the Field as Compared with Competition within the Field of Service / E. Chadwick // J. of the Statistical Society of London. – 1895. – Vol. 22. – Iss. 3. – P. 381–420. doi: 10.2307/2338385.
17. Chapin, A. Do Mergers Improve Efficiency? Evidence from Deregulated Rail Freight / A. Chapin, S. Schmidt // J. of Transport Economics and Policy. – 1999. – Vol. 33, No. 2. – P. 147–162.
18. Christensen, L. R. An Update to the Study of Competition in the U.S. Freight Railroad Industry: Final Report / L. R. Christensen. – Washington, DC : Surface Transportation Board, 2010. – 147 p.
19. Competition in the Railway Industry: An International Comparative Analysis / ed. by J. Gómez-Ibáñez. – Northampton, MA : Edward Elgar Publishing, 2006. – 224 p.
20. Competition in Freight Railways: «Above-the-Rail» Operators in Central Europe and Russia / R. Pittman, O. Diaconu, E. Šip [et al.] // J. of Competition Law and Economics. – 2007. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 673–687. doi: 10.1093/joclec/nhm028.
21. Couto, A. The determinants of efficiency and productivity in European railways / A. Couto, D. Graham // Applied Economics. – 2009. – Vol. 41. – Iss. 22. – P. 2827–2851. doi: 10.1080/00036840801949782.
22. Dementiev, A. Reforming Russian Railways: Introduction of Competition and New Regulatory Challenges [Electronic resource] / A. Dementiev // Competition and Ownership in Land Passenger Transport: Selected Papers from the 9th Intern. Conf. / eds. Rosario Macario, Jose Manuel Viegas, David A. Hensher. – Amsterdam : Elsevier, 2006. – Available at: [https://www.hse.ru/data/302/314/1234/AD\\_reform.pdf](https://www.hse.ru/data/302/314/1234/AD_reform.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
23. Demsetz, H. Why Regulate Utilities? / H. Demsetz // J. of Law and Economics. – 1968. – Vol. 11. – Iss. 1. – P. 55–65. doi:10.1086/466643.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

24. Deville, X. Implementation of EU legislation on rail liberalization in Belgium, France, Germany and The Netherlands [Electronic resource] / X. Deville, F. Verduyn. – Brussels, 2012. – 160 p. – Available at: <https://www.nbb.be/doc/ts/publications/wp/wp221en.pdf>. – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
25. Estache, A. Privatization and Regulatory Reform in Brazil: The Case of Freight Railways / A. Estache, A. Goldstein, R. Pittman // *J. of Industry, Competition and Trade*. – 2001. – Vol. 1. – Iss. 2. – P. 203–235. doi: 10.1023/A:1012834715715.
26. Evaluation of Most Feasible Infrastructure and Transportation Operations Integration Model // *Destination Freight Transportation Services Market Model Implementation Until 2015 : Proc. Conf. / Russian Union of Industrialists and Entrepreneurs, Transport and Transport Infrastructure Committee*. – Moscow, 2013.
27. EVES-Rail: Economic Effects of Vertical Separation in the Railway Sector [Electronic resource] : CER (Community of European Railways and Infrastructure Companies) / D. Van de Velde, C. Nash, A. Smith, [et. al]. – Brussels, 2012. – Available at: [http://www.cer.be/sites/default/files/publication/EVES-Rail\\_-\\_Final\\_\\_v6.4.3\\_\\_SUMMARY.pdf](http://www.cer.be/sites/default/files/publication/EVES-Rail_-_Final__v6.4.3__SUMMARY.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
28. Features and Peculiarities of the Russian Passenger Rail Market Development / E. M. Razumovskaya, L. V. Lapidus, T. S. Mishakin, M. L. Popov // *Mediterranean J. of Social Sciences*. – 2014. – Vol. 5, No. 18. – P. 165–170. doi: 10.5901/mjss.2014.v5n18p165.
29. Friebe, G. Railway (De) Regulation: A European Efficiency Comparison / G. Friebe, M. Ivaldi, C. Vibes // *Economica*. – 2010. – Vol. 77. – Iss. 305. – P. 77–91. doi: 10.1111/j.1468-0335.2008.00739.x.
30. Ivaldi, M. Density and Integration Effects on Class I U.S. Freight Railroads / M. Ivaldi, G. J. Mc Cullough // *J. of Regulatory Economics*. – 2001. – Vol. 19. – Iss. 2. – P. 161–182. doi: 10.1023/A:1011149324027.
31. Knieps, G. Competition and the Railroads: A European Perspective / G. Knieps // *J. of Competition Law and Economics*. – 2013. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 53–169. doi: 10.1093/joclec/nhs040.
32. Kogan, J. Latin America: Competition for concessions / J. Kogan // *Competition in the Railway Industry. An Intern. Comparative Analysis* / eds. by J. A. Gómez-Ibáñez, Ginés de Rus. – Northampton, MA : Edward Elgar Publishing, 2006. – P. 153–176. doi: 10.4337/9781847202949.00016.
33. Krasnikov, D. Rail administration chief says need for modernization ‘immense’ [Electronic resource] / D. Krasnikov // *KyivPost*. – 2016. – Available at: <https://www.kyivpost.com/article/content/reform-watch/rail-administration-chief-says-need-for-modernization-immense-421463.html>. – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
34. Lazarev, A. Russian Railways: Reform is in the Home Stretch / A. Lazarev // *RZD-Partner International*. – 2012. – № 29. – P. 16–17.
35. Mizutani, F. Does vertical separation reduce cost? An empirical analysis of the rail industry in European and East Asian OECD countries / F. Mizutani, S. Uranishi // *J. of Regulatory Economics*. – 2013. – Vol. 43. – Iss. 1. – P. 31–59. doi: 10.1007/s11149-012-9193-4.
36. Nash, C. Comparing Three Models for Introduction of Competition into Railways / C. Nash, J. E. Nilsson, H. Link // *J. of Transport Economics and Policy*. – 2013. – Vol. 47, pt. 2. – P. 191–206.
37. Nash, C. Competition in Rail Passenger Services [Electronic resource] : Slide Presentation / C. Nash // *Institute for Transport Studies, University of Leeds*. – Leeds, 2011. – Available at: [http://www.fedea.net/transporte/PDF/ii\\_workshop/Presentation\\_Chris%20Nash.pdf](http://www.fedea.net/transporte/PDF/ii_workshop/Presentation_Chris%20Nash.pdf). – Title from Screen. – Accessed : 27.01.2017.
38. Peer Review of Railway Freight Development in Mexico [Electronic resource] : Report of the International Transport Forum / S. Perkins, P. Amos, J. Kohon, L. S. Thompson. – Paris, 2014. – Available at: <http://www.tgaassoc.com/publications.html>. – Title from Screen. – Accessed : 16.01.2017.
39. Pittman, R. Blame the Switchman? Russian Railways Restructuring after Ten Years / R. Pittman // *The Oxford Handbook of the Russian Economy* / eds. by M. Alexeev, S. Weber. – Oxford : Oxford University Press, 2013. – 864 p. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199759927.013.0001.
40. Pittman, R. Make or buy on the Russian railway? Coase, Williamson, and Tsar Nicholas II / R. Pittman // *Economic Change and Restructuring*. – 2007. – Vol. 40. – Iss. 3. – P. 207–221. doi: 10.1007/s10644-007-9024-2.
41. Pittman, R. Options for Restructuring the State-Owned Monopoly Railway / R. Pittman // *Research in Transportation Economics*. – 2007. – Vol. 20. – P. 179–198. doi: 10.1016/S0739-8859(07)20007-1.
42. Pittman, R. Railways Restructuring and Ukrainian Economic Reform / R. Pittman // *Man and the Economy*. – 2015. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 87–107. doi: 10.1515/me-2015-0006.
43. Pittman, R. Restructuring the Ukrainian Railway: Low Hanging Fruit for the Country’s Fiscal Needs [Electronic resource] // *VoxUkraine*. – 2015. – Available at: <http://voxukraine.org/2015/01/17/restructuring-the-ukrainian-railway-low-hanging-fruit-for-the-countrys-fiscal-needs/>. – Title from Screen. – Accessed : 16.01.2017.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

44. Pittman, R. Structural Separation to Create Competition? The Case of Freight Railways / R. Pittman // *Review of Network Economics*. – 2005. – Vol. 4. – Iss. 3. – P. 181–195. doi: 10.2202/1446-9022.1072.
45. Pittman, R. The freight railways of the former Soviet Union, twenty years on: Reforms lose steam / R. Pittman // *Research in Transportation Business & Management*. – 2013. – No. 6. – P. 99–115. doi: 10.1016/j.rtbm.2012.11.010.
46. Pittman, R. Vertical Restructuring (or Not) of the Infrastructure Sectors of Transition Economies / R. Pittman // *J. of Industry, Competition and Trade*. – 2003. – Vol. 3. – Iss. 1-2. – P. 5–26. doi: 10.1023/A:1025418218566.
47. Pittman, R. What Next for Russian Railways Restructuring? [Electronic resource] // SlideShare. – 2013. – Available at: <http://www.slideshare.net/NewEconomicSchool/russian-railways-russell-pittmannes30sept2013>. – Title from Screen. – Accessed : 16.01.2017.
48. Preston, J. Evaluating the long term impacts of transport policy: The case of passenger rail privatization [Electronic resource] / J. Preston, D. Robins // *Research in Transportation Economics*. – 2013. – Vol. 39. – Iss. 1. – P. 14–20. doi: 10.1016/j.retrec.2012.05.019.
49. Sánchez, P. C. Vertical and Horizontal Separation in the European Railway Sector: Effects on Productivity [Electronic resource] / P. C. Sánchez, J. M. P. Monsálvez, L. S. Martínez ; Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas. – Valencia, Spain, 2008. – Available at: [http://www.fbbva.es/TLFU/dat/dt1208\\_vertical%20and%20horizontal\\_web.pdf](http://www.fbbva.es/TLFU/dat/dt1208_vertical%20and%20horizontal_web.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 19.01.2017.
50. Savignat, M. G. The Case for Rail Reform in Europe: Evidence from Studies of Production Characteristics of the Rail Industry / M. G. Savignat, C. Nash // *Intern. J. of Transport Economics*. – 1999. – Vol. 26, No. 2. – P. 201–217.
51. Shkliar, A. Ukrzaliznytsia's New Tariff Policy: How to Find a Balance with the National Economy [Electronic resource] / A. Shkliar // *VoxUkraine*. – 2015. – Available at: <http://voxukraine.org/2015/10/19/ukrzaliznytsias-new-tariff-policy-how-to-find-a-balance-with-the-national-economy/>. – Title from screen. – Accessed : 16.01.2017.
52. Thompson, L. S. Liberalization and Commercialization of the World's Railways: Progress and Regulatory Issues / L. S. Thompson. – Paris, 2009. – 33 p.
53. Villa, J. Privatization of Mexican railroads: Fifteen years later / J. Villa, E. Sacristán-Roy // *Research in Transportation Business & Management*. – 2013. – Vol. 6. – P. 45–50. doi: 10.1016/j.rtbm.2012.11.012.
54. Wilson, W. W. Cost Savings and Productivity in the Railroad Industry / W. W. Wilson // *J. of Regulatory Economics*. – 1997. – Vol. 11. – Iss. 1. – P. 21–40. doi:10.1023/A:1007946111577.
55. Xu, Yi-Chong. Electricity Reform in China, India and Russia: The World Bank Template and the Politics of Power / Yi-Chong Xu. – Cheltenham, UK ; Northampton, MA : Edward Elgar Publishing, 2004. – 359 p.

Р. ПІТТМАН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Міністерство Юстиції США, Антитрестовський відділ, група економічної експертизи, 450 5<sup>th</sup> St., NW, No. 9004, Washington, DC, 20530, USA, тел. +1 (202) 307 63 67, ел. пошта [Russell.Pittman@usdoj.gov](mailto:Russell.Pittman@usdoj.gov), ORCID 0000-0001-9498-0561

## РЕФОРМУВАННЯ ТА РЕСТРУКТУРИЗАЦІЯ УКРЗАЛІЗНИЦІ: КЛЮЧОВЕ ЗАВДАННЯ ДЛЯ УКРАЇНСЬКИХ РЕФОРМАТОРІВ

**Мета.** У даній статті розглядаються варіанти реформування та реструктуризації Укрзалізниці, доступні для України. **Методика.** Наведені основні варіанти реструктуризації, отримані шляхом аналізу літературних джерел, які стосуються міжнародного досвіду реформування залізничного транспорту. **Результати.** Створення конкуренції серед вантажних залізничних компаній поліпшує продуктивність системи, але досягнення вказаного результату не вимагає в усіх випадках реалізації політики ЄС стосовно повного вертикального розподілу діяльності залізниць. Було встановлено, що політика горизонтального розподілу, яка застосовується на залізницях США, також сприяє підвищенню продуктивності системи і може бути більш ефективною для країни такого розміру, як Україна та для такої залізничної компанії, як Укрзалізниця (котра переважно залежить від вантажних перевезень). **Наукова новизна.** Велика частина літератури із реструктуризації залізниць зосереджена на вертикальному розподілі або доступу третіх сторін, у той час як в даній роботі фокус знаходиться на тому варіанті політики, який, можливо, більш підходить для України. **Практична значимість.** Економіка України залежить від ефективного транспортування навалних ванта-



## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

жів, таких як вугілля, залізна руда, сталь, зерно – товарів, які на далекі відстані найбільш економічно вигідніше перевозити залізницею. Успішне реформування та реструктуризація Укрзалізниці буде важливою частиною майбутніх українських економічних реформ.

**Ключові слова:** Укрзалізниця; залізниці; реформування; реструктуризація; вертикальний розподіл; горизонтальний розподіл; конкуренція; інвестиції

Р. ПИТТМАН<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Міністерство Юстиції США, Антитрестовий відділ, група економічної експертизи, 450 5<sup>th</sup> St., NW, No. 9004, Washington, DC, 20530, USA, тел. +1 (202) 307 63 67, ел. пошта Russell.Pittman@usdoj.gov, ORCID 0000-0001-9498-0561

## РЕФОРМИРОВАНИЕ И РЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ УКРЗАЛИЗНЫЦЫ: КЛЮЧЕВОЕ ЗАДАНИЕ ДЛЯ УКРАИНСКИХ РЕФОРМАТОРОВ

**Цель.** В данной статье рассматриваются варианты реформирования и реструктуризации Укрзалізниці, доступные для Украины. **Методика.** Приведены основные варианты реструктуризации, полученные путем анализа литературных источников, касающихся международного опыта реформирования железнодорожного транспорта. **Результаты.** Было установлено, что создание конкуренции среди грузовых железнодорожных компаний улучшает производительность системы, но достижение указанного результата не требует во всех случаях реализации политики ЕС в отношении полного вертикального распределения деятельности железных дорог. Было установлено, что политика горизонтального распределения, которая применяется на железных дорогах США, также способствует повышению производительности системы и может быть более эффективной для страны такого размера, как Украина и для такой железнодорожной компании, как Укрзалізниця (которая в основном зависит от грузовых перевозок). **Научная новизна.** Большая часть литературы по реструктуризации железных дорог сосредоточена на вертикальном распределении или доступе третьих сторон, в то время как в данной работе фокус находится на том варианте политики, который, возможно, более подходит для Украины. **Практическая значимость.** Экономика Украины зависит от эффективной транспортировки навалочных грузов, таких как уголь, железная руда, сталь, зерно – товаров, которые на дальние расстояния наиболее экономически выгоднее перевозить по железной дороге. Успешное реформирование и реструктуризация Укрзалізниці будет важной частью будущих украинских экономических реформ.

**Ключевые слова:** Укрзалізниця; железные дороги; реформирование; реструктуризация; вертикальное распределение; горизонтальное распределение; конкуренция; инвестиции

### REFERENCES

1. Gritsenko, N. V. (2012). A comprehensive review of railway reform in Ukraine. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 41, 249-253.
2. Kozachenko, D., Verlan, A., & Kutateladze, O. (2015, October 22). Reformy na zapasnii kolii. *Holos Ukrainy*. Retrieved from <http://www.golos.com.ua/article/260179>
3. Logvinova, N. O. (2013). Economic and mathematical justification of train traffic volume distribution on the direction of rail transportation with parallel runnings Znamenka–Odessa. *Science and Transport Progress*, 2(44), 92-98. doi: 10.15802/stp2013/12994
4. Makushenko, I. (2015, November 6) Tariff System Modernization UZ. *VoxUkraine*. Retrieved from <http://voxukraine.org/2015/11/06/modernizatsiya-taryfnoi-sistemy-ukrзалізныtsi-quo-vadis-ua/>
5. Martsenyuk, L. V., & Vyshniakova, A. V. (2014). Improvement of freight transportation process and their management mechanism. *Science and Transport Progress*, 2(50), 41-48. doi: 10.15802/stp2014/23743
6. Martsenyuk, L. V. (2012). Impact of rail transport in the development of the national economy of Ukraine. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 42, 274-278.
7. Petrenko, E. A. (2012). The problem of monopoly in rail transport. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 40, 296-300.
8. Sadlovska, I. P. (2012). Analysis of modern cargo flows in Ukraine and directions of their development. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 42, 317-324.
9. Ministry of Infrastructure of Ukraine. (2016, April 01). *Finansovyi plan PAT «Ukrзалізныtsia» na 2016 rik*. Retrieved from <http://mtu.gov.ua/news/26510.html>

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

10. Arslanov, M. (2015). Interview with the Deputy Minister of Infrastructure: How Ukrzaliznytsia Will Be Reformed. *Centre for Transport Strategies*. Retrieved from [http://en.cfts.org.ua/articles/interview\\_with\\_the\\_deputy\\_minister\\_of\\_infrastructure\\_how\\_ukrzaliznytsia\\_will\\_be\\_reformed](http://en.cfts.org.ua/articles/interview_with_the_deputy_minister_of_infrastructure_how_ukrzaliznytsia_will_be_reformed)
11. Arslanov, M. (2014). The Agenda: the Tasks Facing the New Head of the Infrastructure Ministry. *Centre for Transport Strategies*. Retrieved from [http://en.cfts.org.ua/articles/the\\_agenda\\_the\\_tasks\\_facing\\_the\\_new\\_head\\_of\\_the\\_infrastructure\\_ministry](http://en.cfts.org.ua/articles/the_agenda_the_tasks_facing_the_new_head_of_the_infrastructure_ministry)
12. Arslanov, M. (2013). Ukrzaliznytsia Steps On Its Brakes: Why Its Reform Has Slowed Down. *Centre for Transport Strategies*. Retrieved from [http://en.cfts.org.ua/articles/ukrzaliznytsia\\_steps\\_on\\_its\\_brakes\\_why\\_its\\_reform\\_has\\_slowed\\_down](http://en.cfts.org.ua/articles/ukrzaliznytsia_steps_on_its_brakes_why_its_reform_has_slowed_down)
13. Bitzan, J. D. (1999). The Structure of Railroad Costs and the Benefits/Costs of Mergers. *Research in Transportation Economics*, 5, 1-52. doi: 10.1016/S0739-8859(99)80003-1
14. Bonner, B. (2016). New infrastructure minister: «There will be no corruption». *KyivPost*. Retrieved from <https://www.kyivpost.com/article/content/reform-watch/new-infrastructure-minister-there-will-be-no-corruption-here-412912.html>
15. Campos, J. (2001). Lessons from railway reforms in Brazil and Mexico. *Transport Policy*, 8(2), 85-95. doi: 10.1016/S0967-070X(01)00007-5
16. Chadwick, E. (1895). Results of Different Principles of Legislation in Europe: of Competition for the Field as Compared with Competition within the Field of Service. *Journal of the Statistical Society of London*, 22(3), 381-420. doi: 10.2307/2338385.
17. Chapin, A., & Schmidt, S. (1999). Do Mergers Improve Efficiency? Evidence from Deregulated Rail Freight. *Journal of Transport Economics and Policy*, 33(2), 147-162.
18. Christensen, L. R. (2010). *An Update to the Study of Competition in the U.S. Freight Railroad Industry: Final Report*. Washington, DC: Surface Transportation Board.
19. Gómez-Ibáñez, J. (Ed.). (2006). *Competition in the Railway Industry: An International Comparative Analysis*. Northampton, MA: Edward Elgar Publishing.
20. Pittman, R., Diaconu, O., Šip, E., Tomova, A., & Wronka, J. (2007). Competition in Freight Railways: «Above-the-Rail» Operators in Central Europe and Russia. *Journal of Competition Law and Economics*, 3(4), 673-687. doi: 10.1093/joclec/nhm028
21. Couto, A., & Graham, D. (2009). The determinants of efficiency and productivity in European railways. *Applied Economics*, 41(22), 2827-2851. doi: 10.1080/00036840801949782
22. Dementiev, A. (2006). Reforming Russian Railways: Introduction of Competition and New Regulatory Challenges. In R. Macario, J. M. Viegas, D. A. Hensher (Eds.), *Competition and Ownership in Land Passenger Transport: Selected Papers from the 9th Intern. Conf.* Amsterdam: Elsevier. Retrieved from [https://www.hse.ru/data/302/314/1234/AD\\_reform.pdf](https://www.hse.ru/data/302/314/1234/AD_reform.pdf)
23. Demsetz, H. (1968). Why Regulate Utilities? *Journal of Law and Economics*, 11(1), 55-65. doi: 10.1086/466643.
24. Deville, X., & Verduyn, F. (2012). *Implementation of EU legislation on rail liberalization in Belgium, France, Germany and the Netherlands*. Brussels: National Bank of Belgium. Retrieved from <https://www.nbb.be/doc/ts/publications/wp/wp221en.pdf>
25. Estache, A., Goldstein, A., & Pittman, R. (2001). Privatization and Regulatory Reform in Brazil: The Case of Freight Railways. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 1(2), 203-235. doi: 10.1023/A:1012834715715
26. Evaluation of Most Feasible Infrastructure and Transportation Operations Integration Model. (2013). *Proceedings of the International Destination Freight Transportation Services Market Model Implementation Until 2015*, Moscow.
27. Van de Velde, D., Nash, C., Smith, A., Mizutani, F., Uranishi, S., Lijesen, M., & Zschoche, F. (2012). *EVES-Rail: Economic Effects of Vertical Separation in the Railway Sector*. Report to: CER (Community of European Railways and Infrastructure Companies). Amsterdam. Retrieved from [http://www.cer.be/sites/default/files/publication/EVES-Rail\\_-\\_Final\\_v6.4.3\\_SUMMARY.pdf](http://www.cer.be/sites/default/files/publication/EVES-Rail_-_Final_v6.4.3_SUMMARY.pdf)
28. Razumovskaya, E. M., Lapidus, L. V., Mishakin, T. S., & Popov, M. L. (2014). Features and Peculiarities of the Russian Passenger Rail Market Development. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, 5(18), 165-170. doi: 10.5901/mjss.2014.v5n18p165
29. Friebe, G., Ivaldi, M., & Vibes, C. (2010). Railway (De) Regulation: A European Efficiency Comparison. *Economica*, 77(305), 77-91. doi: 10.1111/j.1468-0335.2008.00739.x
30. Ivaldi, M., & Mc Cullough, G. J. (2001). Density and Integration Effects on Class I U.S. Freight Railroads. *Journal of Regulatory Economics*, 19(2), 161-182. doi: 10.1023/A:1011149324027

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

31. Knieps, G. (2013). Competition and the Railroads: A European Perspective. *Journal of Competition Law and Economics*, 9(1), 153-169. doi: 10.1093/joclec/nhs040
32. Kogan, J. (2006). Latin America: Competition for concessions. In J. A. Gómez-Ibáñez, Ginés de Rus (Eds.), *Competition in the Railway Industry. An Intern. Comparative Analysis* (pp. 153-176). Northampton, MA: Edward Elgar Publishing. doi: 10.4337/9781847202949.00016
33. Krasnikov, D. (2016, August 20). Rail administration chief says need for modernization 'immense'. *KyivPost*. Retrieved from <https://www.kyivpost.com/article/content/reform-watch/rail-administration-chief-says-need-for-modernization-immense-421463.html>
34. Lazarev, A. (2012). Russian Railways: Reform is in the Home Stretch. *RZD-Partner International*, 29, 16-17.
35. Mizutani, F., & Uranishi, S. (2013). Does vertical separation reduce cost? An empirical analysis of the rail industry in European and East Asian OECD countries. *Journal of Regulatory Economics*, 43(1), 31-59. doi: 10.1007/s11149-012-9193-4
36. Nash, C., Nilsson, J. E., & Link, H. (2013). Comparing Three Models for Introduction of Competition into Railways. *Journal of Transport Economics and Policy*, 47(2), 191-206.
37. Nash, C. (2011). Competition in Rail Passenger Services. (Slide Presentation). Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds. Retrieved from [http://www.fedea.net/transporte/PDF/ii\\_workshop/Presentation\\_Chris%20Nash.pdf](http://www.fedea.net/transporte/PDF/ii_workshop/Presentation_Chris%20Nash.pdf)
38. Perkins, S., Amos, P., Kohon, J., & Thompson, L. S. (2014). Peer Review of Railway Freight Development in Mexico. *Report of the International Transport Forum, Paris*. Retrieved from <http://www.tgaassoc.com/publications.html>
39. Pittman, R. (2013). Blame the Switchman? Russian Railways Restructuring after Ten Years. In M. Alexeev, S. Weber (Eds.), *The Oxford Handbook of the Russian Economy*. Oxford: Oxford University Press. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199759927.013.0001
40. Pittman, R. (2007). Make or buy on the Russian railway? Coase, Williamson, and Tsar Nicholas II. *Economic Change and Restructuring*, 40(3), 207-221. doi:10.1007/s10644-007-9024-2
41. Pittman, R. (2007). Options for Restructuring the State-Owned Monopoly Railway. *Research in Transportation Economics*, 20, 179-198. doi: 10.1016/S0739-8859(07)20007-1
42. Pittman, R. (2015). Railways Restructuring and Ukrainian Economic Reform. *Man and the Economy*, 2(1), 87-107. doi: 10.1515/me-2015-0006
43. Pittman, R. (2015). Restructuring the Ukrainian Railway: Low Hanging Fruit for the Country's Fiscal Needs. *VoxUkraine*. Retrieved from <http://voxukraine.org/2015/01/17/restructuring-the-ukrainian-railway-low-hanging-fruit-for-the-countrys-fiscal-needs/>
44. Pittman, R. (2005). Structural Separation to Create Competition? The Case of Freight Railways. *Review of Network Economics*, 4(3), 181-195. doi: 10.2202/1446-9022.1072
45. Pittman, R. (2013). The freight railways of the former Soviet Union, twenty years on: Reforms lose steam. *Research in Transportation Business & Management*, 6, 99-115. doi: 10.1016/j.rtbm.2012.11.010
46. Pittman, R. (2003). Vertical Restructuring (or Not) of the Infrastructure Sectors of Transition Economies. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 3(1-2), 5-26. doi: 10.1023/A:1025418218566
47. Pittman, R. (2013). What Next for Russian Railways Restructuring? *SlideShare*. Retrieved from <http://www.slideshare.net/NewEconomicSchool/russian-railways-russell-pittmannes30sept2013>
48. Preston, J., & Robins, D. (2013). Evaluating the long term impacts of transport policy: The case of passenger rail privatization. *Research in Transportation Economics*, 39(1), 14-20. doi: 10.1016/j.retrec.2012.05.019
49. Sánchez, P. C., Monsálvez, J. M. P., & Martínez, L. S. (2008). *Vertical and Horizontal Separation in the European Railway Sector: Effects on Productivity*. Bilbao: Fundación BBVA. Retrieved from [http://www.fbbva.es/TLFU/dat/dt1208\\_vertical%20and%20horizontal\\_web.pdf](http://www.fbbva.es/TLFU/dat/dt1208_vertical%20and%20horizontal_web.pdf)
50. Savignat, M. G., & Nash, C. (1999). The Case for Rail Reform in Europe: Evidence from Studies of Production Characteristics of the Rail Industry. *International Journal of Transport Economics*, 26(2), 201-217.
51. Shkliar, A. (2015). Ukrzaliznytsia's New Tariff Policy: How to Find a Balance with the National Economy. *VoxUkraine*. Retrieved from <http://voxukraine.org/2015/10/19/ukrzaliznytsias-new-tariff-policy-how-to-find-a-balance-with-the-national-economy/>
52. Thompson, L. S. (2009). Liberalization and Commercialization of the World's Railways: Progress and Regulatory Issues. *Forum Paper International Transport Forum*, 6, Paris. Retrieved from <http://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/09fp06.pdf>
53. Villa, J., & Sacristán-Roy, E. (2013). Privatization of Mexican railroads: Fifteen years later. *Research in Transportation Business & Management*, 6, 45-50. doi: 10.1016/j.rtbm.2012.11.012

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

---

54. Wilson, W. W. (1997). Cost Savings and Productivity in the Railroad Industry. *Journal of Regulatory Economics*, 11(1), 21-40. doi:10.1023/A:1007946111577
55. Xu, Yi-Chong. (2004). *Electricity Reform in China, India and Russia: The World Bank Template and the Politics of Power*. Cheltenham, UK; Northampton, MA: Edward Elgar Publishing.

*Prof. D. M. Kozachenko, D. Sc. (Tech.) (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Oct. 30, 2016

Received: Jan. 04, 2017

## УДК [697.1:620.925]:378.091.6

О. М. ПШІНЬКО<sup>1\*</sup>, В. О. ГАБРИНЕЦЬ<sup>2\*</sup>, В. Г. КУЗНЕЦОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління проектами, будівлі та будівельні матеріали», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, ел. пошта pshinko@r.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

<sup>2\*</sup>Каф. «Теплотехніка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, ел. пошта gabrin62@mail.ru, ORCID 0000-0002-6115-7162

<sup>3\*</sup>Каф. «Інтелектуальні системи електропостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25, ел. пошта vkuz@i.ua, ORCID 0000-0003-4165-1056

## ЗАСТОСУВАННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ БІОРЕСУРСІВ ДЛЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

**Мета.** У дослідженні необхідно проаналізувати можливість та умови забезпечення ефективної роботи систем теплопостачання при переході частки теплогенеруючих потужностей на біопаливо. В якості біопалива пропонується застосовувати солому злакових культур, які широко розповсюджені в Придніпровському регіоні. Головною метою роботи є науковий прорахунок можливості та вартості конкретних заходів для такого переходу. Для прикладу береться котельня компактного містечка Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ), що споживає природний газ. **Методика.** В роботі проведено аналіз законодавчої бази України, що стимулює застосування відновлювальних джерел в якості палива, а також зроблено аналіз механізмів стимулювання та розвитку цього напрямку. Також визначаються можливості Придніпровського регіону щодо забезпечення отримання та поставок соломи для роботи котельні. Аналізуються вартісні показники перевезень вантажів по території України в 2016 році, які залежать від відстані та розміру вантажівок. Ці показники, а також показники, що пов'язані з купівлею соломи, розглядаються сумісно з енергетичними можливостями її застосування в якості палива. **Результати.** При існуючих в Україні (станом на 2016 рік) продуктивності зернових у сільському господарстві та вартісних показників у галузі перевезень, переведення частки потужностей на відновлювальне паливо є досить рентабельним. Вартість одиниці теплової потужності при цьому може бути знижена в чотири рази. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано використовувати нові комплексні підходи для оцінки вартості одиниці потужності теплової котельні при переході на застосування відновлювальних джерел енергії. Авторами також запропонована нова логістика доставки цих джерел до місця їх застосування. З технічної та вартісної сторін визначено оптимальний порядок потужності переводу на нові відновлювальні джерела енергії у конкретному регіоні, в залежності від структури посівних площин та їх продуктивності. **Практична значимість.** Введення запропонованих рішень та підходів до забезпечення потужності котельні відновлювальними джерелами енергії можуть бути реалізовані при відносно невеликих капіталовкладеннях та можуть дати значний економічний ефект.

**Ключові слова:** біоресурси; згоряння соломи; система тепло- та гарячого водопостачання; теплові втрати; тепловий режим; теплотворна здатність; вартість перевезення; відновлювальні джерела енергії

### Вступ

На сьогоднішній день основним енергоносієм в країні залишається природний газ (34,8 % загального первинного постачання енергії (ЗППЕ)), на другому місці вугілля (34,6 %), хоча тенденцією останніх кількох років є зниження споживання газу та збільшення використання вугілля та біомаси. Близько третини загального обсягу природного газу – 31 % (16 млрд. м<sup>3</sup>) – споживається населенням, 19 %

(10 млрд. м<sup>3</sup>) іде на теплопостачання підприємствами ЖКГ, а промисловість використовує 37 % (20 млрд. м<sup>3</sup>). Система централізованого теплопостачання в Україні є досить розвинутою. За даними 2013 року обсяг споживання теплової енергії в Україні становив порядку 237 млн. МВт-год. Виробництво теплової енергії для забезпечення потреб секторів економічної діяльності та населення України здійснюється системами централізованого теплопостачання, що охоплюють близько 60% споживачів, і сис-

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

темами індивідуального теплопостачання. За даними Міністерства Регіонального Розвитку, Будівництва та Житлово-Комунального господарства загалом по Україні експлуатується 35 424 котелень сумарною тепловою потужністю 136 982 МВт. На газу працювало 24 564, на рідкому паливі – 333, на твердому паливі – 9 781. Але з фінансових, а також політичних чинників в Україні потрібно скорочувати витрати традиційного палива. Крім того надо брати до уваги майбутнє закінчення цих видів палива. Це спонукає на необхідність пошуку засобів та технічних рішень для застосування відновлювальних видів палива [7]. З різних видів відновлювальної енергетики для отримання теплової енергії в осінній та зимовий періоди найбільш привабливим виглядає біоенергія, яка отримується з біоресурсів, що щорічно відновлюються у вигляді рослин та у вигляді переробки продуктів сільського господарства. В Україні на відновлювальних видах палива в 2013 році працювало 2 535 котелень й було спожито 1 433 тис. т н.е. теплової енергії виробленої з біомаси. Згідно Національного плану дій з відновлювальної енергетики на період до 2020 року цю цифру планується підвищити до 4000 тис. т н.е. Фактичне споживання теплової енергії в системі ЖКГ України за 2013 р. складає 112 млн. МВт-год, у т.ч. населенню – 64 млн. МВт-год, на комунально-побутові потреби – 25,4 млн. МВт-год, на виробничі потреби – 13,5 млн. МВт-год, іншим підприємствам – 8,7 млн. МВт-год. Середні втрати теплової енергії складали близько 14,3 %. Особлива увага до цього виду відновлювальної енергії пояснюється тими обставинами, що в багатьох випадках перехід від традиційних видів палива на альтернативні не потребує значних капітальних витрат. Тобто шляхом підбору відповідних режимів горіння біопалива можливо застосовувати вже існуюче обладнання.

### Мета

В цій роботі вивчається питання виробництва енергії для котелень з біомаси, яка виробляється в Дніпровському регіоні. Особлива увага присвячена визначенню цільових показників економічної доцільності реалізації такого проекту та оптимальних обсягів виробництва теплової енергії з біоресурсів та можливості забезпе-

чення котельної паливною сировиною. Такий підхід відповідає національним планам, енергетичній стратегії держави щодо збільшення частки відновлювальних джерел енергії в енергетичному балансі країни та плану заходів з імplementації Директиви Європейського Парламенту та Ради 2009/28/ЄС від 23 квітня 2009 р. щодо стимулювання використання відновлювальних джерел енергії.

У цієї статті розглядається конкретна можливість переходу на споживання біопалива для частки потужностей котельній на природному газі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Основні вихідні дані цієї котельної представлені у табл. 1.

Таблиця 1

**Основні показники для котельної Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна**

Table 1

**Basic indicators for the boiler house of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan**

Назва підприємства, на базі якого планують реалізувати проект	Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна
Адреса майданчика	м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, буд. 2
Короткий опис площадки	Загальна площа 24 га
Підключення тепл. навантаження ОП/ГВП	19,7 Гкал/год.
Загальне річне виробництво т.е. Гкал.	23 630,831
Частка розподілу споживачів. % нас/бюдж/комерц	43/51/6
Очікувана встановлена потужність котла на біопалеві	7 558 Квт
Вид будівництва : нове/реконструкція	реконструкція
Плановий вид біопалива	агропелети
Очікувана схема логістики	Автотранспортом

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Закінчення табл. 1

Назва підприємства, на базі якого планують реалізувати проект	Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна
Наявність зручних під'їздних шляхів. Оцініть від 1 до 5 балів	5 балів
Наявність території для будівництва витратних складів паливі, орієнтована площа, га	Приміщення площею 0,04 га Відкрита площадка 1 га
Мінімальна відстань до житлової забудови, орієнтовано	150–170 м.
Очікувані організаційно-технічні рішення	Реконструкція старої котельні для генерації теплової енергії з біомаси
Кількість споживачів зведена (орієнтовано) Станом на 01.02.2015 тис.чол.	4 000
Загальна потреба у тепловій енергії (Гкал/рік) в	23 630,831
– на опалення	14 780,781
– на гаряче водопостачання (ГПВ)	8 850,349
З них забезпечується завдяки централізованому теплопостачанню. Гкал/рік:	23 630,831
– опалення	14 780,781
– ГВП	8 850,349
Кількість котелень централізованого теплопостачання, шт.	1
Орієнтована частка багатоповерхової забудови, %	65 %
Орієнтована частка індивідуального опалення, %	35 %
Сектор роботи котельні	Бюджетна сфера

Вартість природного газу для котельні в 2015 р. становила 9 600 грн. за 1 тис. куб. м

з ПДВ. Котельня обладнана комерційними вузлом обліку з коректором витрати газу по тиску та температурі, встановленим до ГРП. Видалення димових газів проходить за допомогою природної тяги димовою трубою з цегли діаметром 1 500 мм (на найвищій точці), висотою 45 м, встановлену більше 40 років тому. На котельні наявний вузол обліку відпущеної теплової енергії. Проте, зі сторони споживання обліку немає.

Зношеність теплових мереж по підприємству призводить до високих втрат теплової енергії та надмірного споживанням електричної енергії. Теплові втрати з витоком води з трубопроводів і втрати тепла за рахунок охолодження води в трубопроводах складають близько 12 %, хоча ці дані представляються заниженими, а точна цифра може бути встановлена при впровадженні повного обліку тепла у споживачів. Питоме споживання електроенергії складає близько 10 кВт-год/Гкал (відпущену). Перелік основного обладнання, яке є в котельні, наведене в табл. 2.

Таблиця 2

## Перелік основного обладнання котельні

Table 2

## Main boiler house equipment list

Теплогенеруюче обладнання	Тип, марка котла	Потужність, Гкал	Введення в експлуатацію	ККД, %
Котел № 1 (робочий)	КВГ-6.5-150	6,5	–	90
Котел № 2 (в резерві)	КВГ-6.5-150	6,5	–	89
Котел № 3 (на консервації)	КВГ-4-150	4	–	91
Котел № 4 (робочий)	Е-1/9	1	–	85
Котел № 5 (робочий)	Е-1/9	1	–	85
Котел № 6 (резервний)	Е-1/9	1	–	85



## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

Розподіл теплоти по категоріям споживачів для котельні наведено в табл. 3.

Графік розподілу виробки теплової енергії для котельні по місяцям 2015 року наведено на рис. 1.

Таблиця 3

## Розподіл теплоти по категоріям споживачів

Table 3

## Heat distribution by categories of consumers

Категорія споживачів	Од.	2013	2014	2015 (план)
Населення	Гкал/год	1,874	1,874	2,278
Бюджетних установ	Гкал/год	2,231	2,231	2,525
Інших споживачів	Гкал/год	0,058	0,058	0,079
ВСЬОГО		4,163	4,163	4,882

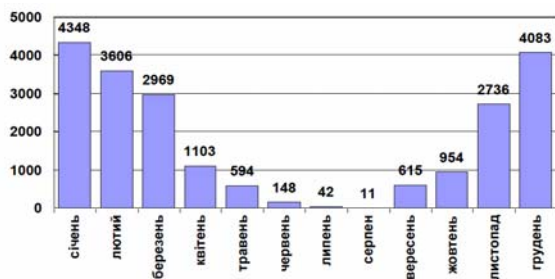


Рис. 1. Річний план постачання теплової енергії котельні (2015), Гкал

Fig. 1. Annual plan for heat energy supply of the boiler house (2015), Gcal

## Методика

Теплова енергія буде вважатися такою, що отримана з дотриманням критеріїв сталого розвитку, коли її виробництво включатиме екологічний та соціальний фактори та мінімізуватиме свій вплив протягом свого життєвого циклу по всьому ланцюгу постачання по відношенню до соціально-економічного оточення. Директива Європарламенту з відновлювальних джерел енергії 2009/28/ЕС визначає та робить обов'язковими для дотримання критерії сталості. Комісією були розроблені та рекомендовані схеми сталості для даних видів біомаси, а країни-

члени наразі в процесі запровадження національних критеріїв сталості біомаси. Серед критеріїв сталості для твердої біомаси, що використовується для виробництва теплової енергії в котельній можна розглядати наступні:

1) скорочення викидів парникових газів при впровадженні біоенергетичних технологій мають становити не менше 35 % у порівнянні з аналогічним використанням викопних палив, з 1 січня 2017 р. не менше 50 %, з 1 січня 2018 р. Не менше 60 % для установок, введених в експлуатацію з 01.01.2017. Цей критерій виконується, оскільки скорочення викидів парникових газів протягом всього життєвого циклу технології виробництва теплової енергії із агробіомаси (агropелет) становить близько 88–92 % (даний показник був розрахований для котельної установки меншої потужності та для умов України).

2) висока ефективність процесу виробництва теплової енергії із біомаси. Цей критерій виконується, оскільки котельня на агробіомасі характеризується ефективністю на рівні не нижче 85 %.

3) соціальний ефект, що пов'язаний зі створенням нових робочих місць. Цей критерій виконується – введення в експлуатацію котельні на біомасі з виробництвом 1 ГВт·год теплової енергії створює 1,6 робочих місць в т.ч. на суміжних ринках. Таким чином, очікується, що реалізація проекту призведе до створення 5–6 нових додаткових робочих місць у порівнянні із базовою ситуацією (без ланцюга логістики, це окремий сектор виробництва біопалива, тут розглядається лише приріст робочих місць на котельні – джерелі теплової енергії).

В роботі проаналізовано законодавчу базу стосовно відновлюваної енергетики України, в тому числі в секторі біоенергетики. Закон України «Про альтернативні види палива» [6] визначає правові, соціальні, економічні, екологічні та організаційні засади виробництва (видобутку) і використання альтернативних видів палива. В законі «Про альтернативні види палива» дається визначення основних понять в секторі біоенергетики: біомаса, біопаливо, біогаз, виробник біопалива, тверде біопаливо та ін. Так, згідно закону: біомаса – біологічно відновлювальна речовина органічного походження, що зазнає біологічного розкладу (відходи

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

сільського господарства (рослинництва і тваринництва), лісового господарства та технологічно пов'язаних з ним галузей промисловості, а також органічна частина промислових та побутових відходів. Біологічні види палива (біопаливо) – тверде, рідке та газове паливо, виготовлене з біологічно відновлювальної сировини (біомаси), яке може використовуватися, як паливо або компонент інших видів палива.

В роботі розглянуто механізми стимулювання та розвитку відновлювальних джерел енергії, такі, як нещодавно прийнята Постанова КМУ № 293 від 09.07.2014 «Про стимулювання заміщення природного газу у сфері теплопостачання», що набирає чинності з 01.10.2014 [9]. У разі виробництва теплової енергії для населення різниця між тарифом на виробництво теплової енергії на теплогенеруючих установках (крім теплоелектроцентралей, теплоелектростанцій і атомних електростанцій) з використанням будь-яких видів палива та енергії (за винятком природного газу) і тарифом на виробництво теплової енергії для потреб населення на зазначених теплогенеруючих установках з використанням будь-яких видів палива та енергії (за винятком природного газу) підлягає компенсації з державного бюджету. Органам місцевого самоврядування рекомендується сприяти реалізації інвестиційних проектів виробництва теплової енергії з використанням будь-яких видів палива та енергії (за винятком природного газу), в тому числі з відновлюваних джерел енергії. Також важливою є Постанова КМУ № 453 від 10.09.2014 «Про стимулювання заміщення природного газу під час виробництва теплової енергії для установ та організацій, що фінансуються з державного і місцевого бюджетів» [8]. Згідно цієї Постанови, тариф на виробництво теплової енергії для бюджетних установ та організацій на теплогенеруючих установках (крім ТЕЦ, ТЕС і АЕС) з використанням будь-яких видів палива та енергії (за винятком природного газу) встановлюється на рівні діючого тарифу на виробництво теплової енергії для бюджетних установ та організацій з використанням природного газу та переглядається у разі зміни граничного рівня ціни на природний газ, що використовується для виробництва теплової енергії для бюджетних установ та організацій. Органи місцевого самовря-

дування мають сприяти реалізації інвестиційних проектів з виробництва теплової енергії з використанням будь-яких видів палива та енергії (за винятком природного газу), в тому числі з відновлюваних джерел енергії. Постанова набирає чинності з 1 жовтня 2014 р. та діє до 1 жовтня 2019 року.

В Україні розроблено ряд важливих програм/стратегій стосовно пріоритетний напрямків розвитку сектору ВДЕ. Деякі з них є діючими, інші знаходяться в статусі проекту. Енергетична стратегія України на період до 2030 року (2013) . В Стратегії зазначено, що Україна має значний потенціал розвитку біоенергетики. Для широкого комерційного використання найближчими роками доцільно впроваджувати технології спалювання біомаси в котлах і технології збору й утилізації біогазу на полігонах твердих побутових відходів, оскільки ці технології поки що найкраще розроблені. Потенційна встановлена потужність у сегменті біоенергетики може становити 10-15 ГВт теплових й 1-1,5 ГВт електричних. Затверджено Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року. План дій було розроблено на виконання Україною її зобов'язань як члена Енергетичного Співтовариства. Головна мета документу – досягти в 2020 році 11% частки енергії, виробленої з відновлюваних джерел, у загальному кінцевому енергоспоживанні країни. Згідно проекту Плану дій, у 2020 році на опалення/охолодження буде використовуватися 4 млн. т н.е. біомаси, в тому числі твердої – 3,9 млн. т н.е., біогазу – 0,1 млн. т н.е. Встановлена потужність об'єктів електроенергетики на біомасі становитиме у 2020 році 530 МВт (1,1% загального обсягу виробництва), в тому числі на твердій біомасі – 400 МВт, на біогазі – 130 МВт.

### Результати

Питанням економії традиційних ресурсів в ДНУЗТ надають велике значення [4, 10]. В цієї роботі проаналізовано можливості переводу частки потужностей для генерації теплової енергії на біопаливо. При аналізі переводу брались до уваги сучасні підходи стосовно ефективності систем теплопостачання [5], а також їх термомодернізації [2]. Оцінка такого переходу проводилась відповідно сучасним підходам до цього [1,3]. Брались також до уваги

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

можливі зміни технічних характеристик обладнання при роботі на новому виді палива [11–14]. Після зробленого аналізу було запропоновано для спалювання біомаси по встановити спеціальні котли, для котрих в котельній ДНУЗТ є вільні місця. Перше вільне місце – приблизно 10х7м (потенційне місце для котлів на біомасі) розташовано на першому поверсі, та друге 15х7 м на другому поверсі. Висота першого поверху 8 м, другого – 4 м. Безпосередньо до котельні примикає будівля, які зараз використовуються, як лабораторії. Корисна площа цієї будівлі складає відповідно до генплану 860 м<sup>2</sup>. Доступ до цієї будівлі від під'їзних шляхів вільний, тому вона ідеально підходить для організації складу біопалива для біомасової котельні. Відстань до найближчого житлового будинку (11-ти поверхова житловий дім) від границі котельні складає близько 170 м.

Реконструкція котельні з переведенням на біомасу частини потужностей з використанням існуючої будівлі технічно повністю можлива. Для цього є всі необхідні передумови, а саме: вільне місце у котельній, наявність інфраструктури у котельній, наявність будівлі під склад біопалива у безпосередній близькості до котельні (5 м), наявність вільних і просторих під'їзних шляхів для маневру будь-якого автотранспорту, наявність точки підключення до електромережі, димової труби, наявність навантаження на ГВП влітку (частково) і взимку, Тобто реконструкція котельні з переведенням на біомасу частини потужностей з використанням існуючої будівлі технічно повністю можлива. (частково) і взимку, дорогий «бюджетний» природний газ, що буде замінюватися. У будівлі існуючої котельні достатньо місця (10х5х8 м) для встановлення одного котла на біомасі потужністю до 3,0–3,5 МВтт або двох котлів по 1,5–1,75 МВтт. Для цього треба здійснити демонтаж і перенесення існуючого допоміжного обладнання (насосів, теплообмінників, ХВО, тощо). Взагалі котельня відрізняється нещільним розміщенням існуючого обладнання усередині будівлі, тому більш компактне розміщення допоміжної інфраструктури забезпечить достатньо місця для потужності до 3,5 МВтт на біомасі. Як буде показано далі, оптимальною потужністю котла на біомасі можна вважати діапазон більше 2 МВт. Такий діапазон

потужності також добре узгоджується із простором, наявним у котельні та у господарській будівлі для складу: за габаритами. Як зазначено вище, газова котельня може буде частково реконструйована для спалювання біомаси та буде залишатися у власності ДНУЗТ. Потужність обладнання на біопаливі буде складати або 2х1,5 МВт (1 котел на ГВП, інший – на опалення), або 1 котел 1,2 МВтт (на ГВП), 2-й котел – 2 МВтт (на опалення). Один газовий котел КВГ-6,5 та котел КВГ-4,0 залишаються в роботі для опалення в найбільш холодний період року (січень-лютий) паралельно з котлом на біомасі. Другий газовий котел КВГ-6,5 залишається в резерві. Двоє з трьох газові котлів Е-1/9 продовжують покривати потреби ГВП в опалювальний період та в ті місяці літа, коли котли на біомасі не працюватимуть. За відсутності навантаження опалення, один з котлів на біомасі переключатиметься на забезпечення потреб. Як і раніше, планується забезпечувати 100 % ціло річну потребу споживачів в тепловій енергії для потреб опалення та ГВП. Облік відпущеної теплової енергії з котельні планується здійснювати на основі показників приладів автоматичного обліку.

### Наукова новизна та практична значимість

Ресурси соломи з Дніпровського регіону, як палива визначаються з одного боку теплотворною здатністю її, а з другого кількістю самої соломи коло місця її споживання, як палива. Теплотворна здатність соломи різних видів наведена в табл. 4.

Таблиця 4

### Теплотворна здатність с/х відходів

Table 4

### Heating value of agricultural wastes

Вид с/х отходов	Теплотворна здатність, МДж/кг
Пшенична солома	17–18
Рапсова солома	16–17
Кукурудза	18
Древесина	18,5

Для розрахунку можливої кількості зібраної соломи потрібно враховувати врожайність

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

пшениці. Відповідно статистичним даним для Дніпровського регіону кількість соломи з одного гектару по масі буде дорівнювати 0,8–1 від врожайності пшениці. Розбіжність пов'язана з сортом та технологією зборки. В подальших розрахунках ми будемо застосовувати найнижчий коефіцієнт 0,8. Для Дніпропетровської області 63 % зайняті посівними площами. Це складає для регіону 1 968 тис га. Частка зернових становить 55 % від загальної площі під посівними культурами. Будемо вважати врожайність пшениці і ячменю в середньому 30 центнерів з га. Будемо вважати котельню ДНУЗТа, як центр доставки соломи збудь якого напрямку. Оскільки котельня розташована в центрі міста Дніпро, то будемо вважати, що вокруг неї існує кругова площина радіусом 10 км, з якої солома не збирається. Попередні підрахунки показали, що вона повинна збиратися з кільця між внутрішнім радіусом 10 км та зовнішнім 20 км, як показано на рис. 2.

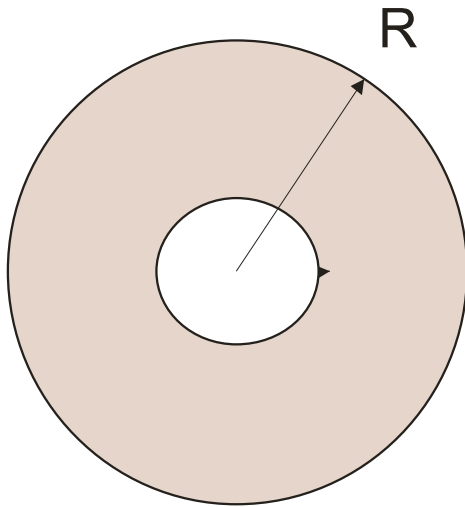


Рис. 2. Схема збору соломи для котельної

Fig. 2. Scheme of straw collection for the boiler house

Тоді потенційна кількість соломи в тонах, яку можна отримати для котельній з площі радіусом  $R$  (це відстань збору та доставки соломи) можна підрахувати по співвідношенню:

$$M(R) = \int_{10}^{20} 0,63 \cdot 0,55 \cdot I \pi K R \cdot dR, \quad (1)$$

де  $I$  – врожайність зернових,  $K$  – коефіцієнт, який визначає долю соломи, що можна застосовувати для опалення. Він приблизно дорівнює

0,5. Інша солома застосовується, як корм для скота.

Результати підрахунок маси зібраної соломи по співвідношенню (1) наведено на рис. 3.

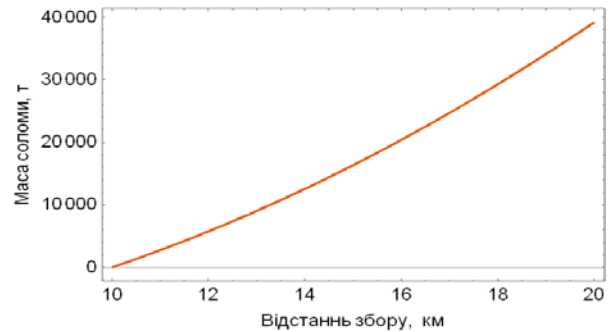


Рис. 3. Можлива кількість зібраної соломи біля міста Дніпра

Fig. 3. Possible number of collected straw near Dnipro city

Можлива потужність котельної при безперервній роботі на протязі опалювального сезону, який дорівнює 180 днів і яку здатна забезпечити зібрана біля Дніпра з різної площини солома при ККД ТЕЦ = 0,82, теплотворній здатності соломи 17 МДЖ/кг наведена на рис. 4.

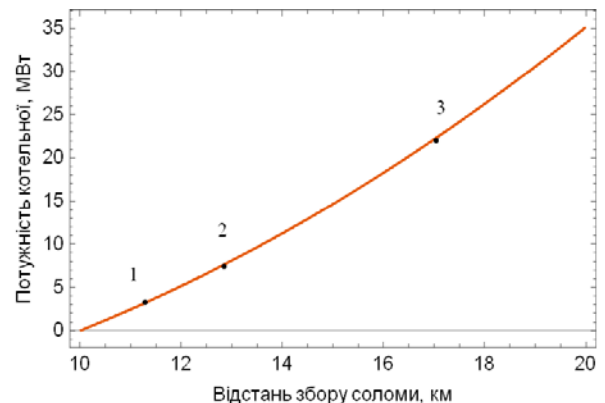


Рис. 4. Можливі потужності ТЕЦ, яка працює на зібраній біля Дніпра соломі:

- 1 – потужність котла КВГ-4-159 (4.64МВт);
- 2 – потужність котла КВГ-6.5-150 (7.54МВт);
- 3 – сумарна потужність котельної (22,87МВт)

Fig. 4. Available power of thermal station, which is operated using the straw collected near Dnipro

- 1 – boiler power KVG-4-159 (4.64MWt);
- 2 – boiler power KVG-6.5-150 (7.54MWt);
- 3 – total boiler house power (22,87MWt)

Крапками 1, 2, 3 визначають потужність основних агрегатів котельної та самої котельної,

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

а також необхідний для їх роботи радіус збору соломи. З графіка видно, що для того щоб забезпечити безперервну роботу всієї котельні ДНУЗТа на протязі опалювального сезону потрібно збирати солом у радіусі не більш 18 км. При переході на біопаливо потрібно враховувати не тільки його вартість, а також вартість перевезень.

Вартість перевезень по Україні залежить від відстані перевезення. Якщо апроксимувати дані різних фірм відносно вартості одного тонокилометра в 2016 році квадратичною залежністю, то ми будемо мати співвідношення (2).

$$S(R) = 3,53214 - 0,0114295R + 0,0000160748R^2. \quad (2)$$

Для лінійної залежності маємо співвідношення вартість одного тонокилометра для 2016 року

$$S(R) = 3,39517 - 0,0077453R, \quad (3)$$

де  $R$  – відстань доставки вантажу, яким в цієї роботі є солома, що зібрана на цієї відстані. Тому в наступних співвідношеннях  $R$  дорівнює також відстані збору соломи.

Обробка статистичних даних по вартості одного тонокилометра для 2016 року для лінійної та квадратичної залежностей наведена на рис. 5.

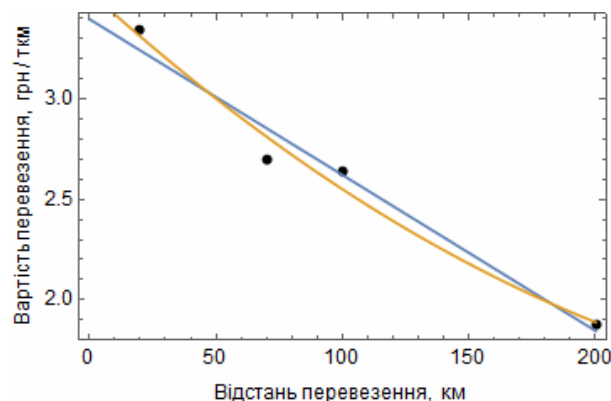


Рис. 5. Середня вартість перевезень вантажу для України в 2016 році

Fig. 5. Average cost of cargo transportations in Ukraine in 2016

Сама вартість соломи для України складає ціну від 500 грн до 1 500 грн за тону. Цю солому потрібно також доставити до котельної. Тоді

треба брати до уваги також вартість доставки соломи для котельної. Загальну вартість соломи можна підрахувати як суму купівлі та доставки по співвідношенню:

$$S_d = S_c \cdot M(R) + \int_{R1}^{R2} M(R) \cdot S(R) \cdot dR, \quad (4)$$

де  $S_d$  – сумарна вартість купленої та доставленої соломи, грн.,  $S_c$  – вартість купівлі соломи, грн.  $S(R)$  – вартість доставки соломи в залежності від відстані, грн,  $M(R)$  – маса зібраної соломи в залежності від радіуса збору, т.

Розрахунок витрат на купівлю та доставку соломи до котельні по співвідношенню (4) наведено на рис. 6.

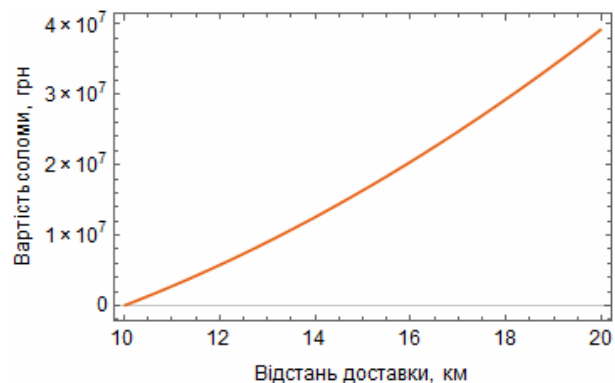


Рис. 6. Вартість доставки зібраної соломи з врахуванням вартості купівлі

Fig. 6. Shipping cost of collected straw with account the cost of purchase

Була також прорахована вартість одного МВт потужності котельні в залежності від відстані збору, що можна вважати також і від потужності самої котельні. Розрахунок здійснювався по співвідношенню:

$$S_1 = \frac{M(R) r f}{T_h S_d}, \quad (5)$$

де  $M(R)$  – маса зібраної соломи,  $r$  – теплотворна здатність соломи, 17 МДж/кг, – ККД котельної, 0,82,  $T_h$  – тривалість опалювального сезону, 180 діб,  $S_d$  – вартість купівлі та доставки соломи. Результати розрахунку по співвідношенню (5) наведені на рис. 7.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

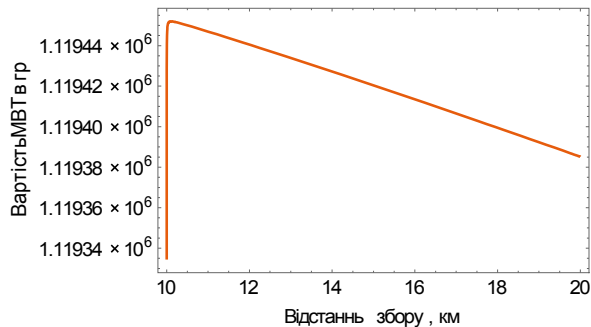


Рис. 7. Вартість одного МВт потужності котельні в залежності від відстані збору

Fig. 7. Cost of one MWh of boiler house power depending on the distance of collection

Для порівняння вартість одного МВт на протязі опалювального сезону для газу по ціні 9 600 гривень за 1 000 м<sup>3</sup> буде дорівнювати  $4,48 \cdot 10^6$  гривень. Тобто приблизно в чотири рази дорожче.

## Висновки

Таким чином на прикладі ДНУЗТа існує можливість переведення частки потужностей котелень Дніпровського регіону на застосування біопалива в якості пального. При існуючому стані речей відносно собівартостей купівлі та перевезень біопалив собівартість однієї гігакалорії буде приблизно в чотири рази нижчий в порівнянні з застосуванням природного газу в якості пального. Негативними факторами при застосуванні в якості пального соломи є досить велика площа під склад пального та велика корозійна активність димових газів, які створюються при палінні соломи. Загальним недоліком для усіх видів біопалива є необхідність перебудови котлів под. конкретний тип біопалива. Це потребує значних коштів. Однак окупність при застосуванні біопалив складає 3–5 років.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 4472-2005. Системи енергетичного менеджменту. Загальні вимоги. – Київ : Держстандарт України, 2005. – 28 с.
2. Никитин, Е. Е. Концептуальные вопросы модернизации теплообеспечения населенных пунктов Украины / Е. Е. Никитин // Проблемы загалової енергетики : наук. зб. / Нац. акад. наук України, Ін-т заг. енергетики. – Київ, 2012. – Вип. 2. – С. 5–11.
3. Никитин, Е. Е. Оценка технико-экономической эффективности комплексной термомодернизации централизованной системы теплоснабжения и зданий / А. В. Дутка, Е. Е. Никитин // Энергетика и ТЭК. – 2013. – № 9 (126). – С. 22–26.
4. Підвищення ефективності роботи системи теплопостачання інфраструктури громадських будівель на прикладі ДНУЗТ / О. М. Пшінько, В. Г. Кузнецов, Д. К. Яценко, В. О. Габрінець // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 97–107. doi: 10.15802/stp2016/74728.
5. Показники ефективності систем теплопостачання / В. І. Дешко, М. М. Шовколюк, Ю. В. Шовколюк, С. М. Дудніков // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. – Київ, 2012. – Вип. 16. – С. 182–192.
6. Про альтернативні джерела енергії [Електронний ресурс] : Закон України від 20 лют. 2003 р. № 555-IV. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/555-15>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.01.2017.
7. Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [Електронний ресурс] : розпорядж. Кабінету Міністрів України від 1 жовт. 2014 р. № 902-р. – Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.01.2017.
8. Про стимулювання заміщення природного газу під час виробництва теплової енергії для установ та організацій, що фінансуються з державного і місцевого бюджетів [Електронний ресурс] : постанова Кабінету Міністрів України від 10 верес. 2014 р. № 453. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/453-2014-%D0%BF>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.01.2017.
9. Про стимулювання заміщення природного газу у сфері теплопостачання [Електронний ресурс] : постанова Кабінету Міністрів України від 09 лип. 2014 р. № 293. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/293-2014-%D0%BF>. – Назва з екрана. – Перевірено : 10.01.2017.
10. Пшінько, О. М. Аналіз ефективності системи теплопостачання студмістечка Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту / О. М. Пшінько, В. А. Габрінець, В. М. Горячкін // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 2 (50). – С. 74–82. doi: 10.15802/stp2014/23756.



## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

11. Heiland, H. G. Flow and temperature field measurements of thermal convection in a small vertical gap using liquid crystals / H. G. Heiland, G. Wozniak, K. Wozniak // Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 43. – Iss. 9. – P. 863–870. doi: 10.1007/s00231-006-0165-z.
12. Jaremkiewicz, M. Accurate measurement of unsteady state fluid temperature / M. Jaremkiewicz // Heat and Mass Transfer. – 2016. – P. 1–11. doi: 10.1007/s00231-016-1866-6.
13. Taler, D. Experimental determination of correlations for average heat transfer coefficients in heat exchangers on both fluid sides / D. Taler // Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 49. – Iss. 8. – P. 1125–1139. doi: 10.1007/s00231-013-1148-5.
14. Stephan, P. Local heat flow and temperature fluctuations in wall and fluid in nucleate boiling systems / P. Stephan, T. Fuchs // Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 45. – Iss. 7. – P. 919–928. doi: 10.1007/s00231-007-0320-1.

А. Н. ПШИНЬКО<sup>1\*</sup>, В. А. ГАБРИНЕЦ<sup>2\*</sup>, В. Г. КУЗНЕЦОВ<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление проектами, здания и строительные материалы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 46, эл. почта pshinko@r.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

<sup>2\*</sup>Каф. «Теплотехника», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 87, эл. почта gabrin62@mail.ru, ORCID 0000-0002-6115-7162

<sup>3\*</sup>Каф. «Интеллектуальные системы электроснабжения», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25, эл. почта vkuz@i.ua, ORCID 0000-0003-4165-1056

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ БИОРЕСУРСОВ ДЛЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

**Цель.** В исследовании необходимо проанализировать возможность и условия обеспечения эффективной работы систем теплоснабжения при переходе части теплогенерирующих мощностей на биотопливо. В качестве биотоплива предлагается применять солому злаковых культур, которые широко распространены в Приднепровском регионе. Главной целью работы является научный просчет возможности и стоимости конкретных мероприятий для такого перехода. Как пример берется котельная компактного городка Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ), потребляющая природный газ. **Методика.** В работе проведен анализ законодательной базы Украины, которая стимулирует применение возобновляемых источников в качестве топлива, а также сделан анализ механизмов стимулирования и развития этого направления. Также определяются возможности Приднепровского региона по обеспечению получения и поставок соломы для работы котельной. Анализируются стоимостные показатели перевозок грузов по территории Украины в 2016 году, которые зависят от расстояния и размера грузовиков. Эти показатели, а также показатели, связанные с покупкой соломы, рассматриваются совместно с энергетическими возможностями ее применения в качестве топлива. **Результаты.** При существующих в Украине (по состоянию на 2016 год) производительности зерновых в сельском хозяйстве и стоимостных показателей в области перевозок, перевод доли мощностей на биотопливо является достаточно рентабельным. Стоимость единицы тепловой мощности при этом может быть снижена в четыре раза. **Научная новизна.** Впервые предложено использовать новые комплексные подходы для оценки стоимости единицы мощности тепловой котельной при переходе ее на применение возобновляемых источников энергии. Авторами также предложена новая логистика доставки этих источников к месту их применения. С технической и стоимостной сторон определен оптимальный порядок мощностей перевода на новые возобновляемые источники энергии в конкретном регионе, в зависимости от структуры посевных площадей и их продуктивности. **Практическая значимость.** Введение предлагаемых решений и подходов к обеспечению мощностей котельной возобновляемыми источниками энергии могут быть реализованы при относительно небольших капиталовложениях и могут дать значительный экономический эффект.

**Ключевые слова:** биоресурсы; сгорание соломы; система тепло- и горячего водоснабжения; тепловые потери; тепловой режим; теплотворная способность; стоимость перевозки; возобновляемые источники энергии



O. M. PSHINKO<sup>1\*</sup>, V. O. GABRINET<sup>2\*</sup>, V. H. KUZNETSOV<sup>3\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Projects Management, Buildings and Construction Materials», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 46, e-mail pshinko@r.dit.edu.ua, ORCID 0000-0002-1598-2970

<sup>2\*</sup>Dep. «Heat Engineering», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 87, e-mail gabrin62@mail.ru, ORCID 0000-0002-6115-7162

<sup>3\*</sup>Dep. «Intelligent Systems of Electric Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25, e-mail vkuz@i.ua, ORCID 0000-0003-4165-1056

## USING REGIONAL RENEWABLE ENERGY RESOURCES FOR HEATING SUPPLY SYSTEMS

**Purpose.** The study analyzes the possibility and conditions for the effective operation of heating systems during the transition of the heat-generating capacity to biofuels energy. The straw of cereal crops, which are prevailing in Dnipro region, is used for this. The main purpose is scientific calculation of opportunities and cost of specific measures for such a transition. As an example it was taken the boiler-room of campus at Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT) that consumes natural gas.

**Methodology.** The work analyzes the legislative base of Ukraine, which promotes the using of renewable energy sources as fuel, as well as the incentive mechanisms for the development of this trend. The paper identifies opportunities of Prydniprovsk region to ensure straw supply for the boiler-room. Cost parameters of cargo transportation on the territory of Ukraine in 2016, which depend on the distance and the size of the trucks, are analysed. These indicators, as well as indicators related to its purchase, are considered together with energy potential of using the straw as fuel. **Findings.** With existing in Ukraine (as of 2016) the grain yielding capacity in the agriculture and cost indicators in the field of transportations, the transition of capacity share to biofuel is sufficiently profitable. The thermal power unit cost can be reduced fourfold. **Originality.** For the first time it is proposed to use the new integrated approaches to assess the cost of thermal power unit boiler with its transition to the use of renewable energy sources. The authors also proposed a new logistics delivery of these sources to the place of their application. From a technical and cost points of view it was determined the optimal order of capacity transfer for new renewable sources of energy in a given region depending on the structure of areas under crops and their productivity. **Originality.** The introduction of the proposed solutions and approaches to capacity boiler renewable energy sources can be realized with a relatively small investment and can provide significant economic benefits.

**Keywords:** biological resources; straw combustion; heat and hot water supply; heat loss; thermal regime; calorific value; transportation costs; renewable energy

## REFERENCES

1. Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Zahalni vymohy, DSTU 4472-2005 (2005).
2. Nikitin, E. E. (2012). Conceptual issues of a modernization of heat supply to settlements in Ukraine. *The Problems of General Energy*, 2, 5-11.
3. Nikitin, E. E., & Dutka, A. V. (2013). Otsenka tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti kompleksnoy termomodernizatsii tsentralizovannoy sistemy teplosnabzheniya i zdaniy. *Energy and TEK*, 9(126), 22-26.
4. Pshinko, O. M., Kuznetsov, V. H., Yatsenko, D. K., & Gabrinets, V. O. (2016). Improving the efficiency of the heating system for public buildings infrastructure in the context of DNURT. *Science and Transport Progress*, 3(63), 97-107. doi: 10.15802/stp2016/74728
5. Deshko, V. I., Shovkolyuk, M. N., Shovkolyuk, Y. V., & Dudnikov, S. M. (2012). Pokaznyky efektyvnosti system teplopostachannia. *Ventilation, Lighting and Heat Supply*, 16, 182-192.
6. Pro alternatyvni dzherela enerhii: Zakon Ukrainy 2003, number 555-IV (2003). Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/555-15>
7. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2014). Pro Natsionalnyi plan dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2020 roku, number 902-p. Retrieved from <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80>
8. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2014). Pro stymuliuvannia zamishchennia pryrodnoho hazu pid chas vyrobnytstva teplovoi enerhii dlia ustanov ta orhanizatsii, shcho finansuiutsia z derzhavnogo i mistsevoho biudzhetyv No. 453. Retrieved from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/453-2014-%D0%BF>

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

9. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2014). Pro stymuliuvannya zamishchennia pryrodnoho hazu u sferi teplopostachannia No. 293. Retrieved from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/293-2014-%D0%BF>
10. Pshinko, O. M., Gabrinets, V. O., & Horyachkin, V. N. (2014). Effectiveness analysis of campus heat supply system of Dnipropetrovsk National University of railway transport. *Science and Transport Progress*, 2(50), 74-82. doi: 10.15802/stp2014/23756
11. Heiland, H. G., Wozniak, G., & Wozniak, K. (2007). Flow and temperature field measurements of thermal convection in a small vertical gap using liquid crystals. *Heat and Mass Transfer*, 43(9), 863-870. doi: 10.1007/s00231-006-0165-z
12. Jaremkiewicz, M. (2016). Accurate measurement of unsteady state fluid temperature. *Heat and Mass Transfer*, 1-11. doi: 10.1007/s00231-016-1866-6
13. Taler, D. (2013). Experimental determination of correlations for average heat transfer coefficients in heat exchangers on both fluid sides. *Heat and Mass Transfer*, 49(8), 1125-1139. doi: 10.1007/s00231-013-1148-5
14. Stephan, P., & Fuchs, T. (2007). Local heat flow and temperature fluctuations in wall and fluid in nucleate boiling systems. *Heat and Mass Transfer*, 45(7), 919-928. doi: 10.1007/s00231-007-0320-1

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. Ю. С. Барашем (Україна), д.т.н., проф. М. В. Губинським (Україна)

Надійшла до редколегії: 27.10.2016

Прийнята до друку: 11.01.2017

## УДК 005.8:519.816

И. В. ТРИФОНОВ<sup>1\*</sup>, И. А. КОРХИНА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технология строительного производства», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (096) 810 78 28, эл. почта Vo\_ron@ukr.net, ORCID 0000-0002-3278-6197

<sup>2\*</sup>Каф. «Управление проектами», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (097) 857 32 41, эл. почта kor\_inna@mail.ru, ORCID 0000-0002-7530-7993

## АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЕКТНОМ МЕНЕДЖМЕНТЕ

**Цель.** В рамках научной работы необходимо: 1) провести анализ существующих методов принятия решений; 2) дать характеристику каждому из видов методов, которые имеют практическое применение в теории управления проектами; 3) разделить представленные методы на смысловые группы; 4) определить, какие из этих групп методов следует использовать для принятия решений в проектном менеджменте в трех случаях: а) когда объектом является проект; б) когда объектом выступает программа; в) когда объектом выступает портфель проектов. **Методика.** В работе проводился сравнительный анализ существующих методов принятия решений, а также изучалась возможность их применения для разных объектов управления проектного менеджера. **Результаты.** По итогам анализа все методы были разделены на две категории: формальные и логико-интуитивные (неформальные). Было определено, какие методы одинаково целесообразно применять для всех объектов управления проектного менеджера, а использование каких методов будут неэффективно для того или иного объекта. Анализ показал, что некоторые методы принятия решений не подходят для использования при управлении определенным объектом. Из этого делается вывод о необходимости их усовершенствования и адаптации к определенному объекту управления. **Научная новизна.** Получило дальнейшее развитие определение проблемы принятия решений в управлении проектами, а также проведен анализ применения различных методов принятия решений для трех объектов управления: проекта, программы и портфеля. **Практическая значимость.** Принятие решений в управлении проектами напрямую влияет на тот результат, который ожидается получить. Качество принимаемых решений, в свою очередь, зависит от правильно выбранного метода в заданных обстоятельствах. Рекомендованное в статье усовершенствование определенных методов позволит проектному менеджеру принимать более качественное и эффективное решение.

**Ключевые слова:** принятие решений; проектный менеджер; проект; программа; портфель

### Введение

Современное развитие железнодорожного транспорта невозможно представить без применений проектных подходов к его управлению. В ряде научных работ [5, 8, 10] авторами рассматриваются проблемы развития данной отрасли и предлагаются методы решения в рамках теории управления проектами и портфелями проектов.

Следует отметить, что в процессе управления проектом в сфере железнодорожного транспорта принимается множество различных решений. Все эти решения можно условно разделить на две группы. Первая группа – это решения, связанные с текущими вопросами и не связанные с ходом реализации проекта (например, с личными интересами персонала проекта). Вторая группа – это решения, влияющие на

эффективность выполнения проекта. Именно эти решения принимает непосредственно руководитель (менеджер) проектов, и они напрямую влияют на достижение поставленных целей проекта. Причем проектный менеджер вынужден принимать решения постоянно: на любой фазе жизненного цикла проекта требуется принятие определенных управленческих решений.

При этом следует отметить авторов, которые внесли существенный вклад в решение этой проблемы: Вертакова Ю. В., Кононенко И. В., Мирошниченко Ю. О. и т.д.

### Цель

Цель работы – определение адекватных методов принятия решений в различных объектах управления проектного менеджера.

### Методика

Проаналізуємо існуючі методи прийняття управлінських рішень.

1. Експертні методи – дозволяють прогнозувати і оцінювати результати дій, ґрунтуючись на прогнозах спеціалістів. Іншими словами, управлінське рішення формується на думку більшості експертів (особи, які мають досвід і знання в певній сфері).

2. Метод анкетування – дозволяє прийняти рішення на основі аналізу зібраних думок респондентів.

3. Діагностичний метод – з допомогою нього можна прогнозувати ймовірні відхилення від плану шляхом визначення і аналізу ознак, що характеризують стан системи.

4. Методи економічного аналізу. До методів економічного аналізу відносять: загально-економічні, статистичні і математичні методи, які дозволяють досліджувати і описувати господарську діяльність організації в її розвитку. Дані методи використовуються для прогнозування фінансових потоків, оцінки ймовірності ризику тощо.

5. Факторний аналіз – представляє собою комплексне і системне вивчення і вимірювання впливу факторів на величину результативних показників. Управлінське рішення приймається в залежності від типу застосованого факторного аналізу: детермінованого, стохастичного, прямого, зворотного, одноступінчатого, багаторівневого, статичного, динамічного, ретроспективного або перспективного.

6. Метод ланцюгових підстановок – один із методів рішення завдань факторного аналізу, що визначає вплив окремих факторів на зміну величини результативного показника шляхом поступової заміни базисної величини кожного факторного показника в об'ємі результативного показника на фактичну в звітний період.

7. Теорія ігор. Дозволяє розробити рекомендації по раціональному образі дій учасників конфлікту шляхом створення математичної моделі, що формалізує змістовне описання ситуації зіткнення інтересів. Застосовується для всіх видів рішень, якщо на їх прийняття впливають інші діючі особи.

8. Оптиміальне лінійне програмування. Моделі оптиміального лінійного програмування дозволяють знайти таке допустиме рішення (план) задачі, при якому цільова функція досягає екстремума. Можливо застосовувати в процесах управління часом, вартістю, ресурсами проекту.

9. Функціонально-вартісний аналіз – використовується для оцінки реальної вартості продукту безотносно до організаційної структури організації. Підходить для прийняття рішень в процесах управління вартістю проекту.

10. Фактографічні методи – екстраполяція, інтерполяція, тренд-аналіз; ґрунтуються на екстраполяції в майбутнє тенденцій, закономірностей розвитку яких в минулому і нинішньому добре відомі. Застосовуються в управлінні часом, вартістю і ризиками проекту.

11. Метод аналізу ієрархії. Математичний інструмент системного підходу до складних проблем прийняття рішень. Цей метод дозволяє зрозумілим і раціональним образом структурувати складну проблему прийняття рішень у вигляді ієрархії, порівняти і виконати кількісну оцінку альтернативних варіантів рішення.

12. Метод багатовимірного шкалювання – метод є альтернативою факторного аналізу. Він візуалізує дані з допомогою розташування точок, що відповідають досліджуваному (шкалюваному) об'єкту, в просторі меншої розмірності, ніж простір ознак об'єктів.

13. Діаграма Ісакави – графічно зображує взаємозв'язок між розв'язуваною проблемою і причинами, що впливають на її виникнення. Застосовується при прийнятті рішень в процесі управління якістю.

14. Метод побудови ієрархічної структури робіт – дозволяє розбити проект на складові частини і встановити ієрархічно структуруване розподілення робіт. Підходить для прийняття рішень в процесі управління часом проекту і його ресурсами.

15. Сетеві графіки – використовуються для взаємозв'язку в часі календарних планів по проекту. Їх застосування цілорозумно в процесі управління часом проекту.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

16. Диаграмма Ганта – столбчатая диаграмма, иллюстрирующая планы, графики работ по проекту.

17. Гистограмма ресурсов – применяется для иллюстрации потребности, использования и наличия ресурсов проекта.

18. Кейс-метод – позволяет получить наилучшее решение из всех возможных, предложенных в процессе анализа определенной реальной ситуации.

19. Метод мозгового штурма – предполагает высказывание большого количества вариантов решений и выбор из них самого лучшего.

20. Метод ассоциаций и аналогий – состоит в использовании ассоциативного мышления человека, которое позволяет ему сопоставлять исследуемый процесс с подобными, для генерации новых идей и принятия решений.

21. Метод интерактивного планирования – помогает определиться с действиями, необходимыми для получения желаемого результата в будущем. Интерактивное планирование позволяет быстро и адекватно реагировать на такие изменения, которые невозможно контролировать.

22. Метод Белбина – это тест, позволяющий определить, какую именно роль играет тот или иной член команды проекта. Используется в управлении командой проекта.

23. Логико-структурный подход (ЛСП) – демонстрирует логику реализации проектов и программ за счет представления их ключевых компонентов в лаконичном и последовательном виде.

24. Причинно-следственный анализ – позволяет планировать изменения и улучшения благодаря нахождению причинно-следственных связей между условиями и событиями. То есть определив причины проблем, можно принимать решения о том, какие действия потребуются для их решения.

25. Метод декомпозиции – заключается в разделении большой задачи на ряд меньших, возможно и взаимосвязанных задач, для упрощения получения управленческого решения.

Если с методами принятия решений, используемыми в проектах все более-менее понятно, то какие из этих методов целесообразно использовать для принятия управленческих решений при реализации программы или портфеля проектов? Ведь программа и портфель

проектов предполагают управление несколькими проектами. Причем в портфеле необходимо одновременно управлять различными проектами, не зависящими друг от друга.

В данной статье проводится анализ применяемых в управлении проектами методов принятия управленческих решений и определяется, какие из них имеет смысл использовать для принятия решений при управлении проектом, программой или портфелем проекта.

### Результаты

Все методы, указанные выше, мы разделили на две группы: формальные и логико-интуитивные (неформальные). В итоге была получена табл. 1. Здесь знак «+» означает то, что метод можно использовать для определенного объекта управления; знак «+/-» – в определенных ситуациях метод можно использовать; «-» – метод нецелесообразно применять для данного объекта управления.

Из табл. 1 видно, что не все группы методов одинаково подходят для принятия решений в проектах, программах и портфелях. Только лишь экономико-математические методы и методы, основанные на стимулировании творческой активности, в целом можно применять для различных объектов управления проектного. Такие методы, как анализ иерархий и методы, основанные на логическом мышлении, требуют усовершенствования для применения в проектах.

Отметим, что графические методы нецелесообразно использовать при принятии управленческих решений в программах и проектах, где, как было сказано выше, нужно управлять несколькими проектами, что значительно усложняет графическое представление объекта управления. Применение методов, основанных на логическом мышлении, для принятия управленческих решений в портфелях проектов также сопряжено с определенными трудностями. Если, к примеру, в портфеле содержится десятки проектов, то одним логическим путем принять управленческое решение будет достаточно сложно, да и степень его адекватности может быть невысокой.

Таблица 1

**Анализ использования методов принятия решений в проектном менеджменте**

Table 1

**Analysis of the existing techniques of management decision-making**

Группы методов	Методы принятия управленческих решений	Порядковый номер соответствующих методов	Область применения метода	Объект управления проектного менеджера		
				Проект	Программа	Портфель проектов
Формальные	Экспертные методы [1, 6, 7]	1–3	Управление временем, стоимостью, ресурсами, качеством и рисками	+	+	+/-
	Экономико-математические методы [3, 5, 12]	4–10	Управление временем, стоимостью, результатами в течение жизненного цикла проекта, оценка и планирование рисков	+	+	+
	Анализа иерархий [4]	11	Управление интеграцией	+/-	+	+
	Графические методы [9]	12–17	Планирование времени, ресурсов, стоимости	+	–	–
Логико-интуитивный (неформальный)	Основанные на стимулировании творческой активности [11, 13]	18–22	Выбор состава портфеля проектов, разработка концепции, планирование ресурсов	+	+	+
	Основанные на логическом мышлении [2]	23–25	Оценка эффективности, мониторинг проектов, планирование изменений	+/-	+	–

**Научная новизна и практическая значимость**

Проанализировав методы принятия решений с точки зрения объекта управления проектного менеджера, на который они направлены, было выявлено, что не все методы одинаково подходят для различных объектов. Так, к примеру, графические методы и методы, основанные на логическом мышлении, не позволяют проектно-му менеджеру принять качественное решение, если он управляет портфелем проектов.

В связи с этим, методы такого типа требуют адаптации к применению в портфелях, а также в программах проектов.

**Выводы**

1. В статье проанализированы известные методы принятия решений, используемые в теории управления проектами.

2. Предложено разделение всех вышеуказанных методов на две основные группы, а также приведена оценка возможности их

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

применения для того или иного объекта управления менеджера.

3. Выявлено, что не все методы одинаково подходят для всех объектов управления.

4. В соответствии с вышесказанным вектор дальнейших исследований проблематики при-

нятия решений в управлении проектами должен быть направлен на усовершенствование существующих методов применительно к различным объектам управления.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бессонова, М. А. Диагностика управленческих решений в системе управления [Электронный ресурс] / М. А. Бессонова // Экономика и менеджмент инновационных технологий. – 2012. – № 6. – Режим доступа: <http://ekonomika.snauka.ru/2012/06/1163>. – Загл. с экрана. – Проверено : 15.02.2017.
2. Готин, С. В. Логико-структурный подход и его применение для анализа и планирования деятельности / С. В. Готин, В. П. Калоша. – Москва : Вариант, 2007. – 118 с.
3. Кононенко, И. В. Многокритериальная оптимизация содержания проекта / И. В. Кононенко, М. Э. Колесник, Е. В. Лобач // Вісн. Нац. тех. ун-ту «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами : зб. наук. пр. – Харків, 2014. – № 3 (1046). – С. 26–36.
4. Коробов, В. Б. Преимущества и недостатки метода анализа иерархий / В. Б. Коробов, А. Г. Тutyгин // Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А. И. Герцена. – 2010. – № 122. – С. 108–115.
5. Корхина, И. А. Математическая модель формирования оптимального портфеля проектов с учетом случайных факторов / И. А. Корхина // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 2 (50). – С. 111–118. doi: 10.15802/stp2014/23787.
6. Мірошніченко, Ю. О. Особливості прийняття управлінських рішень відповідно до фаз проектного циклу / Ю. О. Мірошніченко // Управління проектами та розвиток виробництва : зб. наук. пр. / Східно-укр. нац. ун-т ім. В. Даля. – Луганськ, 2011. – № 4 (40). – С. 16–20.
7. Модифицированный метод анкетирования в задачах принятия решений / А. А. Стенин, Е. Ю. Мелкумян, А. Н. Губский, В. В. Курбанов // Вісн. СумДУ. Серія: «Технічні науки». – 2013. – № 2. – С. 101–106.
8. Садловська, І. П. Тенденції розвитку залізничного транспорту України / І. П. Садловська // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 37. – С. 295–297.
9. Управление проектом. Основы проектного управления : учебник / под ред. М. Л. Разу. – Москва : КНОРУС, 2010. – 768 с.
10. Харченко, О. И. Исследование подходов к повышению эффективности функционирования подразделений железнодорожного транспорта с позиции устойчивого развития / О. И. Харченко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 4 (52). – С. 52–59. doi: 10.15802/stp2014/27339.
11. Cadey, J. G. On exploratory factor analysis: A review of recent evidence, an assessment of current practice, and recommendations for future use / J. G. Cadey, B. Happell // Intern. J. of Nursing Studies. – 2014. – Vol. 51. – Iss. 3. – P. 511–521. doi: 10.1016/j.ijnurstu.2013.10.005.
12. Isaksen, S. G. A Review of Brainstorming Research: Six Critical Issues for Inquiry / S. G. Isaksen // Creative Research Unit, Creative Problem Solving Group. – Buffalo, 1998. – 28 p.
13. Smith, M. Construction of Student Groups Using Belbin: Supporting Group Work in Environmental Management / M. Smith, G. Polglase, C. Parry // J. of Geography in Higher Education. – 2012. – Vol. 36. – Iss. 4. – P. 585–601. doi: 10.1080/03098265.2012.692156.

І. В. ТРИФОНОВ<sup>1\*</sup>, І. А. КОРХІНА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Технологія будівельного виробництва», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (096) 810 78 28, ел. пошта Vo\_ron@ukr.net, ORCID 0000-0002-3278-6197

<sup>2\*</sup>Каф. «Управління проектами», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (097) 857 32 41, ел. пошта kor\_inna@mail.ru, ORCID 0000-0002-7530-7993

## АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ПРОЕКТНОМУ МЕНЕДЖМЕНТІ



## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

**Мета.** В рамках наукової роботи необхідно: 1) виконати аналіз існуючих методів прийняття рішень; 2) дати характеристику кожному з видів методів, які мають практичне застосування в теорії управління проектами; 3) розділити наведені методи на смислові групи; 4) визначити, які з цих груп методів слід використовувати для прийняття рішень у проектному менеджменті в трьох випадках: а) коли об'єктом є проект; б) коли об'єктом виступає програма; в) коли об'єктом виступає портфель проектів. **Методика.** У роботі виконувався порівняльний аналіз існуючих методів прийняття рішень, а також вивчалася можливість їх застосування для різних об'єктів управління проектного менеджера. **Результати.** За підсумками аналізу всі методи були розділені на дві категорії: формальні та логіко-інтуїтивні (неформальні). Було визначено, які методи однаково доцільно застосовувати для всіх об'єктів управління проектного менеджера, а використання яких методів буде неефективне для того чи іншого об'єкта. Аналіз показав, що деякі методи прийняття рішень не підходять для використання при управлінні певним об'єктом. З цього робиться висновок про необхідність їх удосконалення та адаптації до певного об'єкта управління. **Наукова новизна.** Дістало подальший розвиток вирішення проблеми прийняття рішень в управлінні проектами, а також проведено аналіз застосування різних методів прийняття рішень для трьох об'єктів управління: проекту, програми і портфеля. **Практична значимість.** Прийняття рішень в управлінні проектами безпосередньо впливає на той результат, який очікується отримати. Якість прийнятих рішень, в свою чергу, залежить від правильно обраного методу в заданих обставинах. Рекомендоване в статті удосконалення певних методів дозволить проектному менеджеру приймати більш якісне та ефективне рішення.

*Ключові слова:* прийняття рішень; проектний менеджер; проект; програма; портфель

I. V. TRIFONOV<sup>1\*</sup>, I. A. KORKHINA<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Constructional Production Technology», Public Higher Education Institution «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskyi St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (096) 810 78 28, e-mail Vo\_ron@ukr.net, ORCID 0000-0002-3278-6197

<sup>2\*</sup>Dep. «Project Management», National Metallurgical Academy of Ukraine, Haharyn Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (097) 857 32 41, e-mail kor\_inna@mail.ru, ORCID 0000-0002-7530-7993

## ANALYSIS ON THE USAGE OF DECISION-MAKING METHODS IN PROJECT MANAGEMENT

**Purpose.** The scientific paper is aimed: 1) to analyze the existing decision-making methods; 2) to characterize each type of the methods that have practical application in the project management theory; 3) to divide the presented methods into the sense groups; 4) to determine which of these groups should be used for decision-making in project management in three cases: a) when the object is a project; b) when the object is a program; c) when the object is a project portfolio. **Methodology.** It was carried out a comparative analysis of the existing decision-making methods, as well as it was studied the possibility of their use for different controlled objects of project manager. **Findings.** As a result of the analysis all of the methods have been divided into two categories: formal and logical-intuitive (informal) ones. It was determined which methods are equally appropriate to apply for all controlled objects of project manager, and which methods will not be effective for a particular object. The analysis showed that some of the decision-making methods are not suitable for use in the management of the certain object. It is concluded that they should be improved and adapted to the specific object of management. **Originality.** Solution of the problem of decision-making in project management was further developed, as well as it was analyzed the application of different decision-making methods for three controlled objects: project, program and portfolio. **Practical value.** Decision-making in project management has a direct influence on the result, which is expected to receive. The quality of decisions, in turn, depends on the correct method chosen in the given circumstances. The recommended improvement of certain methods will allow the project manager to make better and more efficient solution.

*Keywords:* decision making; project manager; project; program; portfolio

### REFERENCES

1. Bessonova, M. A. (2012). Diagnostika upravlencheskikh resheniy v sisteme upravleniya. *Economics and Innovations Management*, 6. Retrieved from <http://ekonomika.snauka.ru/2012/06/1163>
2. Gotin, S. V., & Kalosha, V. P. (2007). *Logiko-strukturnyy podkhod i yego primeneniye dlya analiza i planirovaniya deyatelnosti*. Moscow: Variant.

## ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ

3. Kononenko, I. V., Kolesnik, M. E., & Lobach, Y. V. (2014). Multicriteria Optimization of Project Scope. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management*, 3(1046), 26-36.
4. Tutygin, A., & Korobov, V. (2010). Advantages and Disadvantages of the Analytic Hierarchy Process. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Science*, 122, 108-115.
5. Korkhina, I. A. (2014). Mathematical Model of Optimal Project Portfolio Forming Based on Random Factors. *Science and Transport Progress*, 2(50), 111-118. doi: 10.15802/stp2014/23787
6. Miroshnichenko, Y. O. (2011). Features making management decisions according to the phases of the project cycle. *Project Management and Development of Production*, 4(40), 16-20.
7. Stenin, A. A., Melkumyan, Y. Y., Gubskiy, A. N., & Kurbanov, V. V. (2013). The modified method of questioning in decision-making tasks. *The Visnyk of the SSU: Technical Sciences*, 2, 101-106.
8. Sadlovska, I. P. (2011). Trends of Development Ukrainian Railway Transport. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 37, 295-297.
9. Razu, M. L. (Ed.). (2010). *Upravleniye proyektom. Osnovy proyektnogo upravleniya*. Moscow: KNORUS.
10. Kharchenko, O. I. (2014). Research of approaches to increase the efficiency of functioning of railway transport subdivisions from the point of view of sustainable development. *Science and Transport Progress*, 4(52), 52-59. doi: 10.15802/stp2014/27339
11. Cadeyern, J. G., Happell, B. (2014). On exploratory factor analysis: A review of recent evidence, an assessment of current practice, and recommendations for future use. *International Journal of Nursing Studies*, 51(3), 511-521. doi: 10.1016/j.ijnurstu.2013.10.005
12. Isaksen, S. G. (1998). *A Review of Brainstorming Research: Six Critical Issues for Inquiry*. Buffalo: Creative Problem Solving Group.
13. Smith, M., Polglase, G., & Parry, C. (2012). Construction of Student Groups Using Belbin: Supporting Group Work in Environmental Management. *Journal of Geography in Higher Education*, 36(4), 585-601. doi: 10.1080/03098265.2012.692156

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. А. І. Белоконем (Україна); д.т.н., проф. А. В. Радкевичем (Україна)

Поступила в редколлегию: 03.10.2016

Принята к печати: 12.01.2017

# ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.4.053:656.2.071.2

О. М. ГОРОБЧЕНКО<sup>1\*</sup>, А. О. АНТОНОВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Експлуатація і ремонт рухомого складу», Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (050) 972 04 71, ел. пошта superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852

<sup>2</sup>Каф. «Експлуатація і ремонт рухомого складу», Український державний університет залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (093) 025 64 00, ел. пошта artem\_antonovich@mail.ru, ORCID 0000-0002-4920-6849

## ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРА НАПРУЖЕНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ МАШИНІСТА ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВІ ЕРГОНОМІЧНОЇ МОДЕЛІ

**Мета.** Ключовим фактором, що впливає на безпеку руху та якість роботи ергатичної системи «поїзд-машиніст», є напруженість роботи локомотивної бригади. Мета наукової роботи – формалізація показника напруженості діяльності машиніста локомотива. **Методика.** Однією з характеристик напруженості роботи машиніста є різниця між часом, відведеним на виконання завдання, і необхідним часом (зовнішній резерв або дефіцит часу). Визначені множини суттєвих та несуттєвих операцій при керуванні локомотивом у різних поїзних ситуаціях. Використовуючи методи нечіткої логіки, поняття «суттєвість операції керування локомотивом» представлено у вигляді набору лінгвістичних змінних. Для визначення функції приналежності елементів множини «суттєвість операції керування локомотивом» використано метод експертних оцінок. Коефіцієнт часової напруженості представлений у вигляді нечіткого числа L-R-типу. **Результати.** Встановлена величина відносної кількості операцій керування локомотивом згідно розподілу за параметром «суттєвість операції». Для визначення найбільш напруженого режиму роботи машиніста проведено ранжування режимів руху за параметром відносної кількості суттєвих операцій керування. Найбільш важкими режимами є: «перешкода попереду», «рух у несприятливих погодних умовах» та «відправлення зі станції на перегін». **Наукова новизна.** Введення величини «умовна суттєвість виконання операції» дозволило більш якісно описати умови ведення поїзда. В роботі вперше представлено визначення напруженості роботи машиніста локомотива у вигляді унімодального нечіткого числа, що дозволить в подальшому використати методи теорії штучного інтелекту для моделювання діяльності машиніста локомотива та розробки інтелектуальних систем керування. **Практична значимість.** Авторами отримана можливість безпосередньо врахувати такий важливий якісний показник, як «напруженість роботи машиніста» в системах автоведення та контролю безпеки руху. Ранжування поїзних ситуацій та керуючих операцій дозволяє обґрунтувати порядок виконання керуючих дій при удосконаленні алгоритмів роботи систем ведення поїздів.

**Ключові слова:** ергатична система; напруженість роботи оператора; машиніст локомотива; безпека руху

### Вступ

Забезпечення безпеки руху є одним з головних завдань залізничників. В цьому напрямку постійно реалізується велика кількість заходів та виконується багато наукових праць. Результа-

татом цього стало значне зниження кількості аварій та інцидентів як на вітчизняних, так і на закордонних залізницях. Однак повністю виключити небезпечні та аварійні ситуації поки що не вдалося. Джерелами небезпеки, крім рухомого складу, обладнання та їх технічного

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

стану залишається також людський фактор. Так за даними [12] на залізницях Євросоюзу тільки за 2014–2015 рік загинуло або серйозно травмовано більше двох тисяч людей. Значна доля транспортних подій пов'язана з неналежним виконанням працівниками своїх обов'язків. Зокрема за даними Укрзалізниці [10] із загальної кількості транспортних подій, 471 випадок (або 70 %) пов'язані з впливом «людського» чинника. За порушення вимог нормативних документів з питань безпеки руху за 2014 рік було притягнуто до відповідальності 2 709 працівників, із них звільнено з займаних посад – 49. Ефективним шляхом покращення безпеки та якості перевезень, з одного боку, є розробка рухомого складу з покращеними характеристиками [1], а з іншого – впровадження автоматизованих систем керування рухом, що реалізовано зокрема фірмами Bombardier [9] та Alstom [8]. Але частина з цих випадків пов'язана із значним психофізіологічним навантаженням, яке відчувають в процесі роботи працівники залізничного транспорту, що керують та організовують рух поїздів [2, 4]. Оцінка та пошук шляхів зниження цього навантаження є пріоритетним завданням, що дозволить значно скоротити вплив людського фактора на безпеку руху.

### Мета

Одним з ключових факторів, що впливає на безпеку руху та на якість роботи ергатичної системи «поїзд-машиніст», є напруженість роботи локомотивної бригади [3]. Мета цієї роботи: мета формалізувати показник напруженості діяльності машиніста локомотива. Для досягнення її мети існує кілька методів аналізу діяльності людини: узагальнено-структурний, операційно-психологічний, метод статистичного еталона, логіко-інформаційний і т. д. [5, 13]. Використовуються також три типи моделей поведінки людини: когнітивні моделі, моделі теорії управління, мережеві моделі задач. Використаємо один з можливих аналітичних методів – метод математичного моделювання діяльності [7]. В основу такого моделювання в цій роботі покладена ідея використання методу експертних оцінок [11] та елементів методу Монте-Карло для імітації імовірно-часових характеристик діяльності операторів.

### Методика

У загальному випадку час виконання окремої операції складається з двох складових:

$$T_i = T_{io.d.} + T_{ip},$$

де  $T_{io.d.}$  – час основної діяльності оператора всередині  $i$ -ої операції;  $T_{ip}$  – час резерву всередині  $i$ -ої операції.

Час резерву  $T_{ip}$  не є показником індивідуальних якостей машиніста і характеризує конкретну технічну реалізацію системи «людина – машина», виробничу обстановку в зоні виконання роботи і т. д. Тому можна вважати, що  $T_{ip} = \text{const}$  для кожної  $i$ -ої операції. Час основної діяльності  $T_{io.d.}$ , навпаки, характеризує індивідуальні якості операторів, ступінь їх обізнаності і т. д. і розподілений за скороченим нормальним законом. Весь вибір операцій ранжується на операції суттєві і несуттєві. Суттєва операція – операція, недодержання якої призводить до зриву всього завдання. Операція, невиконання або пропуск якої не призводить до зриву завдання, а лише погіршує кінцевий ефект, наприклад точність, називається несуттєвою. Різниця між часом, відведеним на виконання завдання, і необхідним – зовнішній резерв або дефіцит часу. Сумарний час всіх несуттєвих операцій є внутрішнім резервом. При дефіциті часу машиніст може жертвувати найближчими, у порядку слідування, несуттєвими операціями. Якщо згаяний час надолужується, машиніст приступає до виконання всіх наступних операцій без винятку.

Необхідно визначити множини суттєвих та несуттєвих операцій при керуванні локомотивом. Позначимо  $X$  <операція керування> як множину всіх операцій керування локомотивом. З досвіду експлуатації локомотивів машиніст виконує під час керування поїздом такі основні операції (для керування тепловозом):  $x_1$  – переведення штурвалу контролера на вищу позицію;  $x_2$  – переведення штурвалу контролера на нижчу позицію;  $x_3$  – переведення штурвалу контролера на нульову позицію;  $x_4$  – переведення крана машиніста в положення «Службове гальмування»;  $x_5$  – переведення крана машиніста в по-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ложення «Екстрене гальмування»;  $x_6$  – переведення крана машиніста в положення «Перекрытия гальмівної магістралі з живленням»;  $x_7$  – переведення крана машиніста в поїзне положення;  $x_8$  – переведення крана машиніста в положення «Відпуск гальм»;  $x_9$  – подавання піску під колісні пари локомотива;  $x_{10}$  – подавання сигналу;  $x_{11}$  – не виконання ніяких дій.

З розглянутого переліку операцій видно, що неможливо однозначно визначити деякі операції як «суттєві» або «несуттєві». Наприклад «переведення штурвалу контролера на вищу позицію» в умовах, коли локомотив іде з поїздом зі швидкістю значно більшою, ніж розрахункову (на 20 км/год і більше), попереду легкий профіль колії без великих спусків та підйомів, машиніст знає, що наступні дві блокділянки вільні – в цій ситуації переведення контролера на вищу позицію є операцією, що можна виконати негайно, або відкласти її виконання на деякий час (на розсуд машиніста). І яке б рішення не прийняв машиніст, це не вплине суттєво на безпеку руху та на витрату пального за поїздку.

Але розглянемо іншу поїзну ситуацію. Локомотив веде поїзд максимальної маси зі швидкістю, близькій до розрахункової, попереду розташований так званий «кінетичний підйом» (що проходиться поїздом за рахунок запасу кінетичної енергії, що забезпечується підвищеною швидкістю). В цьому випадку операція «переведення штурвалу контролера на вищу позицію» є критично важливою, тому що при невиконанні її (можливо декілька разів підряд) поїзд не набере потрібної швидкості для подолання підйому, що попереду, і може виникнути транспортна подія: зупинка поїзда на перегоні. Крім того можливий вихід з ладу або пошкодження тягових електродвигунів в результаті перегрівання.

Отже, робимо висновок, що ступінь суттєвості операцій з керування локомотивом залежить від деяких умов ведення поїзда. Це викликає необхідність розробки теоретичного обґрунтування поняття суттєвості операцій з керування локомотивом.

Використовуючи методи нечіткої логіки, подамо поняття «суттєвість операції керування локомотивом» як набір лінгвістичних змінних (табл. 1).

Таблиця 1

**Значення множини  $Z$  <суттєвість операції керування локомотивом>**

Table 1

**The value of the set  $Z$  <importance of locomotive management operation>**

Позначення елемента множини	Значення елемента множини
$z_1$	«Суттєва»
$z_2$	«Умовно суттєва»
$z_3$	«Несуттєва»

Таблиця 2

**Значення множини  $C$  <поїзна ситуація>**

Table 2

**The value of set  $C$  <a train situation>**

Позначення елемента множини	Значення елемента множини
$c_1$	«Відправлення зі станції на перегін»
$c_2$	«Рух під зелений на підйом»
$c_3$	«Рух під зелений на спуск»
$c_4$	«Рух під жовтий на підйом»
$c_5$	«Рух під жовтий на спуск»
$c_6$	«Рух під червоний на підйом»
$c_7$	«Рух під червоний на спуск»
$c_8$	«Рух по станційним коліям»
$c_9$	«Рух резервом»
$c_{10}$	«Рух у несприятливих погодних умовах»
$c_{11}$	«Перешкода попереду»
$c_{12}$	«Прибуття на станцію»

Значення  $z_2$  = «умовно суттєва» трактується як така операція керування, що в даний момент часу не є суттєвою, але при зміні поїзної обстановки вона стає достовірно суттєвою. Проміжне значення  $z_2$  введено для більшої гнучкості використання множини  $Z$ . Також потрібно ввести нову множину  $C$  <поїзна ситуація>, що ха-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

рактизує поточну ситуацію, в якій машиніст приймає рішення на виконання тієї або іншої операції керування. В результаті аналізу умов роботи локомотивних бригад повна множина  $C$  представлена в табл. 2.

Для визначення функції приналежності елементів множини  $Z$  використано метод експертних оцінок. Опитування виконане серед 56 машиністів локомотива. Для опитування підгото-

влені таблиці. Завданням машиністів, що виступали як експерти, було оцінити кожну операцію з множини  $X$  за ступенем її впливу на результат керування в заданій поїзній ситуації з множини  $C$ . Потрібно було позначити тільки один елемент множини  $Z$  для кожного елемента множини  $X$ . Зведені результати дослідження для перших чотирьох ситуацій наведені у табл. 3.

Таблиця 3

## Зведена таблиця результатів експертного оцінювання

Table 3

## Summary of expert evaluation results

Операції керування локомотивом для $C_1$ = «Відправлення зі станції на перегон»											
$Z$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$
$z_1$	55	54	54	42	56	56	56	56	50	45	50
$z_2$	1	2	2	13					6	11	4
$z_3$				1							2
Операції керування локомотивом для $C_2$ = «Рух під зелений на підйом»											
$Z$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$
$z_1$	42	40	55	55	56	56	55	55	1		
$z_2$	12	15	1	1			1	1	14	21	2
$z_3$	2	1							41	35	54
Операції керування локомотивом для $C_3$ = «Рух під зелений на спуск»											
$Z$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$
$z_1$	2	1	4	56	56	56	56	50			2
$z_2$	1	1	48					6	13	10	5
$z_3$	53	54	4						43	46	49
Операції керування локомотивом для $C_4$ = «Рух під жовтий на підйом»											
$Z$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$
$z_1$	51	52	55	56	56	56	55	55			52
$z_2$	5	4	1				1	1	3	47	4
$z_3$									53	9	

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Повертаючись до моделювання діяльності машиніста для кожної операції, визначається коефіцієнт часової напруженості. В [5] цей коефіцієнт виражається як

$$S_{ij} = \frac{\sum_{l=i+1}^n T_{ij} |B_l = 1}{T_u - T_{i\text{затр}}}, \quad (1)$$

де  $S_{ij}$  – коефіцієнт часової напруженості  $i$ -ї операції  $j$ -ї реалізації;  $\sum_{l=i+1}^n T_{ij} |B_l = 1$  – час, необхідний на виконання решти (після  $i$ -ї) суттєвих операцій;  $B_l$  – індекс суттєвості ( $B=1$  – операція суттєва;  $B=0$  – несуттєва);  $T_u$  – час, відведений на виконання всього завдання (час циклу);  $T_{i\text{затр}}$  – реально витрачений час на виконання операцій до  $(i+1)$ -ї в  $j$ -й реалізації;  $n$  – загальна кількість операцій у даній задачі;  $i$  – змінна номера операції, що моделюється;  $j$  – номер реалізації алгоритму.

Для діяльності машиніста локомотива вище обґрунтовано введення в індекс суттєвості  $B_l$  ( $B_l=1$  операція суттєва;  $B_l=0$  – несуттєва) проміжної величини  $B=0,5$  – операція умовно суттєва. Використовуючи позначення, прийняті в описі керування поїздом, на підставі виразу (1) запишемо вираз

$$S_{x_i c_j} = \frac{\sum_{l=x_{i+1}}^n T_{x_i c_j} |B_l = 1}{T_u - T_{x_i \text{затр}}} + \frac{\sum_{l=x_{i+1}}^n T_{x_i c_j} |B_l = 0,5}{T_u - T_{x_i \text{затр}}}, \quad (2)$$

де  $S_{x_i c_j}$  – коефіцієнт часової напруженості  $x_i$ -ї операції в  $c_j$ -у режимі руху;  $\sum_{l=x_{i+1}}^n T_{x_i c_j} |B_l = 1$  – час, необхідний на виконання решти (після  $x_i$ -ї) суттєвих операцій;  $\sum_{l=x_{i+1}}^n T_{x_i c_j} |B_l = 0,5$  – час, необхідний на виконання решти (після  $x_i$ -ї) умовно суттєвих операцій;  $B_l$  – індекс суттєвості ( $B_l=1$  операція суттєва;  $B_l=0,5$  – операція умовно суттєва;  $B_l=0$  – несуттєва);  $T_u$  – час, відведений на виконання всього завдання

(час циклу);  $T_{x_i \text{затр}}$  – реально витрачений час на виконання операцій до  $x_{i+1}$ -ї в режимі руху  $c_j$ ;  $j$  – змінна номера режиму руху поїзда.

Розглядаючи процес виконання операцій машиністом локомотива, можна зробити висновки, що час  $T_{x_i c_j}$  виконання операції  $x_i$  в режимі руху  $c_j$  є величиною індивідуальною для кожної людини. Залежить від таких факторів, як психофізіологічний стан людини, стан оточуючого середовища, якість навчання, умови ведення поїзда та ін. Це робить визначення точної величини  $T_{x_i c_j}$  дуже складним завданням. Тому пропонується розглядати  $T_{x_i c_j}$  як нечітку величину, що дозволить врахувати низку наведених невизначеностей.

Виходячи з сутності величини часу виконання операції  $x_i$  в режимі руху  $c_j$   $T_{x_i c_j}$ , подано її у вигляді унімодального нечіткого числа  $L$ - $R$ -типу:  $T_{x_i c_j}(t_{x_i c_j}, \alpha_t, \beta_t)$ , де  $t_{x_i c_j}$  – мода нечіткого числа «час виконання операції»,  $\alpha_t > 0$ ,  $\beta_t > 0$  – лівий та правий коефіцієнти нечіткості величини  $T_{x_i c_j}$ . Тоді вираз (2) матиме такий вигляд

$$S_{x_i c_j} = \frac{\sum_{l=x_{i+1}}^n (t_{x_i c_j}, \alpha_t, \beta_t) |B_l = 1}{T_u - T_{x_i \text{затр}}} + \frac{\sum_{l=x_{i+1}}^n (t_{x_i c_j}, \alpha_t, \beta_t) |B_l = 0,5}{T_u - T_{x_i \text{затр}}}.$$

Таким чином, коефіцієнт часової напруженості також перетворюється в нечітке число  $L$ - $R$ -типу. Опускаючи відомі перетворення [6], запишемо остаточний результат визначення  $S_{x_i c_j}$  у нечіткій формі

$$(S_{x_i c_j}, \alpha_s, \beta_s) = \frac{\sum_{l=x_{i+1}}^n (t_{x_i c_j}, \alpha_t, \beta_t) |B_l = 1}{T_u - T_{x_i \text{затр}}} + \frac{\sum_{l=x_{i+1}}^n (t_{x_i c_j}, \alpha_t, \beta_t) |B_l = 0,5}{T_u - T_{x_i \text{затр}}},$$

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$\alpha_s = \sum_{I=x_{i+1}}^n \alpha_{ti} |B_1 = 1 + \sum_{I=x_{i+1}}^n \alpha_{ti} |B_1 = 0,5,$$

$$\beta_s = \sum_{I=x_{i+1}}^n \beta_{ti} |B_1 = 1 + \sum_{I=x_{i+1}}^n \beta_{ti} |B_1 = 0,5.$$

де  $\alpha, \beta$  – лівий та правий коефіцієнти нечіткості відповідних нечітких величин;  $T_y$  – час, відведений на виконання всього завдання (час циклу);  $B_1$  – індекс суттєвості операції.

## Результати

Використання методу експертних оцінок дозволило встановити, що відносна кількість операцій керування локомотивом згідно з розподілом за параметром  $Z$  складає –  $z_1=76\%$ ,  $z_2=11\%$ ,  $z_3=13\%$ .

Для визначення найбільш напруженого режиму роботи машиніста проведемо ранжування режимів руху  $C$  за параметром відносної кількості суттєвих операцій керування (рис. 1). Найбільш важкими режимами є  $c_{11}$  = «Перешкода попереду»,  $c_{10}$  = «Рух у несприятливих погодних умовах» та  $c_1$  = «Відправлення зі станції на перегін».

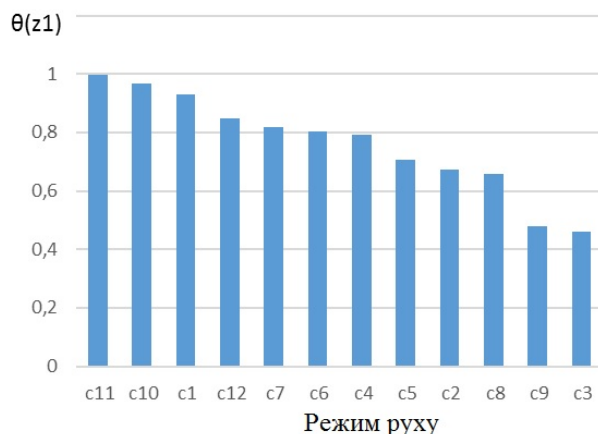


Рис. 1. Ранжування режимів руху за показником  $z_1 \in Z$

Fig. 1. Ranking of movement modes according to index  $z_1 \in Z$

Для визначення найбільш суттєвих керуючих операцій проведемо ранжування їх за показником відносної кількості  $z_1$  «суттєва» (рис. 2).

Таким чином можна сказати, що всі операції з керування гальмами є найбільш суттєвими у порівнянні з іншими для всіх режимів ведення поїзда.

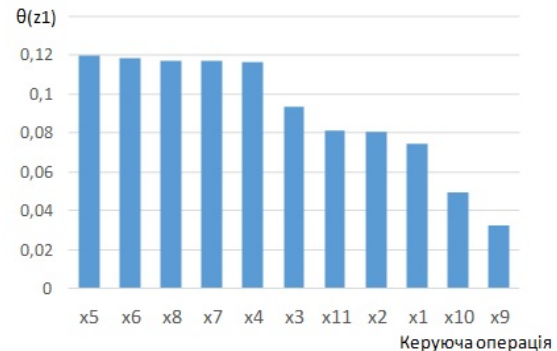


Рис. 2. Ранжування керуючих операцій за показником  $z_1 \in Z$

Fig. 2. Ranking of control operations according to index  $z_1 \in Z$

Також до результатів дослідження належить розроблена форма представлення параметра напруженості роботи машиніста локомотива, що залежить від нечітких параметрів часу на виконання суттєвих та умовно суттєвих операцій керування поїздом.

## Наукова новизна та практична значимість

Введення величини «умовна суттєвість виконання операції» дозволило більш якісно описати умови ведення поїзда. В роботі вперше наведено визначення напруженості роботи машиніста локомотива у вигляді унімодального нечіткого числа, що дозволить в подальшому використати методи теорії штучного інтелекту для моделювання діяльності машиніста локомотива та розробки інтелектуальних систем керування. Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості безпосередньо врахувати такий важливий якісний показник, як «напруженість роботи машиніста» в системах автоведення та контролю безпеки руху. Ранжування поїзних ситуацій та керуючих операцій дозволяє обґрунтувати порядок виконання керуючих дій при удосконаленні алгоритмів роботи систем ведення поїздів.

## Висновки

1. На основі методу експертних оцінок розроблено порядок визначення напруженості роботи машиніста в тій чи іншій ситуації. Визначено форму здобуття знань у вигляді таблиці з даними про поїзні ситуації та суттєвість керуючих рішень.



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

2. Аналіз роботи машиністів локомотива дозволив визначити перелік основних ситуацій при керуванні локомотивом. Ранжування їх за показником суттєвості керуючих операцій дозволило обґрунтувати та визначити найбільш небезпечні ситуації, в яких переважна більшість керуючих рішень є суттєвими. До таких ситуацій віднесено «Перешкода попереду», «Рух у несприятливих погодних умовах», «Відправлення зі станції на перегон».

3. Введення величини «умовна суттєвість виконання операції» дозволило більш якісно описати умови та врахувати відмінності процесу керування поїздом від керуючих процесів в інших галузях. В подальшому можливо величину «умовна суттєвість виконання операції»

деталізувати та розбити на декілька градацій, що дозволить більш якісно спрогнозувати наслідки рішень з керування поїздом (рішення, що прийняті людиною, або інтелектуальною системою). Але це потребує виконання додаткових досліджень роботи локомотивних бригад.

4. Інтелектуалізація керуючих процесів в різних галузях потребує розробляти нові підходи до інтерпретації вхідних параметрів. В роботі вперше наведено визначення напруженості роботи машиніста локомотива у вигляді унімодального нечіткого числа, що дозволить в подальшому використати методи теорії штучного інтелекту для моделювання діяльності машиніста локомотива та розробки інтелектуальних систем керування поїздом.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства та аварійності на транспорті в Україні за 2014 рік / М. Горбаха, В. Коськовецький, Д. Міков [та ін.]. – Київ : М-во інфраструктури України, 2015. – 124 с.
2. Горобченко, А. Н. Методология определения величины параметра сложности нештатной ситуации во время ведения поезда / А. Н. Горобченко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 6 (54). – С. 50–58. doi: 10.15802/stp2014/33077.
3. Дружинин, Г. В. Учет свойств человека в моделях технологий / Г. В. Дружинин. – Москва : Наука/Интерпериодика, 2000. – 327 с.
4. Каменев, О. Ю. Проблематика підходів до дослідження безпеки використання ергатичних систем керування на залізничному транспорті / О. Ю. Каменев // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 2 (44). – С. 7–16. doi: 10.15802/stp2013/12249.
5. Мунипов, В. М. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды / В. М. Мунипов, В. П. Зинченко. – Москва : Логос, 2001. – 356 с.
6. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы : [пер. с пол. И. Д. Рудинского] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
7. Эргономика: принципы и рекомендации / под ред. В. М. Мунипова. – 2-е изд, перераб. – Москва : Всесоюз. науч.-исслед. ин-т техн. эстетики, 1983. – 184 с.
8. Alstom to supply automatic train control system to Santiago de Chile metro's line 1 [Електронний ресурс] // ALSTOM. – 2010. – Режим доступу: <http://www.alstom.com/press-centre/2010/1/Alstom-to-supply-automatic-train-control-system-to-Santiago-de-Chile-metros-line-1-20100120>. – Назва з екрана. – Перевірено : 20.01.2017.
9. A new generation for driverless automated transit systems [Електронний ресурс] // Bombardier Inc. – 2016. – Режим доступу: <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-control-solutions/mass-transit-solutions/cityflo-650.html>. – Назва з екрана. – Перевірено : 20.01.2017.
10. Fomin, O. Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars / O. V. Fomin / Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No. 5. – P. 31–43.
11. Hettiarachchi, C. Risk-based test case prioritization using a fuzzy expert system / C. Hettiarachchi, H. Do, B. Choi // Information and Software Technology. – 2016. – Vol. 69. – P. 1–15. doi: 10.1016/j.infsof.2015.08.008.
12. Railway safety statistics [Електронний ресурс] // Eurostat. Statistics Explained. – 2015. – Режим доступу: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Railway\\_safety\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Railway_safety_statistics). – Назва з екрана. – Перевірено : 20.01.2017.
13. Vdovina, T. An a priori error analysis of operator upscaling for the acoustic wave equation / T. Vdovina, S. E. Minkoff // Intern. J. of Numerical Analysis and Modeling. Institute for Scientific Computing and Information. – 2008. – Vol. 5. – P. 543–569.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

А. Н. ГОРОБЧЕНКО<sup>1\*</sup>, А. О. АНТОНОВИЧ<sup>2</sup><sup>1\*</sup>Каф. «Експлуатація і ремонт подвижного складу», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (050) 972 04 71, ел. пошта superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852<sup>2</sup>Каф. «Експлуатація і ремонт подвижного складу», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (093) 025 64 00, ел. пошта artem\_antonovich@mail.ru, ORCID 0000-0002-4920-6849**ФОРМАЛИЗАЦІЯ ПАРАМЕТРА НАПРЯЖЕННОСТІ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТІ МАШИНИСТА ЛОКОМОТИВА  
НА ОСНОВЕ ЕРГОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

**Цель.** Ключевым фактором, влияющим на безопасность движения и качество работы эргатической системы «поезд-машинист», является напряженность работы локомотивной бригады. Цель работы – формализация показателя напряженности деятельности машиниста локомотива. **Методика.** Одной из характеристик напряженности работы машиниста является разница между временем, отведенным на выполнение задания, и необходимым временем (внешний резерв или дефицит времени). Определены множества существенных и несущественных операций при управлении локомотивом в различных поездных ситуациях. Используя методы нечеткой логики, понятие «существенность операции управления локомотивом» представлено в виде набора лингвистических переменных. Для определения функции принадлежности элементов множества «существенность операции управления локомотивом» использован метод экспертных оценок. Коэффициент временной напряженности представлен в виде нечеткого числа L-R-типа. **Результаты.** Установлена величина относительного количества операций управления локомотивом согласно распределению по параметру «существенность операции». Для определения наиболее напряженного режима работы машиниста проведено ранжирование режимов движения по параметру относительного количества существенных операций управления. Наиболее тяжелыми режимами являются «помеха спереди», «движение в неблагоприятных погодных условиях» и «отправление со станции на перегон». **Научная новизна.** Введение величины «условная существенность выполнения операции» позволило более качественно описать условия ведения поезда. В работе впервые представлено определение напряженности работы машиниста локомотива в виде унимодального нечеткого числа, что позволит в дальнейшем использовать методы теории искусственного интеллекта для моделирования деятельности машиниста локомотива и разработки интеллектуальных систем управления. **Практическая значимость.** Получена возможность непосредственно учесть такой важный качественный показатель, как «напряженность работы машиниста» в системах автоведения и контроля безопасности движения. Ранжирование поездных ситуаций и управляющих операций позволяет обосновать порядок выполнения управляющих действий при совершенствовании алгоритмов работы систем ведения поездов.

**Ключевые слова:** эргатическая система; напряженность работы оператора; машинист локомотива; безопасность движения

О. М. HOROVCHENKO<sup>1\*</sup>, А. О. ANTONOVYCH<sup>2</sup><sup>1\*</sup>Dep. «Maintenance and Repair of Rolling Stock», Ukraine State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (050) 972 04 71, e-mail superteacher@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9868-3852<sup>2</sup>Dep. «Maintenance and Repair of Rolling Stock», Ukraine State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (093) 025 64 00, e-mail artem\_antonovich@mail.ru, ORCID 0000-0002-4920-6849**FORMALIZATION OF LOCOMOTIVE DRIVER ACTIVITY TENSION  
INDICATOR BASED ON THE ERGONOMIC MODEL**

**Purpose.** A key factor contributing to the safety and quality of ergatic system "train-driver" is the intensity of the locomotive crew's work. The aim of this work is formalization of locomotive driver activity tension indicator. **Methodology.** One of the characteristics of driver activity tension is the difference between the time allotted to complete the task, and the necessary (external reserve or deficiency time). The sets of major and minor operations in the management of the train locomotive in different train situations were identified. Using the methods of fuzzy logic, the concept of "materiality of the operation of the locomotive control" is presented in the form of a set of linguistic vari-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ables. To determine the function membership of the elements of the set "the importance of the operation of the locomotive control" the method of expert evaluations was used. Coefficient of temporary tension is presented in the form of fuzzy number L-R-type. **Findings.** It was found the value of the relative number of operations of locomotive control according to the distribution using the parameter of operation "importance". To determine the most tensioned mode of the driver ranking the traffic condition according to the parameter of relative amounts of the important management operations was conducted. The most difficult modes are the "front hindrance", "movement in unfavorable weather conditions" and "departure from the station to the running line". **Originality.** The introduction of the value "conventional importance of the operation" allowed us to more accurately describe the terms of train driving. For the first time the work presents determination of tension of the driver's work in the form of a unimodal fuzzy number, which will make it possible to use the methods of the theory of artificial intelligence to simulate activity of the locomotive driver and develop intelligent control systems. **Practical value.** There were obtained the opportunity to consider such an important quality indicator, as "the tension of the driver's work" in systems of automatic train control and traffic safety. Ranking the onboard situations and control operations enables us to justify the order of management action for the improvement of the algorithms of system operation of train driving.

**Keywords:** ergatic system; intensity of the operator; locomotive engineer; traffic safety

## REFERENCES

1. Horbakha, M., Koskovetskiy, V., Mikov, D., Sulytska, I., Salamatnikova, D., & Tyshchenko, O. (2015). *Analiz stanu bezpeky rukhu, polotiv, sudnoplavstva ta avariinosti na transporti v Ukraini za 2014 rik*. Kyiv, Ministry of Infrastructure of Ukraine.
2. Gorobchenko, O. M. (2014). Methodology for determining the value of complexity parameter for emergency situation during driving of the train. *Science and Transport Progress*, 6(54), 50-58, doi: 10.15802/stp2014/33077
3. Druzhinin, G. V. (2000). *Uchet svoystv cheloveka v modelyakh tekhnologiy*. Moscow: Nauka, Interperiodica.
4. Kamenyev, O. Y. (2013). Problematics of approaches to research of the use safety of ergatic control systems on railway transport. *Science and Transport Progress*, 2(44), 7-16. doi: 10.15802/stp2013/12249
5. Munipov, V. M., & Zinchenko, V. P. (2001). *Ergonomika: chelovekoorientirovannoye proyektirovaniye tekhniki, programnykh sredstv i sredy*. Moscow: Logos.
6. Rutkovskaya, D., Pilinskiy, M., & Rutkovskiy, L. (2006). *Neyronnyye seti, geneticheskiye algoritmy i nechetkiye sistemy* (I. D. Rudinskiy, Trans.). Moscow: Hot line-Telecom.
7. Munipov, V. M. (Ed.). (1983). *Ergonomika: printsipy i rekomendatsii* (2nd ed.). Moscow: All-Union scientific research Institute of technical aesthetics.
8. Alstom: *Alstom to supply automatic train control system to Santiago de Chile metro's line 1*. (2012, January 20). Retrieved from <http://www.alstom.com/press-centre/2010/1/Alstom-to-supply-automatic-train-control-system-to-Santiago-de-Chile-metros-line-1-20100120>
9. Bombardier: *CITYFLO 650: A new generation for automated driverless transit systems*. (n.d.). Retrieved from <http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-control-solutions/mass-transit-solutions/cityflo-650.html>
10. Fomin, O. (2014). Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars. *Metallurgical and Mining Industry*, 5, 31-43.
11. Hettiarachchi, C., Do, H., & Choi, B. (2016). Risk-based test case prioritization using a fuzzy expert system. *Information and Software Technology*, 69, 1-15. doi: 10.1016/j.infsof.2015.08.008
12. Eurostat. *Statistics Explained: Railway safety statistics*. (2015). Retrieved from [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Railwaysafety\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Railwaysafety_statistics)
13. Vdovina, T., & Minkoff, S. E. (2008). An a priori error analysis of operator upscaling for the acoustic wave equation. *International Journal of Numerical Analysis and Modeling*, 5(4), 543-569.

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

Надійшла до редколегії: 10.10.2016

Прийнята до друку: 12.01.2017

## УДК 629.46.027.2:629.488

Л. А. МУРАДЯН<sup>1\*</sup>, Д. О. ПОДОСЬОНОВ<sup>2\*</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. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580<sup>2\*</sup>Регіональна філія «Придніпровська залізниця», пр-т Дмитра Яворницького, 108, Дніпро, Україна, 49038, ел. пошта d.a.podosenov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7058-5230**ПІДВИЩЕННЯ МІЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСУ ВІЗКІВ  
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ.  
МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРІЇ ЗНОСУ ПІДП'ЯТНИКА**

**Мета.** У науковій роботі необхідно: 1) проаналізувати технічний стан вантажних вагонів та технологічні методи, що застосовуються при ремонті; 2) встановити можливі шляхи для підвищення ресурсу візків вантажних вагонів; 3) розробити математичну модель для описання геометрії зносу вихідної поверхні підп'ятника надресорної балки візка на відповідному життєвому циклі вантажного вагона. **Методика.** Для вирішення комплексної задачі підвищення міжремонтного ресурсу візків вантажних вагонів було використано методи синтезу, аналізу та системного підходу. Крім того, використовується апарат математичного моделювання, фізики твердого тіла, теорії тертя та зношення твердих тіл. **Результати.** Проведений аналіз технічного стану вантажних вагонів показав, що до 15 % несправностей припадає на візки. Окремим елементом візка, що ремонтується, є надресорна балка. При цьому найчастіше відновлюється підп'ятник. Знос підп'ятника відбувається нерівномірно, а технологічні методи, що застосовуються при ремонті, не дозволяють забезпечити рівномірний знос, через що виникає необхідність у передчасному ремонті. Одним із способів підвищення ресурсу підп'ятника під час ремонту є застосування наплавлення чи напилювання, але із забезпеченням дискретної міцності та зносостійкості у поздовжньому та поперечному напрямках відповідно до осі вагона. Для встановлення меж розподілення відновлюваного матеріалу по діаметру підп'ятника було розглянуто втомний процес зносу під час взаємодії з п'ятником та описано геометрію поверхні зносу підп'ятника. **Наукова новизна.** У роботі було проаналізовано технічний стан візків вантажних вагонів за критерієм зносу. Показано, що динаміка несправностей візків має позитивний характер. Крім того, значне місце серед деталей, що ремонтуються, займає надресорна балка, особливим і навантаженим місцем якої є підп'ятник. Для описання геометрії зносу вперше запропоновано математичну модель визначення вихідної поверхні підп'ятника на відповідному життєвому циклі візка вантажного вагона. **Практична значимість.** Результати роботи дозволяють установити геометрію поверхні зносу підп'ятника надресорної балки візка при взаємодії з п'ятником вантажного вагона з позиції протікання втомного зносу, тобто, за критерієм міцності.

**Ключові слова:** вантажні вагони; візки; міжремонтний пробіг; геометрія зносу; надресорна балка; технологічні методи

**Вступ**

Залізничний транспорт у всьому світі займає значну частину ринку послуг, які пов'язані з організацією та забезпеченням перевізного процесу [4–6, 8–11]. Головним завданням залізниць є підвищення рівня безпеки руху поїздів, на яку впливають надійність і безвідмовність рухомого складу, ліній електропередач та зв'язку, пристроїв блокування, стан і профіль колії.

На безпеку руху поїздів та техніко-економічні показники перевізної роботи у ПАТ

«Українська залізниця» значною мірою впливає технічний стан вантажного вагонного господарства [4, 7, 8]. Для підвищення техніко-економічних показників останнім часом розглядається можливість збільшення міжремонтних пробігів вантажних вагонів без зниження рівня безпеки руху поїздів. Досягнення такої мети можливе на основі використання двох підходів. Перший – пов'язаний з розробкою нових зразків вантажного рухомого складу зі збільшеним міжремонтним пробігом та виготовленням нових окремих елементів для вагонів, що експлуатуються, наприклад, візків та коліс-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

них пар з підвищеними фізико-механічними та триботехнічними властивостями. Другий – пов’язаний із застосуванням нових, більш ефективних, технологій ремонту вантажних вагонів, що забезпечують необхідне підвищення міцнісних та зносостійких властивостей існуючих експлуатованих зразків для збільшення їх міжремонтного пробігу.

Перший варіант, дійсно, є найнеобхіднішим, оскільки більше 80 % експлуатованого вантажного рухомого складу є морально зношеним. Але, враховуючи наявні фінансові ресурси, ПАТ «Українська залізниця» не має можливості одночасно замінити декілька тисяч зразків вагонної техніки, що експлуатується і якій продовжено термін служби, оскільки для цього необхідно залучати валютні кредити та лізингові кон’юктури.

На цей час, з урахуванням економічного стану України, другий напрям є найбільш прийнятним, оскільки не потребує залучення значних фінансових вкладень для ПАТ «Українська залізниця».

На основі звітів ПАТ «Укрзалізниця» про стан безпеки руху на залізницях України було виконано аналіз несправностей вантажних вагонів, що призвели до транспортних подій у 2013–2015 рр. Слід зазначити, що несправності візків вантажних вагонів мають позитивну динаміку – від 7 % у 2013 році до 15 % у 2015 році від загальної кількості відмов вагонів. У 2014 р. відбулось збільшення на 10 %, а в 2015 р. – на 45,5 % порівняно з попереднім роком [4, 7].

Крім того, більше 80 % візків вантажних вагонів є морально та фізично зношеними, що з кожним подальшим роком експлуатації буде призводити до накопичення дефектів в металі з утворенням тріщин через зниження втомлюваної міцності, а також призводити до раптових відмов вагонів [4–6, 8–14].

В цей час експлуатація вагонного парку відбувається в умовах підвищеного використання вантажопідйомності вагона і високих швидкостей руху. В результаті навіть при русі на прямолінійних ділянках – сила інерції досягає значень, що достатні для відриву п’ятників від поверхні підп’ятника [4].

При обстеженнях надресорних балок встановлено [4, 6], що глибина зносів опорних по-

верхонь підп’ятників, упорних поверхонь зовнішніх і внутрішніх бортів різко зросла. Зазначене відбувається при підвищенні інтенсивності переміщень п’ятників відносно підп’ятників. Додатковий вплив відбувається при кромочному обпиранні п’ятників на підп’ятники і наступний їх відносний поворот під час проходження кривих, що в результаті призводить до максимальної глибини зносу опорної поверхні підп’ятників, інтенсивність такого зносу може складати до 1 мм в рік.

В експлуатації вантажних вагонів відбувається нерівномірний знос підп’ятника, що пов’язаний з інтенсивністю проходження вагонів по кривих колії малого радіуса [4, 8]. При цьому відбувається нерівномірне збільшення навантажень у візку вантажного вагона (розвантаження одного буксового вузла, надмірне збільшення навантаження на протилежний буксових вузол тощо).

### Мета

Проаналізувати технічний стан вантажних вагонів та технологічні методи, що застосовуються під час ремонту. Встановити можливі шляхи для підвищення ресурсу візків вантажних вагонів. Розробити математичну модель для описання геометрії зносу вихідної поверхні підп’ятника надресорної балки візка на відповідному життєвому циклі вантажного вагона.

### Методика

Ресурс підп’ятника можна підвищити за рахунок застосування сталей з поліпшеними механічними властивостями. Аналіз умов роботи і результатів експлуатації надресорних балок візків вантажних вагонів з низьколегованих сталей марок 20ГЛ, 20ФЛ і 20ГФЛ, що відносять до ферито-перлітного класу, показав [4, 8], що ці деталі при роботі в умовах сухого тертя і наявності високих контактних і ударних навантажень мають низьку зносостійкість при інтенсивності зносу робочих поверхонь 1,2–2,0 мм на 100 тис. км пробігу.

Застосування на залізничному транспорті маловуглецевих і низьколегованих зварювальних матеріалів забезпечує міжремонтний пробіг відремонтованих деталей усього в 160 тис. км, що відповідає 2 рокам експлуатації [4, 8]. Де-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

таль за весь термін служби піддається ремонту наплавленням до 10 разів. При щорічній потребі в ремонті вантажних вагонів в 100 тис. одиниць витрати залізничного транспорту на відновлення литих деталей вантажних вагонів обчислюється мільярдами гривень. Зменшити знос робочих поверхонь литих деталей вагонів намагалися в останні 10–15 років за рахунок застосування різних способів поверхневого зміцнення і установки прокладок зі зносостійкої сталі [4, 8]. Досвід застосування об'ємно-поверхневого гартування, електро-імпульсної обробки, індукційного, плазово-порошкового, дугового наплавлення високолегованим дротом ферито-мартенситного класу литих деталей вагонів і встановленням на них зносостійких елементів зі сталі 30ХГСА показав [4, 8], що на сьогодні не існує універсального, ефективного і надійного захисту від зносу при терті. Наявність ударних навантажень в зоні контакту деталей надресорної балки не дозволило застосувати матеріали високої твердості, яким властива підвищена крихкість.

У випадку збільшення міжремонтного пробігу експлуатованих вантажних вагонів виникає необхідність у підвищенні фізико-механічних та триботехнічних властивостей основних деталей візка, таких як: надресорна балка і бічні рами. Слід зазначити, що при відчепленні вантажних вагонів в поточний ремонт – понад 20 % таких відчеплень пов'язані з наднормативною величиною зносу взаємодіючих поверхонь тертя, що в 1,2–1,5 разу перевищує гранично допустимі значення [4]. Після виконаного ремонту у понад 15 % вантажних вагонів не забезпечується регламентований нормативний пробіг в 120 тис. км. Під час ремонту вантажних вагонів понад 80% складових деталей відновлюються технологічними методами [1, 4, 8]: наплавленням або напилюванням і, у разі потреби, в комплексі з механічною обробкою. При використанні цих технологічних методів для ремонту деталей візка не забезпечується величина нормативно встановленого міжремонтного пробігу, а значення ресурсу складає 65–75 % від ресурсу нових зразків.

Низька якість застосовуваних технологічних методів відновлення всіх, а особливо навантажених, деталей візка вантажного вагона є головною причиною підвищеної інтенсивності їх

зносу [4, 8, 14], що, в свою чергу, через можливу втрату працездатного стану деталей візка призводить до зниження безпеки руху поїздів та збільшення фінансових витрат, необхідних для виконання позапланових ремонтів візків.

Завдання, що полягає у забезпеченні нормативно встановленого міжремонтного пробігу вантажного вагона з використанням технологічних методів підвищення фізико-механічних та триботехнічних властивостей складових деталей візка є актуальним, вирішення якого повинно ґрунтуватись на застосуванні сучасних, більш ефективних, методах забезпечення необхідного рівня зносостійкості і міцності відновлених деталей візка вантажного вагона.

Під час експлуатаційних досліджень підп'ятників вимірювались діаметри: за подовжнім напрямком щодо вагона – діаметр  $D_x$  та поперечним напрямком – діаметр  $D_y$  (рис. 1).

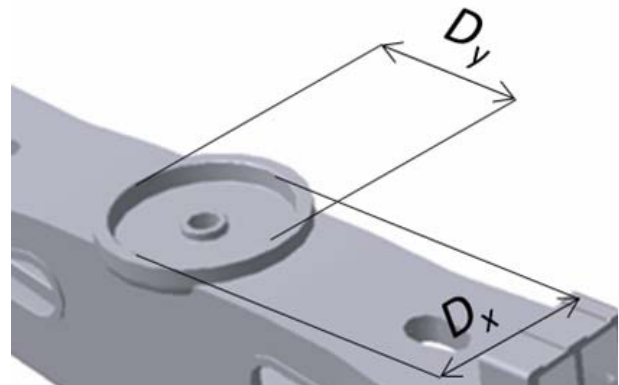


Рис. 1. Місця виміру діаметрів підп'ятника

Fig. 1. Places of measuring the center pad diameters

### Результати

Виконаний аналіз експлуатаційних зносів п'ятників і підп'ятників показав, що за подовжнім напрямком щодо вагона, діаметри  $D_x$  як підп'ятника, так і п'ятника змінюються інтенсивніше, ніж  $D_y$ , тобто в поперечному напрямку вагона (відбувається овалізація). Оскільки  $D_x > D_y$ , то необхідність ремонту деталей п'ятникових вузлів буде визначатись зносом діаметрів  $D_x$ .

Основні результати зносів п'ятникових вузлів та прогнози пробіги вантажних вагонів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

## Узагальнені дані про зноси п'ятникових вузлів

Table 1

## Summary data on wear of center plate arrangements

Величини	Середня інтенсивність зносу, мм/10 <sup>4</sup> км	Вимірювання після 137,7 тис. км, мм	Нормативні граничні значення, мм	Прогнозні пробіги, тис. км	
				За статистично максимальним / мінімальним значенням	За математичним очікуванням
Діаметр підп'ятника	0,308	305,4	308	170	240
Діаметр п'ятника	0,076	298	294	252	745

З даних таблиці випливає, що знос підп'ятника відбувається значно інтенсивніше, ніж знос п'ятників. Це підтверджується і результатами вимірів після пробігу вагонів понад 137,7 тис. км. Найбільший вимірний діаметр підп'ятника становив 305,4 мм, тобто величина зносу дорівнює 5,4 мм, або 1,8 %, тоді як найменший вимірний діаметр п'ятників склав 298 мм, тобто знос становить 2 мм, або 0,67 %.

Прогнозні експлуатаційні пробіги, що передбачають появу перших ознак граничного зносу мають такі значення:

- за підп'ятниками – 170 тис. км;
- за п'ятниками – 252 тис. км.

Математичне очікування граничного значення діаметрів підп'ятників спостерігається при пробігу в 240 тис. км, тоді як за діаметром п'ятників – при пробігу в 745 тис. км.

Порівняно з старотиповими візками мод. 18-100, інтенсивність зносу підп'ятників нижче вдвічі. Проте, зносостійкість підп'ятників варто підвищувати, щоб гарантовано забезпечити ресурс в 300 тис. км – до першого деповського ремонту.

Одним із способів підвищення ресурсу підп'ятників під час ремонту є застосування наплавлення чи напилування, але із забезпеченням дискретної міцності та зносостійкості у поздовжньому та поперечному напрямках відповідно до осі вагона. При цьому, поверхня в напрямку діаметра  $D_x$  підп'ятника повинна відновлюватись більш міцним та зносостійким матеріалом, а поверхня в напрямку діаметра  $D_y$ , – менш міцним.

Для встановлення меж розподілення відновлюваного матеріалу на діаметрі підп'ятника необхідно розглянути втомний процес зносу під час взаємодії з п'ятником і описати геометрію поверхні зносу підп'ятника.

Розглянемо зміну форми перерізу підп'ятника з математичної точки зору, врахувавши напружено-деформований стан робочої поверхні [1–3]. Для цього спрямуємо вісь ОХ вздовж вантажного вагона, а ОУ і ОZ – у взаємно-перпендикулярних напрямках перерізу вагона (рис. 2).

Тоді координати точок поверхні підп'ятника відповідно до рис. 2 визначимо за виразами:

$$x = f(y, z, c_1) \pm \sqrt{B(y, z, c_1)}; \quad (1)$$

$$y = f(x, z, c_2) \pm \sqrt{B(x, z, c_2)}; \quad (2)$$

$$z = f(x, y, c_3) \pm \sqrt{B(x, y, c_3)}; \quad (3)$$

де  $f(y, z, c_1)$ ,  $f(x, z, c_2)$ ,  $f(x, y, c_3)$  – функції, що характеризують деформацію стиску в перерізах XOY, XOZ, YOZ підп'ятника, що відбуваються в процесі експлуатації;  $c_1, c_2, c_3$  – константи форми поверхні;  $\pm\sqrt{B(y, z, c_1)}$ ,  $\pm\sqrt{B(x, z, c_2)}$ ,  $\pm\sqrt{B(x, y, c_3)}$  – девіаторні частини тензора деформацій, що відповідають за поверхневу зміну підп'ятника, а під коренем розміщені функції переміщення точок п'ятника відносно підп'ятника у відповідних напрямках руху.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

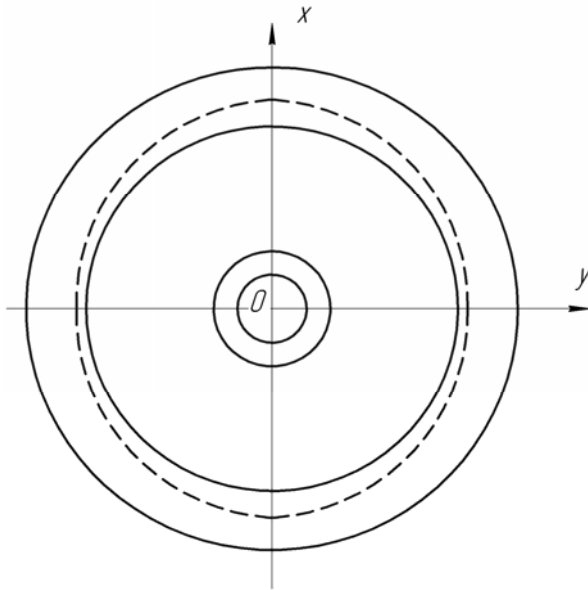


Рис. 2. Зміна форми підп'ятника

Fig. 2. Reshape of center pad

Слід відмітити про відсутність фактора часу в рівняннях (1–3), тобто за допомогою цих рівнянь можна описати траєкторію руху точок поверхні підп'ятника. Для визначення зміщення точок з опорної поверхні на зношену поверхню необхідно розкласти ці рівняння в ряд Тейлора і обмежитись похідними першого порядку, оскільки вищий порядок не буде здійснювати суттєвого впливу на напружено-деформований стан підп'ятника.

Деформацію матеріалу підп'ятника у відповідній точці можна визначити подовженням або стискуванням лінійного навантаженого елемента поверхні, що проходить через цю точку. Координати такого навантаженого елемента по відношенню до відповідної точки будуть дорівнювати [2, 3]:

$$dx = \rho l; \quad dy = \rho m; \quad dz = \rho n, \quad (4)$$

де  $\rho$  – радіус навантаженого елемента;  $l, m, n$  – спрямовуючі косинуси, що відображують умови навантаження тертям.

Визначити зміщення  $u_x, u_y, u_z$  навантаженого елемента в процесі руху вздовж осей OX, OY, OZ під час деформації можна на основі таких виразів:

$$u_x = \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}} = \frac{\partial A}{\partial y} \rho m + \frac{\partial A}{\partial z} \rho n + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}}; \quad (5)$$

$$u_y = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \rho l + \frac{\partial A}{\partial z} \rho n + \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}}; \quad (6)$$

$$u_z = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \rho l + \frac{\partial A}{\partial y} \rho m + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}}. \quad (7)$$

В процесі тертя та зношування радіус навантаженого елемента підп'ятника буде змінюватись відповідно до виразу:

$$\rho_1 = \rho \left( 1 + l^2 \frac{\partial u_x}{\partial x} + m^2 \frac{\partial u_y}{\partial y} + n^2 \frac{\partial u_z}{\partial z} + lm \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + nl \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + mn \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right). \quad (8)$$

Відносна деформація навантаженого елемента підп'ятника при терті для відповідних осей становить [1–3]:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \varepsilon_{xx}; \quad \frac{\partial u_y}{\partial y} = \varepsilon_{yy}; \quad \frac{\partial u_z}{\partial z} = \varepsilon_{zz}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} = \varepsilon_{xy}; \quad \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} = \varepsilon_{xz};$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} = \varepsilon_{yz}. \quad (10)$$

Відповідно до закону Гука [2], тензори деформацій і напружень можна подати для заг-



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

льного випадку в такому вигляді:

$$\begin{cases} \sigma_x = \lambda\Theta + 2\mu\epsilon_x; \\ \sigma_y = \lambda\Theta + 2\mu\epsilon_y; \\ \sigma_z = \lambda\Theta + 2\mu\epsilon_z; \\ \tau_{yz} = \mu\gamma_{yz}; \\ \tau_{zx} = \mu\gamma_{zx}; \\ \tau_{xy} = \mu\gamma_{xy}, \end{cases} \quad (11)$$

де  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – нормальні напруження навантаженого елемента підп'ятника вздовж осей координат;  $\lambda$ ,  $\mu$  – пружні сталі Ламе навантаженого елемента підп'ятника;

$$\Theta = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z};$$

$\tau_{xy}$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz}$  – дотичні напруження;

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x},$$

$$\gamma_{yx} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}.$$

Якщо останню систему рівнянь (11) підставити у рівняння рівноваги, то отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + y = 0. \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + z = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Після перетворень і спрощень, система рівнянь (12) набуде вигляду:

$$\begin{cases} (\lambda + \mu) \left( \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \mu \nabla^2 u_x + x = 0 \\ (\lambda + \mu) \left( \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right) + \mu \nabla^2 u_y + y = 0 \\ (\lambda + \mu) \left( \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 u_z + z = 0, \end{cases} \quad (13)$$

де  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа.

Розв'язуючи систему диференціальних рівнянь (13) для відповідних початкових умов з врахуванням опорного стану підп'ятника можна визначити значення зміщень  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  з використанням виразів (5–7), а після – визначити геометрію поверхні підп'ятника (вирази (1–3)) на відповідному життєвому циклі вантажного вагона.

### Наукова новизна та практична значимість

У роботі було проаналізовано технічний стан візків вантажних вагонів за критерієм зносу. Показано, що динаміка несправностей візків має позитивний характер. Крім того, значне місце серед ремонтуються деталей займає надресорна балка, особливим і навантаженим місцем якої є підп'ятник. Для описання геометрії зносу вперше запропоновано математичну модель для визначення вихідної поверхні підп'ятника на відповідному життєвому циклі візка вантажного вагона.

Результати роботи дозволяють установити геометрію поверхні зносу підп'ятника надресорної балки візка при взаємодії з п'ятником вантажного вагона з позиції протікання втомного зносу, тобто за критерієм міцності.

### Висновки

Виконаний аналіз технічного стану вантажних вагонів показав, що до 15 % несправностей припадає на візки. Окремим елементом візка, що ремонтується, є надресорна балка. При цьому найчастіше відновлюється підп'ятник. Знос підп'ятника відбувається нерівномірно, а технологічні методи, що застосовуються під час ремонту, не дозволяють забезпечити рівномірний знос, через що виникає необхідність у передчасному ремонті. Одним із способів підвищення ресурсу підп'ятників під час ремонту є застосування наплавлення чи напилювання, але із забезпеченням дискретної міцності та зносостійкості у поздовжньому та поперечному напрямках відповідно до осі вагона. Для встановлення меж розподілення відновлюваного матеріалу по діаметру підп'ятника було розглянуто втомний процес зносу під час взаємодії з п'ятником і описано геометрію поверхні зносу підп'ятника. При цьому було запропоновано

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

математичну модель для визначення вихідної життєвому циклі візка вантажного вагона.  
геометрії поверхні підп'ятника на відповідному

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барановський, Д. М. Визначення залишкового ресурсу трибосистем / Д. М. Барановський // Проблеми трибології. – 2009. – № 4. – С. 127–129.
2. Дяченко, С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів : навч. посіб. / С. С. Дяченко. – Харків : Вид-во ХНАДУ, 2003. – 226 с.
3. Иванова, В. С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов / В. С. Иванова. – Москва : Наука, 1992. – 160 с.
4. Мурадян, Л. А. Повышение надежности грузовых вагонов с применением новых технологий изготовления и восстановления рабочих поверхностей / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник, Д. О. Подосенов // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 11. – С. 49–54.
5. Мямлін, С. В. Крышка люка универсального полувагона / С. В. Мямлін, Д. Н. Барановский, И. Ю. Кебал // Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ. – 2015. – № 2 (7). – С. 45–48.
6. Мямлін, С. В. Працездатність, ефективність експлуатації та довговічність дизелів спеціального самохідного рухомого складу залізниць / С. В. Мямлін, Д. М. Барановський. – Дніпропетровськ : Маковецький, 2011. – 267 с.
7. Мямлін, С. В. Розробка конструкцій та машинобудівних технологій створення вантажних вагонів нового покоління // Вагонний парк. – 2014. – № 10. – С. 4–9.
8. Эксплуатационные испытания полувагонов нового поколения / О. М. Савчук, В. К. Бруякин, Л. А. Мурадян [и др.] // Вагонний парк. – 2009. – № 7-8. – С. 8–11.
9. Damage calculation and fatigue life prediction for freight car body / F. Zhao, J. Xie, Y. Yuan, X. Shi // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 652–654. – P. 1357–1361. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.652-654.1357.
10. Experimental Investigations on Operational Reliability of Diesel Locomotives Engines / L. P. Lingaitis, S. Mjamlin, D. Baranovsky, V. Jastremskas // Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. – 2012. – Vol. 14, № 1. – P. 5–10.
11. Myamlin, S. V. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies / S. V. Myamlin, V. M. Bubnov, Ye. O. Pysmennyi // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 126–137. doi: 10.15802/stp2014/30789.
12. Myamlin, S. V. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing / S. V. Myamlin, D. M. Baranovskiy // Проблеми економіки транспорту : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 7. – С. 61–66.
13. Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines / L. P. Lingaitis, S. Mjamlin, D. Baranovsky, V. Jastremskas // Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability. – 2012. – Vol. 14, № 2. – P. 154–159.
14. Zhao, F. Influence of small stress cycles on the fatigue damage of C70E car body / F. Zhao, J. Xie // J. of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 50. – Iss. 10. – P. 121–126. doi: 10.3901/jme.2014.10.121.

Л. А. МУРАДЯН<sup>1\*</sup>, Д. А. ПОДОСЕНОВ<sup>2\*</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. +38 (056) 373 15 19, эл. почта leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

<sup>2\*</sup>Региональный филиал «Приднепровская железная дорога», пр-т Дмитрия Яворницкого, 108, Днипро, Украина, 49038, эл. почта d.a.podosenov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7058-5230

## ПОВЫШЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСА ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ. МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРИИ ИЗНОСА ПОДПЯТНИКА

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Цель.** В научной работе необходимо: 1) проанализировать техническое состояние грузовых вагонов и технологические методы, применяемые при ремонте; 2) установить возможные пути для повышения ресурса тележек грузовых вагонов; 3) разработать математическую модель для описания геометрии износа исходной поверхности подпятника надрессорной балки тележки на соответствующем жизненном цикле грузового вагона. **Методика.** Для решения комплексной задачи повышения межремонтного ресурса тележек грузовых вагонов были использованы методы синтеза, анализа и системного подхода. Кроме того, используется аппарат математического моделирования, физики твердого тела, теории трения и износа твердых тел. **Результаты.** Проведенный анализ технического состояния грузовых вагонов показал, что до 15 % неисправностей приходится на тележки. Отдельным элементом ремонтируемой тележки является надрессорная балка. При этом чаще всего восстанавливается подпятник. Износ подпятника происходит неравномерно, а технологические методы, применяемые при ремонте, не позволяют обеспечить равномерный износ, из-за чего возникает необходимость в преждевременном ремонте. Одним из способов повышения ресурса подпятника при ремонте является применение наплавки или напыления, но с обеспечением дискретной прочности и износостойкости в продольном и поперечном направлениях соответственно оси вагона. Для установления границ распределения возобновляемого материала по диаметру подпятника были рассмотрены усталостный процесс износа при взаимодействии с пятником и описано геометрию поверхности износа подпятника. **Научная новизна.** В работе было проанализировано техническое состояние тележек грузовых вагонов по критерию износа. Показано, что динамика неисправностей тележек имеет положительный характер. Кроме того, значительное место среди ремонтируемых деталей занимает надрессорная балка, особенным и нагруженным местом которой является подпятник. Для описания геометрии износа впервые предложена математическая модель определения исходной поверхности подпятника на соответствующем жизненном цикле тележки грузового вагона. **Практическая значимость.** Результаты работы позволяют установить геометрию поверхности износа подпятника надрессорной балки тележки при взаимодействии с пятником грузового вагона с позиции протекания усталостного износа, то есть, по критерию прочности.

**Ключевые слова:** грузовые вагоны; тележки; межремонтный пробег; геометрия износа; надрессорная балка; технологические методы

L. A. MURADIAN<sup>1\*</sup>, D. O. PODOSONOV<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Cars and Rolling Stock», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

<sup>2\*</sup>The Regional Branch «Prydniprovsk Railway», Dmytro Yavornytskyi Av., 108, Dnipro, Ukraine, 49038, e-mail d.a.podosonov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7058-5230

## IMPROVING TBO OF FREIGHT CAR BOGIES. GEOMETRY MODEL OF CENTER PAD WEAR

**Purpose.** The scientific work is aimed to: 1) analyze the technical condition of freight cars and technological methods used in the repair; 2) identify possible ways to improve resource of freight car bogies; 3) develop a mathematical model to describe the wear geometry of the original surface of bogie center pad at the corresponding life cycle of a freight car. **Methodology.** In order to solve the problem complex of increasing TBO of freight car bogies the methods for the synthesis, analysis and systematic approach were used. In addition, the use of mathematical modeling unit, solid state physics, the theory of friction and wear of solids. **Findings.** The analysis of the technical condition of freight cars has shown that up to 15% of the faults falls on the bogies. A separate element of the repaired bogie is a bolster. At this the center pad is recovered most often. The center pad wear is uneven and the technological methods used for the repair, do not allow providing uniform wear due to which there is a need in premature repairs. One of the ways to improve the center pad resource during repair is the application of welding or sputtering deposition, but with providing discrete strength and durability in the longitudinal and transverse directions of the car axis, respectively. In order to establish the boundaries of the distribution of renewable material along the center pad diameter it was considered the fatigue wear process in cooperation with center plate and described the geometry of the surface of the center pad wear. **Originality.** Technical condition of freight car bogies according to wear criterion was analyzed in the paper. It is shown that the dynamics of bogie faults has a positive character. In addition, a significant place among the repaired parts takes the bolster, and a special loaded place is the center pad. To describe the geometry of wear for the first time a mathematical model for determining the initial surface of the

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

center pad in the relevant life cycle of freight car bogie was proposed. **Practical value.** The results allow us to establish the geometry of the wear surface bolster center pad when interacting with center plate of freight car from a position of occurrence of fatigue wear, that is, on the strength criterion.

**Keywords:** freight cars; bogies; TBO; wear geometry; bolster; technological methods

## REFERENCES

1. Baranovskyi, D. M. (2009). Vyznachennia zalyshkovoho resursu trybosystem. *Problems of Tribology*, 4, 127-129.
2. Diachenko, S. S. (2003). *Fizychni osnovy mitsnosti ta plastychnosti metaliv*. Kharkiv: KhNAHU Press.
3. Ivanova, V. S. (1992). *Sinergetika. Prochnost i razrusheniye metallicheskih materialov*. Moscow: Nauka.
4. Muradian, L. A., Shaposhnyk, V. Y., & Podosonov, D. O. (2016). Improving the reliability of freight wagons with the use of new manufacturing technologies and regeneration of working surfaces. *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, 11, 49-54.
5. Myamlin, S. V., Baranovskyi, D. M., & Kebal, I. Y. (2015). Manhole Cover of Universal Gondola Car. *Bulletin of Scientific Works of Bryansk Branch of MIIT*, 2(7), 45-48.
6. Myamlin, S. V. (2014). Rozrobka konstrukttsii ta mashynobudivnykh tekhnolohii stvorennia vantazhnykh vahoniv novoho pokolinnia. *Car Fleet*, 10, 4-9.
7. Myamlin, S. V., & Baranovskyi, D. M. (2011). *Pratsezdatsnist, efektyvnist ekspluatatsii ta dovhovichnist dyzeliv spetsialnoho samokhidnoho rukhomoho skladu zaliznyts*. Dnipropetrovsk: Makovetskyi.
8. Savchuk, O. M., Bruyakin, V. K., Muradyan, L. A., Mishchenko, A. A., Korobka, B. A., & Mozheyko, Y. R. (2009). Ekspluatatsionnyye ispytaniya poluvagonov novogo pokoleniya. *Car Fleet*, 7-8, 8-11.
9. Zhao, F. W., Xie, J. L., Yuan, Y. Q., & Shi, X. L. (2013). Damage calculation and fatigue life prediction for freight car body. *Advanced Materials Research*, 652-654, 1357-1361. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.1357.
10. Lingaitis, L. P., Myamlin, S. V., Baranovskyi, D. M., & Jastremskas, V. (2012). Experimental Investigations on Operational Reliability of Diesel Locomotives Engines. *Maintenance and Reliability*, 14(1), 5-10.
11. Myamlin, S. V., Bubnov, V. M., & Pysmennyi, Y. O. (2014). Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies. *Science and Transport Progress*, 5(53), 126-137. doi: 10.15802/stp2014/30789
12. Myamlin, S. V., & Baranovskyi, D. M. (2014). The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing. *The Problems of the Transport Economics: Proc. of the National University named after Academician V. Lazaryan*, 7, 61-66.
13. Lingaitis, L. P., Myamlin, S. V., Baranovskyi, D. M., & Jastremskas, V. (2012). Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines. *Maintenance and Reliability*, 14(2), 154-159.
14. Zhao, F., & Xie, J. (2014). Influence of small stress cycles on the fatigue damage of C70E car body. *Journal of Mechanical Engineering*, 50(10), 121-126. doi: 10.3901/jme.2014.10.121

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна);  
д.т.н., проф. І. Е. Мартиновим (Україна)

Надійшла до редколегії: 10.10.2016

Прийнята до друку: 10.01.2017

## УДК 629.46(477)"401.4"

О. В. ПОНОМАРЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Експлуатація та ремонт рухомого складу», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 19 99, ел. пошта [etrs1@mail.ua](mailto:etrs1@mail.ua), ORCID 0000-0002-9608-8849

ПЕРСПЕКТИВИ ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ВАГОННОГО ПАРКУ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ

**Мета.** Однією з основних умов ефективної та якісної організації залізничних перевезень є наявність сучасного вагонного парку. Однак аналіз технічного стану свідчить про його значний моральний та фізичний знос. Основною метою статті є пошук можливих шляхів поліпшення технічного стану існуючого вагонного парку на залізницях України. **Методика.** Існуючий стан залізничного транспорту не у всьому відповідає сучасним вимогам. За останні десятиріччя оновлення основних фондів забезпечувалось, в основному, за рахунок власних коштів залізниць та задовольняло потребу в капітальних інвестиціях лише на 5–6 %. Водночас, фактично з часу незалежності України, темпи зростання цін на продукцію, яка споживається залізницями, перевищували темпи зростання тарифів на перевезення, що не давало змоги оновлювати та поліпшувати технічний стан рухомого складу в необхідному обсязі. **Результати.** Проведено аналіз вантажного вагонного парку українських залізниць, який показав незадовільний стан вагонів. Залізнична галузь сьогодні працює за старими принципами, які не відповідають сучасним світовим тенденціям організації роботи залізничного транспорту, зумовлюють неефективність її функціонування та, стримуючи надходження в галузь інвестицій, ускладнюють подальший розвиток та співробітництво з приватними компаніями. Недостатнє фінансування, недосконала система ремонту та технічного обслуговування гальмують розвиток галузі, знижують конкурентоздатність залізничного транспорту України. Однак реалізація розпочатих стратегічних напрямків розвитку транспортної галузі, перегляд вказаних стримуючих факторів та використання досвіду передових країн світу дозволять вивести залізничний транспорт із кризи. **Наукова новизна.** Авторами наведений комплексний розгляд питань щодо удосконалення системи утримання вагонів при подовженні терміну служби їх експлуатації. **Практична значимість.** Досліджені та запропоновані можливі шляхи поліпшення технічного стану вагонного парку, за рахунок чого вдасться досягти подовження терміну експлуатації вагонів та оптимізувати витрати на проведення технічного обслуговування, депоовських та капітальних ремонтів.

*Ключові слова:* технічний стан; термін експлуатації; вагонний парк; ремонт; технічне обслуговування

## Вступ

Залізничний транспорт є однією з важливих базових галузей економіки України, забезпечує її внутрішні та зовнішні транспортно-економічні зв'язки і потреби населення у перевезеннях. Функціонування залізничного транспорту, як частини єдиної транспортної системи країни, сприяє гармонічному функціонуванню всіх галузей виробництва, соціальному і економічному розвитку та зміцненню обороноздатності держави, міжнародному співробітництву України.

Для України залізничний транспорт – пріоритетний у перевезеннях вантажів. Його частка на транспортному ринку складає майже 84 % усіх перевезень без урахування обсягів транспортування вантажів специфічним видом тран-

спорту – трубопровідним. Перевозяться залізницями тисячі найменувань найрізноманітніших вантажів. Залізничний транспорт так само, як добувна, обробна промисловість або сільське господарство, галузь матеріального виробництва. При перевезеннях вантажів його продукцією є переміщення матеріальних цінностей (товарів, вантажів), а виробництво будь-якої продукції вважається завершеним, коли вона в схоронності доставлена в пункти споживання, що неможливо якісно виконати без справного рухомого складу [2, 3].

## Мета

Однією з основних причин падіння обсягів вантажних перевезень є кризовий стан економіки і насамперед промисловості. В структурі

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

вантажних залізничних перевезень понад 60 % припадає на масові вантажі, які транспортуються великими партіями на значні відстані – вугілля (23,2 %), руда (17,3 %), будматеріали (12 %), кокс (2,5 %), зерно і продукти помелу (5,1 %) та інші. Разом з тим, падіння обсягів перевезень значною мірою пов'язано із станом інфраструктури та рухомого складу залізничного транспорту, які не дозволяють доставляти вантажі швидко, вчасно та без втрат. Спостерігається дефіцит вантажних вагонів, які вибувають з експлуатації швидше, ніж існує можливість закуповувати нові одиниці. Внаслідок чого постає необхідність у пошуку можливих шляхів поліпшення технічного стану вагонного парку на залізницях України [7].

### Методика

Відновлення рухомого складу й інфраструктури виконується дуже повільно. У підсумку цей факт негативно впливає на безпеку руху, призводить до скорочення міжремонтних строків і, як результат, до зниження швидкості й можливості безпечної доставки вантажів. Головною причиною такої ситуації є недостатній рівень фінансування, що призводить до дефіциту капіталовкладень у відновлення основних фондів залізниці й закупівлю нового рухомого складу як вагонів, так і локомотивів.

Аналіз ефективності рухомого складу українських залізниць свідчить не лише про знос, але й про те, що він є технічно, конструктивно і морально застарілий, оскільки основна частина вагонів побудована згідно з технічними вимогами 60-70-х років.

Наприклад, ПАТ «Укрзалізниця» сьогодні неспроможна повністю забезпечувати попит на вагони для завантаження та перевезення потрібних підприємствам обсягів вантажів, і цей незадоволений попит складає тисячу вагонів щодоби. Певна частина цього парку постійно перебуває у ремонті. Велика кількість одиниць вагонного вантажного парку (це переважно піввагони, цементовози, мінераловози) знаходиться у так званому довгостроковому відстої, тобто не експлуатується насамперед з технічних та організаційних причин. Їх залучення до активного обороту вимагає ремонту (модернізації), у тому числі за рахунок вантажовласників (передбачається, що ці роботи виконувати-

муть підприємства «Укрзалізниці») та з наступним передаванням в оренду тим, хто фінансуватиме ремонтні роботи.

Станом на 1 липня 2015 року парк вантажних вагонів «Укрзалізниці» становив 110,5 тис. вантажних вагонів, з них – 50 тис. піввагонів. Середній знос парку вантажних вагонів «Укрзалізниці» склав 90,2 %, у тому числі піввагонів – 89 %. Відповідно, нагальною потребою стає забезпечення підприємств «Укрзалізниці» новим рухомим складом, переважно піввагонами.

Згідно з Комплексною програмою оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 рр., затвердженою Міністерством транспорту та зв'язку України від 14.10.2008 р. № 1 259, за найближчі п'ять років необхідно було придбати 31570 вантажних вагонів, у тому числі 18 200 піввагонів [1].

Експлуатація застарілого рухомого складу є економічно не вигідною, веде до значного підвищення вартості ремонтних робіт, зниження якості та безпеки перевезень, тому парк рухомого складу залізниць потребує не лише оновлення, а заміни на сучасний, більш досконалий.

Проте слід зазначити, що у зв'язку зі складною економічною ситуацією та обмеженістю фінансових коштів за період з 2007 по 2014 роки було придбано та побудовано для власних потреб на підприємствах, підпорядкованих «Укрзалізниці», лише 6 373 вантажних вагони, а фінансовими планами на 2015 рік закупівля вантажних вагонів узагалі не була передбачена.

З метою визначення напрямків подальшого розвитку та функціонування транспортного сектора економіки України, розширення міжнародних транспортних зв'язків, ефективного використання транзитного потенціалу країни, впровадження структурних реформ на транспорті, Кабінетом Міністрів України затверджено Транспортну стратегію України на період до 2020 року [11].

Внаслідок ситуації, яка склалася, безупинно відбувається збільшення кількості вантажних вагонів, які наблизилися до нормативного строку експлуатації або досягли його.

### Результати

Термін служби вагона залежить, з одного боку, від інтенсивності експлуатації, а з іншого – від періодичності та обсягів відновлювальних

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

робіт при технічному обслуговуванні та ремонті (ТОР).

Існують два послідовних періоди «життя» вагона:

- період нормальної експлуатації, протягом якого ефективність роботи конструкцій рівномірно зменшується з плином часу;
- період старіння, коли йде прискорене падіння ефективності.

В період старіння інтенсивно збільшуються кількість відмов елементів конструкції, тривалість перебування в непрацездатному стані та простою у поточних ремонтах, зростає ризик аварій і катастроф. Тим самим технічний стан вагона швидко наближається до граничного.

Для відновлення ресурсу, підвищення економічної ефективності та безпеки конструкцій в системі експлуатації вантажних вагонів передбачено виконання ремонтів великого обсягу (деповських та капітальних). Їх періодичність відповідно до прийнятої на залізничному транспорті стратегії планується в часі. Тому обґрунтування термінів (періодичності) виконання ремонтів великого об'єму є важливим завданням. За допомогою оптимізації міжремонтних періодів, з одного боку, відбувається уникнення завищення необхідних витрат на утримання вагонів, а з іншого – по можливості не допускається різке зниження ефективності роботи вагона («вироблення»), його безпеки, а також переходу конструкції в граничний стан, коли її відновлення стає неможливим або недоцільним.



Рис. 1. Питоми витрати на амортизацію вартості вагона залежно від терміну служби

Fig. 1. Specific expenses for car cost amortization, depending on lifetime

Тому планування терміну служби вагона та визначення параметрів системи ТОР є єдиним завданням і, крім того, вимагає економічного обґрунтування. Як економічний критерій під час обґрунтування оптимальної періодичності ремонтів великого обсягу використовують математичний вираз собівартості одиниці продукції, одержуваної з допомогою розглянутого виробу. Стосовно вагона – це собівартість одиниці пробігу (роботи) – СОП вагона. На відміну від спрощеної методики оптимізації нормативного терміну служби деталі СОП реального вагона має більшу кількість складових.

В СОП вагона можна виділити дві групи складових. Перша – це витрати на утримання вагона, тобто витрати вагонного господарства, які залежать від технічного стану вагона, віку (пробігу) і його ціни. До них належать:

- питомі витрати на амортизацію (повернення) вартості придбаного вагона (амортизаційні відрахування);
- питомі витрати на КР;
- питомі витрати на ДР;
- питомі витрати на технічне обслуговування і ремонт.

Друга складова – це питомі витрати інших служб (локомотивної, шляхової, служби руху, енергопостачання, служби сигналізації, централізації, блокування, зв'язку і ін.), необхідні для виконання перевезення (роботи вагоном).

По закінченні назначеного терміну служби вагона накопичених засобів має бути достатньо для купівлі нового вагона аналогічної конструкції. Розмір амортизаційних відрахувань зазвичай визначають, виходячи з єдиного встановленого нормативного терміну служби, який для піввагонів становить переважно від 22 до 32 років. Однак оптимальне значення терміну служби (пошук якого є ціллю оптимізації) може не співпадати з нормативним. Тому розмір відрахувань на амортизацію необхідно визначати з урахуванням вартості вагона та розрахованого терміну служби.

Під час визначення терміну амортизаційних відрахувань додатково враховують затрати, які необхідні на розподіл та наступну утилізацію відпрацьованої конструкції.

Залишкова вартість складається з вартості деталей, вузлів, агрегатів, які можна повторно використовувати під час ремонту інших вагонів, а також вартість матеріалів, що придатні

## 91



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Витрати на КР мають бути повернені протягом наступного періоду ефективної експлуатації вагона до наступного ПР, тобто наступного ремонтного циклу. На рис. 3 наведено зменшення витрат у першому ремонтному циклі (тривалість  $L_1$ ), питомі витрати на КР дорівнюють 0, оскільки використовується ресурс, закладений при виготовленні вагона. Чим більше термін експлуатації до наступного КР, тим менше величина амортизаційних відрахувань протягом цього циклу.

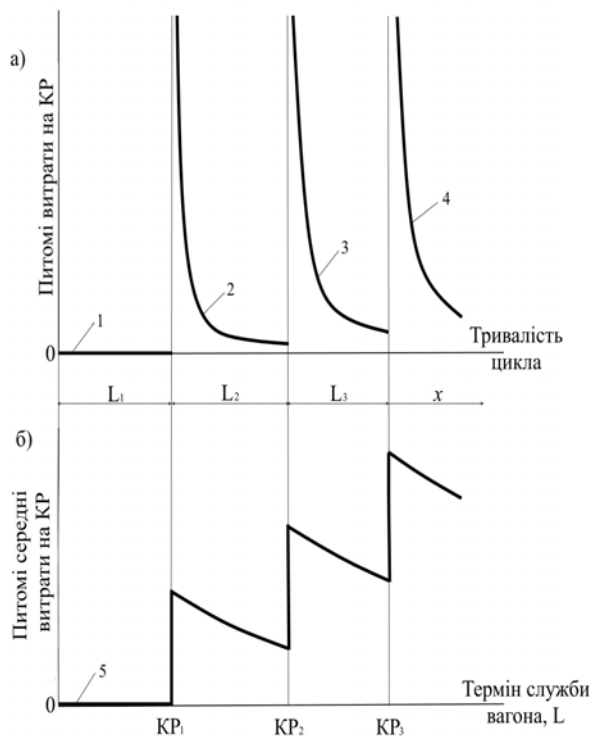


Рис. 3. Зміни витрат на капітальний ремонт на різних циклах:

*a* – питомі витрати залежно від тривалості ремонтного циклу; *b* – середні питомі витрати залежно від терміну служби:

- 1 – зміна питомих витрат на КР в першому циклі;
- 2 – зміна питомих витрат на КР у другому циклі;
- 3 – зміна питомих витрат на КР у третьому циклі;
- 4 – зміна питомих витрат на КР у четвертому циклі;
- 5 – зміна середніх питомих витрат на КР

Fig. 3. Changes in overhaul expenses in different cycles:

*a* – specific costs depending on the duration of the repair cycle; *b* – average specific costs depending on lifetime:

- 1 – specific costs changing for OR in the first cycle;
- 2 – specific costs changing for OR in the second cycle;
- 3 – specific costs changing for OR in the third cycle;
- 4 – specific costs changing for OR in the fourth cycle;
- 5 – change of average specific costs for OR

Розглянемо, як змінюються середні питомі витрати залежно від терміну служби вагона.

Якщо для вагона не планувати виконання КР, то в цьому випадку середні питомі витрати на КР рівні 0, незалежно від тривалості терміну служби. Якщо запланувати виконання одного КР, тоді середні питомі витрати на КР будуть визначатися, як відношення капітальних вкладень на КР до величини терміну служби (сумарної тривалості першого циклу та запланованого часу роботи вагона після ремонту, тобто другого циклу)

$$f_{KP}(L_1 + x) = \frac{R_{KP1}}{L_1 + x}, \quad x \in [0, L_2), \quad (3)$$

де  $R_{KP1}$  – витрати на виконання 1-го КР;  $x$  – тривалість другого ремонтного циклу;  $L_1$  – тривалість першого ремонтного циклу;  $L_1 + x$  – термін служби вагона.

Графік середніх питомих витрат на виконання КР залежно від терміну служби вагона (рис. 3, б) має кінцеві розриви на границях ремонтних циклів. Величина розриву пропорційна витратам на відповідний КР. Крім того, при збільшенні кількості ремонтних циклів величина середніх питомих витрат на КР зростає, незважаючи на збільшення терміну служби.

### Наукова новизна та практична значимість

Комплексно розглянуто питання, що стосуються удосконалення системи утримання вагонів при подовженні терміну служби їх експлуатації. Досліджені та запропоновані можливі шляхи поліпшення технічного стану вантажного вагонного парку, за рахунок чого вдасться досягти подовження терміну експлуатації вагонів та оптимізації витрат на виконання технічного обслуговування, деповських і капітальних ремонтів.

### Висновки

Значна частина вагонного парку експлуатується за межами нормативного терміну служби, або наближається до нього. Як наслідок, суттєво погіршується безпека, економічна ефективність залізничного транспорту, зростає ресурсомісткість перевезень і транспортні витрати економіки України. Збільшення собівартості

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

перевезень викликає підвищення транспортних тарифів, що значно знижує конкурентоспроможність залізничного транспорту на транспортному ринку. Через недостатнє оновлення існуючого вагонного парку новими одиницями рухомого складу та недосконалу систему ремонтів і технічного обслуговування. Проте

реалізація розпочатих стратегічних напрямів розвитку транспортної галузі, перегляд вказаних стримуючих факторів та використання досвіду передових країн світу дозволять вивести залізничний транспорт з кризи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богуславська, В. Оновлення застарілого вагонного парку – першочергове завдання департаменту вагонного господарства Укрзалізниці / В. Богуславська // Вагонний парк. – 2015. – № 9–10 (102–103). – С. 10–13.
2. Залізничні вантажні перевезення / В. К. Мироненко, В. В. Габа, В. І. Мацюк, Л. М. Петренко. – Київ : ДЕДУТ, 2015. – 248 с.
3. Зеркалов, Д. В. Транспортна система України / Д. В. Зеркалов. – Київ : Основа, 2006. – 706 с.
4. Крашенінін, О. С. Визначення граничних термінів довговічності тягового рухомого складу / О. С. Крашенінін, О. М. Обозний // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – Харків, 2011. – Вип. 122. – С. 134–140.
5. Крашенінін, О. С. Вплив напрацювання локомотивів на коректування періодичності технічного обслуговування, поточного ремонту / О. С. Крашенінін // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 1 (55). – С. 148–154. doi: 10.15802/STP2015/38265.
6. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 роки. – Київ : Укрзалізниця, 2008. – 182 с.
7. Михайличенко, К. М. Удосконалення механізмів реформування та розвитку залізничного транспорту в контексті реалізації структурних реформ в галузі : аналіт. записка [Електронний ресурс] / К. М. Михайличенко, О. В. Собкевич ; Нац. ін-т стратег. досліджень. – Режим доступу: <http://www.niss.gov.ua/articles/1662>. – Назва з екрана. – Перевірено : 13.01.2017.
8. Мямлін, С. В. Проблема визначення терміну «надійність». Методологія побудови та визначення надійності вантажних вагонів / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, Д. М. Барановський // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 110–117. doi: 10.15802/stp2015/57034.
9. Оценка периодичности технического обслуживания и ремонта в период посленормативных сроков эксплуатации ТПС / А. С. Крашенинин, О. А. Шапатын, С. А. Матвиенко, К. А. Зезюлин // Зб. наук. пр. Донецьк. ін-ту заліз. трансп. – Донецьк, 2011. – Вип. 28. – С. 165–167.
10. Пшінько, О. М. Управління вантажними вагонами компаній-операторів в умовах реформування залізничного транспорту України : монографія / О. М. Пшінько, Ю. С. Бараш, Л. В. Марценюк. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 147 с.
11. Стратегічні напрями розвитку транспортної галузі України у післякризовий період : аналіт. доп. / Д. К. Прейгер, О. В. Собкевич, О. Ю. Ємельянова ; за заг. ред. Я. А. Жаліла. – Київ : НІСД, 2012. – 112 с.
12. Стратегічний план розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року. – Київ : Міністерство інфраструктури України. – 2015. – 61 с.
13. Транспортна політика України та її наближення до норм Європейського Союзу / Т. Сирийчик, А. Фургальські, Ч. Клімкевич [та ін.] ; за ред. Марчіна Свенціцькі. – Київ : Аналітично-дорадчий центр Блакитної стрічки, 2010. – 106 с.
14. Устич, П. А. Вагонное хозяйство : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / П. А. Устич, И. И. Хаба, В. А. Ивашов. – Москва : Машиностроение, 2003. – 560 с.
15. Bröcker, J. Predicting freight flows in a globalising world / J. Bröcker, A. Korzhenevych, M.-C. Riekhof // Research in Transportation Economics. – 2011. – Vol. 31. – Iss. 1. – P. 37–44. doi: 10.1016/j.retrec.2010.11.006.
16. Railway freight car truck ZK1 // Chinese Railways Equipment. – 2013. – No. 7. – P. 56–59.

Е. В. ПОНОМАРЕНКО<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,  
ел. пошта errs1@mail.ua, ORCID 0000-0002-9608-8849

## ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВАГОННОГО ПАРКА НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ

**Цель.** Одним из основных условий эффективной и качественной организации железнодорожных перевозок является наличие современного вагонного парка. Однако анализ технического состояния свидетельствует о его значительном моральном и физическом износе. Основной целью статьи является поиск возможных путей улучшения технического состояния существующего вагонного парка на железных дорогах Украины. **Методика.** Существующее состояние железнодорожного транспорта не во всем отвечает современным требованиям. За последние десятилетия обновление основных фондов обеспечивалось, в основном, за счет собственных средств железных дорог и удовлетворяло потребность в капитальных инвестициях лишь на 5–6 %. Вместе с тем, фактически со времени независимости Украины, темпы роста цен на продукцию, которая потребляется железнодорожными дорогами, превышали темпы роста тарифов на перевозки, что не позволяло обновлять и улучшать техническое состояние подвижного состава в необходимом объеме. **Результаты.** Проведен анализ грузового вагонного парка украинских железных дорог, который показал неудовлетворительное состояние вагонов. Железнодорожная отрасль сегодня работает по старым принципам, которые не соответствуют современным мировым тенденциям организации работы железнодорожного транспорта, обуславливают неэффективность ее функционирования и, сдерживая приток в отрасль инвестиций, затрудняют дальнейшее развитие и сотрудничество с частными компаниями. Недостаточное финансирование, несовершенная система ремонта и технического обслуживания тормозят развитие, снижают конкурентоспособность железнодорожного транспорта Украины. Однако реализация начатых стратегических направлений развития транспортной отрасли, пересмотр указанных сдерживающих факторов и использование опыта передовых стран мира позволят вывести железнодорожный транспорт из кризиса. **Научная новизна.** Авторами приведено комплексное рассмотрение вопросов по совершенствованию системы содержания вагонов при продлении срока службы их эксплуатации. **Практическая значимость.** Исследованы и предложены возможные пути улучшения технического состояния вагонного парка, за счет чего удастся достичь продления срока эксплуатации вагонов и оптимизации затрат на проведение технического обслуживания, депокских и капитальных ремонтов.

*Ключевые слова:* техническое состояние; срок эксплуатации; вагонный парк; ремонт; техническое обслуживание

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

<sup>1\*</sup>Dep. «Exploitation and Repair of Rolling Stock», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7,  
Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 19 99, e-mail errs1@mail.ua, ORCID 0000-0002-9608-8849

## THE PROSPECTS FOR IMPROVING THE TECHNICAL STATE OF ROLLING STOCK ON THE RAILWAYS OF UKRAINE

**Purpose.** One of the main conditions of the effective and high-quality organization of rail hauling is availability of modern rolling stock. However, the analysis of technical condition confirms its considerable moral and physical deterioration. The main purpose of the article is search of possible ways of improvement of technical condition of the existing car fleet on the railroads of Ukraine. **Methodology.** The current state of a rail transport not fully meets the modern requirements. For the last decades updating of fixed assets has been provided generally at the expense of own means of the railroads and satisfied the need for capital investments only for 5-6 percent. At the same time, actually since declaration of independence of Ukraine the price growth rates for the products consumed by the railroads exceeded the fare growth rates that did not allow to update in necessary amount and to improve technical condition of the rolling stock. **Findings.** The article presents the analysis of freight rolling stock of Ukrainian Railways, which showed unsatisfactory condition of the cars. The railway industry today works on the old principles, which do not correspond to the modern world trends in organization of work of railway transport, contribute to the ineffi-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ciency of its functioning and impede further development, constraining the inflow of investment to this industry, hamper cooperation with private companies. Insufficient funding and imperfect system of repair and maintenance inhibit the development and reduce the competitiveness of railway transport of Ukraine. However, the implementation of strategic directions of development of the transport sector, a review of the above constraints and using the experience of advanced countries will steer the rail transport out of the crisis. **Originality.** The authors presented comprehensive consideration of issues to improve the car maintenance system while extending the life of their operation. **Practical value.** Possible ways to improve the technical condition of rolling stock were researched and proposed. This will allow extending the car lifetime and optimizing the costs of maintenance, depot and major repairs.

**Keywords:** technical state; lifetime; car park; repair; maintenance

## REFERENCES

1. Bohuslavskaya, V. (2015). Onovlennia zastariloho vahonnoho parku – pershocherhove zavdannia departamentu vahonnoho hospodarstva Ukrzaliznytsi. *Car Fleet*, 9-10(102-103), 10-13.
2. Myronenko, V. K., Haba, V. V., Matsyuk, V. I., & Petrenko, L. M. (2015). *Zaliznychni vantazhni perevezenia*. Kyiv: DETUT.
3. Zerkalov, D. V. (2006). *Transportna systema Ukrainy*. Kyiv: Osnova.
4. Krashenin, O. S., & Oboznyi, O. M. (2011). Vyznachennia hranychnykh terminiv dohovichnosti tiahovoho rukhomoho skladu. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 122, 134-140.
5. Krashenin, O. S. (2015). The effect of locomotive hours on adjusting periodicity of maintenance service and current repair. *Science and Transport Progress*, 1(55), 148-154. doi: 10.15802/STP2015/38265
6. Ukrzaliznytsia. (2008). Kompleksna prohrama onovlennia zaliznychnoho rukhomoho skladu Ukrainy na 2008–2020 roky. Kyiv: Ukrzaliznytsia.
7. Mykhaylychenko, K. M., & Sobkevych, O. V. (n.d.). Udoskonalennia mekhanizmiv reformuvannia ta rozvytku zaliznychnoho transportu v konteksti realizatsii strukturnykh reform v haluzi: analitychna zapyska. *The National Institute of Strategic Studies*. Retrieved from <http://www.niss.gov.ua/articles/1662>
8. Myamlin, S. V., Muradian, L. A., & Baranovsky, D. M. (2015). Problem of the definition the «reliability» term. Methodology of construction and study the reliability of freight cars. *Science and Transport Progress*, 6(60), 110-117. doi: 10.15802/stp2015/57034
9. Krashenin, A. S., Shapatin, O. A., Matvienko, S. A., & Zezyulin, K. A. (2011). Otsenka periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta v period poslenormativnykh srokov ekspluatatsii TPS. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, 28, 165-167.
10. Pshinko, O. M., Barash, Y. S., & Martseniuk, L. V. (2015). *Upravlinnia vantazhnymy vahonamy kompanii-operatoriv v umovakh reformuvannia zaliznychnoho transportu Ukrainy*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Press.
11. Preyher, D. K., Sobkevych, O. V., & Yemelianova, O. Y. (2012). *Stratehichni napriamy rozvytku transportnoi haluzi Ukrainy u pisliakryzovyi period: analitychna dopovid*. Kyiv: The National Institute of Strategic Studies. Retrieved from <http://www.niss.gov.ua/content/articles/files/Transport-9eadb.pdf>
12. Ukrainian Cabinet of Ministers. (2015). *Stratehichnyy plan rozvytku zaliznychnoho transportu na period do 2020 roku*. Kyiv: Ministerstvo infrastruktury Ukrainy.
13. Syrychuk, T., Furhalski, A., Klimkevych, C., Kamola, M., Diachenko, T., Puhachov, M., & Filipenko, O. (2010). *Transportna polityka Ukrainy ta yii nablyzhennia do norm Yevropeiskoho Soiuzu*. Kyiv: Analitichno-doradchyy tsentr Blakytynoiy strichky.
14. Ustych, P. A., Khaba, Y. Y., & Yvashov, V. A. (2003). *Vagonnoye khozyaystvo*. Moscow: Mashinostroyeniye.
15. Bröcker, J., Korzhenevych, A., & Riekhof, M.-C. (2011). Predicting freight flows in a globalising world. *Research in Transportation Economics*, 31(1), 37-44. doi: 10.1016/j.retrec.2010.11.006
16. Railway freight car truck ZK1. (2013). *Chinese Railways Equipment*, 7, 56-59.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна), д.т.н., проф. О. М. Горобченко (Україна)

Надійшла до редколегії: 11.10.2016

Прийнята до друку: 11.01.2017

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.423.1.016

Г. К. ГЕТЬМАН<sup>1</sup>, С. Л. МАРІКУЦА<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 ЕЛЕКТРОВОЗІВ

**Мета.** На залізницях України експлуатуються локомотиви, які як морально, так і фізично застарілі. Тому для забезпечення конкурентоспроможності залізничних перевезень необхідно оновлювати локомотивний парк і, в першу чергу, парк електровозів, оскільки електрифіковані залізниці забезпечують переважну частину пасажирських та вантажних перевезень. В зв'язку з цим особливу актуальність набувають задачі визначення оптимальних параметрів номінального режиму електрорухомого складу. Метою роботи є розгляд особливостей розв'язання зазначених задач стосовно електровозів. **Методика.** Якщо допустити, що граничні значення сили тяги електровоза визначаються за умовами зчеплення колеса з рейкою, то потужність номінального режиму можна представити як добуток номінальної швидкості руху, розрахункового коефіцієнта зчеплення, маси состава поїзда та коефіцієнтів, які являють собою відношення розрахункової (пускової) сили тяги до сили тяги номінального режиму та відношення маси локомотива до маси состава. Оскільки маса состава є величиною не постійною, то у реальних умовах завжди існує надлишкова потужність локомотивного парку, необхідного для освоєння заданого об'єму перевезень. Зниження надлишкової потужності парку можна отримати за рахунок введення в експлуатацію локомотивів різної потужності, призначених для водіння поїздів різної маси, при цьому зростає повнота використання потужності, але виникають труднощі підбору локомотивів для поїздів у експлуатації. В роботі наведено методику розрахунку оптимальних значень потужності, швидкості та сили тяги номінального режиму. Приведено математичні моделі взаємозв'язку кратності тяги, надлишкової потужності й потужності тягового модуля. **Результати.** Доведено, що потужність тягового модуля, сумарна потрібна потужність парку й надлишок цієї потужності в абсолютних одиницях пропорційні швидкості номінального режиму. Для зниження сумарної потужності парку при виборі оптимальної потужності номінального режиму тягового модуля слід прийняти в розрахунок швидкість номінального режиму, визначену за умови мінімізації витрати електроенергії на тягу, тобто найменше значення, що забезпечує можливість реалізації заданої ходової швидкості руху й необхідного для умов експлуатації рівня резервування потужності. **Наукова новизна.** Унікальність роботи полягає у розробці уніфікованого алгоритму визначення оптимальних значень параметрів номінального режиму пасажирських, вантажних та вантажопасажирських електровозів. **Практична значимість.** Авторами визначена мінімізація витрат при виготовленні, придбанні та утриманні електровозів, параметри номінального режиму яких розраховані згідно наведеної методики.

**Ключові слова:** електровоз; питома сила тяги; швидкість; кратність тяги; надлишкова потужність; витрата енергії; тяговий модуль; закон розподілу

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

**Вступ**

Старіння локомотивного парку залізниць України вимагає його оновлення [8, 10]. Насамперед, сказане стосується електрорухомого складу, оскільки переважна частина вантажних і пасажирських перевезень припадає на електрифіковані ділянки залізниць.

Найважливіші експлуатаційні характеристики електровозів і електропоїздів, до яких належать параметри розрахункового (вантажні електровози) і пускового (пасажирські електровози та електропоїзди) режимів, визначаються параметрами номінального режиму тягового привода (потужність тяги  $N_n$  і сила тяги  $F_{кн}$  або потужність тяги й швидкість руху  $v_n$ ). Саме названі параметри номінального режиму визначаються в першу чергу при складанні технічних вимог на новий тяговий електрорухомий склад.

**Мета**

Визначення параметрів номінального режиму є основною метою так званих задач тягового забезпечення. Особливості розв'язання зазначених задач стосовно електровозів розглядаються в цій статті.

**Методика**

Якщо виходити із припущення, що граничні значення розрахункової (вантажні електровози) і пускової (пасажирські електровози) сили тяги визначаються за умовами зчеплення колеса з рейкою, то потужність номінального режиму можна подати як [6]

$$N_n = 2,725 k_f^{-1} k_p \psi_{кр} m_c v_n, \text{ кВт}, \quad (1)$$

де 2,725 – коефіцієнт, що узгоджує розмірності виміру фізичних величин ( $9,81/3,6 = 2,725$ );  $k_f$  – коефіцієнт, що є відношенням розрахункової (пускової) сили тяги до сили тяги номінального режиму [1];  $k_p$  – коефіцієнт, який дорівнює відношенню маси локомотива до маси состава;  $\psi_{кр}$  – значення розрахункового коефіцієнта зчеплення при розрахунковій (пусковій) швидкості;  $m_c$  – маса состава поїзда, т.

Коефіцієнт  $k_p$  визначається виразами [5, 6]:

– вантажні електровози

$$k_p = \frac{w_o'' + i_p}{1000 \psi_{кр} - (w_o' + i_p)}, \quad (2)$$

– пасажирські електровози

$$k_p = \frac{w_o'' + i + 102(1 + \gamma_c) a_n}{1000 \psi_{кр} - [w_o' + i + 102(1 + \gamma_l) a_n]}, \quad (3)$$

де  $i_p$  – розрахунковий підйом, ‰;  $w_o''$  – основний питомий опір руху состава, при розрахунковій (пусковій) швидкості, Н/кН (кгс/т) [14];  $w_o'$  – основний питомий опір руху локомотива в режимі тяги, при розрахунковій (пусковій) швидкості, Н/кН (кгс/т) [2];  $a_n$  – максимальне прискорення, реалізоване при пусковій швидкості, м/с<sup>2</sup>;  $i$  – величина ухилу, на якому відбувається пуск, ‰;  $1 + \gamma_c$  і  $1 + \gamma_l$  – коефіцієнти інерції оберткових частин состава й локомотива відповідно.

У наведену формулу як аргумент входить маса состава  $m_c$ . У зв'язку з цим, у реальних умовах завжди існує надлишкова потужність локомотивного парку, необхідного для освоєння заданого об'єму перевезень як у вантажному, так і у пасажирському русі, пояснюється це таким. Незважаючи на те, що графіком руху поїздів для кожного напрямку руху встановлено норми маси вантажних поїздів, завжди мають місце значні відхилення їх від нормованого значення. Навіть у випадку виконання, продиктованого прагненням повного використання потужності тягових засобів і корисної довжини приймально-відправних колій станцій правила формування, коли вантажні поїзди повинні бути або повносоставними, або повноваговими. Зазначені відхилення маси вантажних поїздів від нормованого значення пояснюються немінучими коливаннями поїзного погонного навантаження, що зумовлено, у свою чергу, специфікою вантажів, які перевозяться на цій лінії.

Таким чином, маса вантажних поїздів на конкретному напрямку є величина випадкова. Це приводить до того, що при визначенні потужності локомотива з умови ведення поїздів нормованої маси експлуатований парк буде мати значну надлишкову потужність порівняно з потрібною.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

На залізницях України в цей час і в перспективі будуть обертатися пасажирські поїзди різних швидкісних категорій і составності (зараз составність поїздів різного призначення коливається від 3 до 24 вагонів) [5]. Використання у пасажирському русі електровоза одного типу для ведення поїздів усіх швидкісних категорій і будь-якої составності зумовить значну надлишкову потужність парку.

Надлишкова потужність локомотивного парку негативно позначається на економічних показниках перевізного процесу, тому що призводить до зростання витрат на придбання локомотивів, а також витрат, зумовлених підвищеною витратою електроенергії на тягу поїздів і утриманням тягових засобів з надлишковою потужністю.

Зниження надлишкової потужності парку можна отримати за рахунок уведення в експлуатацію локомотивів різної потужності, призначених для водіння поїздів різної маси. Таким чином, виникає задача визначення оптимально-го потужнісного ряду електровозів.

Зі збільшенням кількості градацій потужності зростає повнота використання потужності локомотивного парку, але виникають труднощі підбору локомотивів для поїздів різної маси в експлуатації. Застосовувати локомотиви різних типів на одній і тій самій ділянці вкрай незручно в експлуатації й найчастіше невигідно економічно, тому що при цьому погіршуються показники використання локомотивного парку. З техніко-економічних і експлуатаційних позицій прийнятне використання локомотивів одного або, у крайньому випадку, двох типів [11].

Очевидно, найбільш прийнятним є застосування однотипних тягових модулів [7], з яких можна формувати тягові зчепи необхідної потужності. Однак і в цьому випадку збільшення числа модулів у зчепі (надалі цей показник будемо іменувати кратністю тяги) призводить до погіршення показників експлуатаційної роботи. Тому як один з показників оптимізації доцільно прийняти значення кратності тяги.

Сказаним вище пояснюється вибір в [6] при визначенні параметрів номінального режиму електровозів таких показників оптимальності:

– витрата електроенергії на здійснення перевезень, за умови забезпечення можливості реалізації заданих значень часу ходу поїздів;

– недовикористану (надлишкову) потужність локомотивного парку;

– середнє значення кратності тяги, необхідне для здійснення перевезень на заданій лінії або полігоні тяги.

При використанні названих вище показників оптимізації розглянута задача для вантажних електровозів може бути сформульована так: для заданих законів розподілу маси поїздів на поїздо-ділянках, що утворюють даний полігон тяги, необхідно знайти таке значення потужності тягового модуля і швидкості руху номінального режиму, щоб забезпечити освоєння заданого обсягу перевезень при мінімальній сумарній надлишковій потужності інвентарного парку, мінімальній кратності тяги та при мінімальній витраті електроенергії на тягу поїздів.

Задача повинна бути розв'язана при виконанні умови реалізації заданої ходової швидкості руху поїздів для реальних характеристик поздовжнього профілю колії й діючих обмежень максимальної швидкості руху вантажних поїздів.

Наведене формулювання задачі щодо визначення оптимальних параметрів номінального режиму тягового модуля справедливе й для випадку пасажирського електровоза, якщо умови розв'язання задачі доповнити вимогою забезпечення розгону поїзда й досягнення конструкційної швидкості при прискореннях заданої величини.

У викладеній вище постановці розглянута задача належить до класу задач векторної оптимізації із кількістю показників, яка дорівнює трьом.

В задачах векторної оптимізації з кількістю показників більше двох суттєво ускладнюється процедура алгоритмізації розв'язку, аналізу й інтерпретації отриманих результатів [3]. З метою пошуку можливих шляхів спрощення розв'язання розглянутої задачі, установимо взаємозв'язок показників оптимальності й параметрів оптимізації. Для визначеності, нижче буде розглядатися лише вантажний рух.

Нехай, як зазвичай, при розв'язанні подібного типу задач, задано: тип вагонів, з яких сформований состав; відсоткове співвідношення вагонів кожного типу в складі; статичне навантаження на вісь вагонів. Тоді коефіцієнт  $k_p$  є функцією швидкості  $v_n$ , підйому  $i_p$  та, крім

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

того, залежить від типу тягового привода й характеристик механічної частини, оскільки останні визначають залежність розрахункового коефіцієнта зчеплення, а також сили опору руху. При цьому, як випливає з (1), необхідна номінальна потужність електровоза для ведення поїздів заданої маси на конкретній ділянці, тобто при відомому розрахунковому підйомі, визначається величиною номінальної швидкості й масою состава.

Проаналізуємо взаємозв'язок параметрів номінального режиму електровоза й витрати електроенергії на тягу [12, 13].

Витрата електроенергії на тягу в Вт·год (без врахування витрат на власні потреби) визначимо як

$$A = \frac{1}{3,6 \cdot 10^3} \int \frac{F_k(s)}{\eta(s)} ds, \quad (4)$$

де  $F_k$  – сила тяги, Н;  $s$  – відстань, км;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії електровоза.

Питома витрата електроенергії у Вт·год/т·км згідно з [9]

$$a = \frac{A}{m_{\Pi}(s_k - s_n) \cdot 10^{-3}},$$

де  $m_{\Pi}$  – маса поїзда, т;  $s_n, s_k$  – координати шляху, відповідно на початку та у кінці ділянки, м, або

$$a = \frac{2,725}{s_k - s_n} \int_{s_n}^{s_k} \frac{f_k(s)}{\eta(s)} ds, \quad (5)$$

де  $f_k(s)$  – питома сила тяги в Н/кН (кгс/т).

Як видно з виразу (5), витрата електроенергії для даної ділянки є функцією керування поїздом  $f_k(s)$ , яка може приймати значення

$$0 \leq f_k(v) \leq \bar{f}_k(v),$$

де  $\bar{f}_k(v)$  – гранична тягова характеристика.

Координати граничної тягової характеристики визначаються як

$$\bar{f}_k(v) = \min \{ \bar{f}_{\text{кц}}(v); \bar{f}_{\beta}(v) \}, \quad (6)$$

де  $\bar{f}_{\text{кц}}(v)$  та  $\bar{f}_{\beta}(v)$  – ділянки граничної тягової характеристики, зумовлені обмеженнями сили тяги відповідно по зчепленню й допустимому ступеню послаблення збудження [15] (для тя-

гових двигунів постійного струму). В [6] наведено, що коли потужність номінального режиму електровоза визначається за умови реалізації на розрахунковому підйомі максимально можливого значення сили тяги по зчепленню, то координати граничної тягової характеристики розраховуються як

$$\bar{f}_{\text{кц}}(v) = \frac{10^3 k_p \psi_k(v)}{1 + k_p};$$

$$\bar{f}_{\beta}(v) = \frac{10^3 k_p \psi_{\text{кр}}}{(1 + k_p)} \frac{1}{k_f \beta_{\text{min}}} F_k^* \left( \frac{v}{v_n} \right). \quad (7)$$

На підставі (6) та (7) можна зробити висновок, що координати граничної тягової характеристики не залежать від маси состава та однозначно визначаються швидкістю номінального режиму. Отже, за інших рівних умов питома витрата електричної енергії та можливі режими керування тягою також визначаються обраним значенням швидкості номінального режиму.

Аналіз [6] показав, що по витратах електроенергії на тягу в переважній більшості випадків для електровозів з рекуперативним гальмуванням близьким до оптимального є керування по швидкодії. Тому з позицій мінімізації енерговитрат на тягу поїздів доцільно прийняти найменше значення швидкості номінального режиму  $v_n$ , при якому забезпечується реалізація заданої ходової швидкості й забезпечується необхідне в умовах експлуатації резервування тягової потужності.

Математичні моделі взаємозв'язку кратності тяги  $y_K$ , надлишкової потужності  $y_N$  й параметра оптимізації, тобто потужності тягового модуля, можуть бути отримані в такий спосіб.

Нехай для кожної з ділянок обертання локомотивів задано:

- вантажопотоки (вантажонапруженість) для парного й непарного напрямків руху;
- характеристики поздовжнього профілю;
- закон розподілу маси поїздів.

При перерахуваннях вище вихідних даних розв'язання задачі може бути виконано в такий послідовності.

Відповідно до формули (1) на підставі даних, що характеризують розподіл маси поїздів для кожної  $j$ -ї ділянки й заданої швидкості номінального режиму, можна визначити розподіл



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

потрібної потужності тяги  $f_j(t)$ . Відзначимо, що тут і нижче заради спрощення записів змінну  $N_n$  будемо позначати через  $t$ . Нехай  $a_j$  і  $b_j$  – відповідно найменше і найбільше значення потрібної потужності тягового зчепу, необхідної для забезпечення перевезень на  $j$ -ій ділянці.

Якщо потужність тягового модуля дорівнює  $x$ , то мінімальне й максимальне значення кратності тяги, необхідні для ведення поїздів на  $j$ -ій ділянці, дорівнюватимуть відповідно

$$r_j = \left\lceil \frac{a_j}{x} \right\rceil + 1; \quad s_j = \left\lceil \frac{b_j}{x} \right\rceil + z,$$

де квадратні дужки означають операцію взяття цілої частини числа, а величина

$$z = \begin{cases} 1, & \text{якщо } b_j/x \neq \text{цілому числу;} \\ 0, & \text{якщо } b_j/x = \text{цілому числу.} \end{cases}$$

При заданому розподілі ймовірностей потрібної потужності  $f_j(t)$  надлишкова потужність  $y_{Nj}$  і кратність тяги  $y_{Kj}$  визначаються як

$$y_{Nj} = \sum_{k=r}^{k=s} \int_{(k-1)x}^{kx} (kx-t)f(t)dt;$$

$$y_{Kj} = \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x}^{kx} f(t)dt, \quad k = \overline{r, s} \quad (8)$$

Зазначимо, що в наведених виразах заради скорочення записів індекси  $j$  при  $r, s$  й  $f(t)$  опущено.

Між показниками  $y_N$  й  $y_K$  існує простий взаємозв'язок. Насправді, подавши  $y_N$  за (8) як

$$y_N = x \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x}^{kx} f(t)dt - \sum_{k=r}^{k=s} \int_{(k-1)x}^{kx} tf(t)dt, \quad (9)$$

приходимо до співвідношення

$$y_N = xy_K - m_t, \quad (10)$$

де  $m_t$  – математичне очікування потрібної потужності номінального режиму.

Отримані вирази справедливі для всіх значень  $x > 0$ .

Вирази (8) і (10) дозволяють визначити показники оптимізації для кожної ділянки, що входить у зону обслуговування локомотивів даного депо (дороги, регіону і т. д.), і потім середні значення надлишкової потужності локомотивів і кратності тяги для полігона з розрахунку на один поїзд [7].

Встановимо взаємозв'язок  $y_N$ ,  $y_K$  і швидкості номінального режиму електровоза  $v_n$ .

Нехай закон розподілу потрібної потужності номінального режиму  $f(t)$  відповідає деякому фіксованому значенню швидкості номінального режиму  $v_{nf}$ . Встановимо закон розподілу потрібної потужності для іншої, відмінної від заданої, швидкості номінального режиму  $v_n = k_v v_{nf}$ , при  $0 < k_v < \infty$ .

Згідно з (1) потрібна потужність електровоза, яка відповідає певній масі состава, пропорційна швидкості номінального режиму. Тому сформульована вище задача зводиться до визначення закону розподілу випадкової величини

$$x_v = k_v x \quad (\text{або } t_v = k_v t), \quad (11)$$

де  $x_v$  й  $x$  – потужності номінального режиму тягового модуля при швидкостях номінального режиму  $v_n$  та  $v_{nf}$ , тобто:

$$x_v = N_n |_{v_n=k_v v_{nf}}; \quad x = N_n |_{v_n=v_{nf}}.$$

Як відомо [4], закон розподілу функції  $y = \varphi(t)$  випадкової величини  $t$  із щільністю розподілу  $f(t)$  визначається як

$$f(y) = f(\psi(y))|\psi'(y)|, \quad (12)$$

де  $\psi(y)$  – функція, зворотна функції  $\varphi(t)$ , тобто  $t = \psi(y)$ ;  $\psi'(y)$  – модуль похідної функції  $\psi(y)$ .

У нашому випадку функція  $t_v$  випадкової величини  $t$  із щільністю розподілу  $f(t)$  за змістом задачі приймає тільки позитивні значення і є монотонно зростаючою. Тому відповідно до (12) шуканий закон розподілу визначається як

$$f_v(t_v) = \frac{1}{k_v} f\left(\frac{t_v}{k_v}\right). \quad (13)$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Найменше й найбільше значення потрібної потужності для швидкості номінального режиму  $v_n$  дорівнюють відповідно:

$$A = k_v a; \quad B = k_v b. \quad (14)$$

А математичне очікування потрібної потужності номінального режиму, як впливає з (11) і відомої теореми про математичне очікування лінійної функції випадкових величин, дорівнює

$$m_v = k_v m_t. \quad (15)$$

При швидкості номінального режиму  $v_n \neq v_{нф}$  кратність тяги складе

$$y_{Kv} = \sum_{k=r}^{k=s} k \int_{(k-1)x_v}^{kx_v} f_v(t_v) dt_v. \quad (16)$$

Значення мінімальної  $r$  і максимальної  $s$  кратності тяги в (16) і (8) однакові. Дійсно, для  $v_n \neq v_{нф}$  будемо мати

$$r = \left\lceil \frac{A}{x_v} \right\rceil + 1; \quad s = \left\lfloor \frac{B}{x_v} \right\rfloor + z,$$

а з урахуванням (14) і (11)

$$\frac{A}{x_v} = \frac{a}{x}; \quad \frac{B}{x_v} = \frac{b}{x}.$$

Якщо в (16) ввести згідно з (11) змінну

$$t = \frac{t_v}{k_v}$$

і врахувати, що  $dt_v = k_v dt$ , то вираз під інтегралом в (16) приводиться до вигляду

$$\frac{1}{k_v} f\left(\frac{t_v}{k_v}\right) k_v dt = f(t) dt.$$

Границі інтегрування:

$$\text{верхня } t_b = t|_{t_v=kx_v} = \frac{t_v}{k_v} = \frac{kx_v}{k_v} = kx;$$

$$\text{нижня } t_n = t|_{t_v=(k-1)x_v} = \frac{t_v}{k_v} = \frac{(k-1)x_v}{k_v} = (k-1)x.$$

Виконана заміна змінних, як неважко бачити, показує, що вирази (8) і (16) дають однакові середні значення  $y_K$ . Отже, кількість тягових модулів у зчепі для ведення поїздів заданої ва-

ги, тобто кратність тяги, не залежить від величини швидкості номінального режиму.

Надлишкова потужність тяги для  $v_n \neq v_{нф}$ , як можна бачити з (10), враховуючи (15), дорівнює

$$y_{Nv} = x_v y_K - m_v \quad (17)$$

або

$$y_{Nv} = k_v y_N.$$

### Результати

Отже, потужність тягового модуля  $x$ , сума рна потрібна потужність локомотивного парку й надлишок цієї потужності в абсолютних одиницях  $y_N$  пропорційні швидкості номінального режиму  $v_n$ .

Таким чином, з точки зору зниження сумарної потужності парку при виборі оптимальної потужності номінального режиму тягового модуля слід прийняти в розрахунки швидкість номінального режиму, визначену з умови мінімізації витрати електроенергії на тягу (найменше значення  $v_n$ , що забезпечує можливість реалізації заданої ходової швидкості руху й необхідного для умов експлуатації рівня резервування потужності).

З викладеного вище випливає, що розв'язання задачі визначення оптимальних параметрів номінального режиму тягового модуля, сформульованої вище як задачі векторної оптимізації із трьома показниками, можна звести до розв'язання двох самостійних задач:

– визначення швидкості номінального режиму з умови реалізації заданої ходової швидкості руху при мінімальній витраті електроенергії на тягу поїздів;

– вибір потужності номінального режиму тягового модуля, при заданому значенні швидкості цього режиму, з умови мінімізації кратності тяги й надлишкової потужності потрібного електровозного парку.

### Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає у розробці уніфікованого алгоритму визначення оптимальних значень параметрів номінального режиму па-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

сажирських, вантажних та вантажо-пасажирських електровозів.

Витрати коштів при побудові чи закупівлі нових електровозів, параметри номінального режиму яких обрано відповідно до наведеної методики, будуть мінімальними, також мінімальними будуть витрати на їх утримання.

## Висновки

Отримані результати дозволяють суттєво спростити побудову алгоритму пошуку опти-

мальних параметрів номінального режиму пасажирських та вантажних електровозів та дозволяють наочно інтерпретувати результати розв'язання задач тягового забезпечення.

Кожна із зазначених задач може бути розглянута в класі задач векторної оптимізації із двома показниками. Можливі шляхи їх розв'язку викладено в [6, 7].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арпуль, С. В. Визначення сили тяги пасажирського електровоза при вирішенні задач тягового забезпечення / С. В. Арпуль // Електрифікація транспорту. – 2013. – № 5. – С. 8–12.
2. Арпуль, С. В. Определение скорости движения и удельной мощности номинального режима пассажирских электровозов / С. В. Арпуль // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 107–113.
3. Босов, А. А. Функции множества и их применение / А. А. Босов. – Днепродзержинск : Изд. дом «Андрей», 2007. – 182 с.
4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – Москва : Наука, 1969. – 567 с.
5. Выбор рациональных параметров номинального режима пассажирских электровозов : монография / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, А. И. Кийко, Ю. В. Михайленко. – Днепропетровск : Маковецкий, 2012. – 188 с.
6. Гетьман, Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда тяговых средств железнодорожного транспорта : монография / Г. К. Гетьман. – Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2008. – 444 с.
7. Гетьман, Г. К. Определение оптимальной мощности тягового модуля / Г. К. Гетьман // Вестн. ОАО «ВЭЛНИИ». – 2007. – Т. 1 (53). – С. 155–176.
8. Забарилло, Д. О. Визначення частоти високочастотної ланки для перспективної схеми електрорухомого складу / Д. О. Забарилло // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 65–73. doi: 10.15802/stp2014/30448.
9. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
10. Сергиенко, Н. И. Решение проблем подвижного состава железных дорог Украины через взаимодействие государственного и частного секторов экономики / Н. И. Сергиенко // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 40–46.
11. Тихонов, К. К. Теоретические основы выбора оптимальных весовых норм грузовых поездов / К. К. Тихонов // Тр. МИИТа. – Москва, 1970. – Вып. 331. – 200 с.
12. Ignacio, G. F. Can High-Speed Trains Run Faster and Reduce Energy Consumption? / G. F. Ignacio, G. A. Alberto // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2012. – Vol. 48. – P. 827–837. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1060.
13. Kim, K. Optimal Train Operation for Minimum Energy Consumption Considering Track Alignment, Speed Limit, and Schedule Adherence / K. Kim, S. I. Chien // J. of Transportation Engineering. – 2011. – Vol. 137. – Iss. 9. – P. 665–674. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000246.
14. Steimel, A. Electric Traction – Motion Power and Energy Supply / A. Steimel. – Munich : Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2008. – 335 p.
15. Su, R. Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm / R. Su, Q. Gu, T. Wen // J. of Applied Mathematics. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–7. doi: 10.1155/2014/507308.

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

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

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

## ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОВОЗОВ

**Цель.** На железных дорогах Украины эксплуатируются локомотивы, которые как морально, так и физически устарели. Поэтому для обеспечения конкурентоспособности железнодорожных перевозок необходимо обновлять локомотивный парк и, в первую очередь, парк электровозов, поскольку электрифицированные железные дороги обеспечивают преобладающую часть пассажирских и грузовых перевозок. В связи с этим особую актуальность приобретают задачи определения оптимальных параметров номинального режима электроподвижного состава. Целью работы является рассмотрение особенностей решения указанных задач относительно электровозов. **Методика.** Если допустить, что предельные значения силы тяги электровоза определяются по условиям сцепления колеса с рельсом, то мощность номинального режима можно представить, как произведение номинальной скорости движения, расчетного коэффициента сцепления, массы состава поезда и коэффициентов, которые представляют собой отношение расчетной (пусковой) силы тяги к силе тяги номинального режима и отношение массы локомотива к массе состава. Поскольку масса состава является величиной не постоянной, то в реальных условиях всегда существует избыточная мощность локомотивного парка, необходимого для освоения заданного объема перевозок. Снижение избыточной мощности парка можно получить за счет введения в эксплуатацию локомотивов разной мощности, предназначенных для вождения поездов разной массы, при этом возрастает полнота использования мощности, но возникают трудности подбора локомотивов для поездов в эксплуатации. В работе приведена методика расчета оптимальных значений мощности, скорости и силы тяги номинального режима. Приведены математические модели взаимосвязи кратности тяги, избыточной мощности и мощности тягового модуля. **Результаты.** Доказано, что мощность тягового модуля, суммарная потребная мощность парка и излишек этой мощности в абсолютных единицах пропорциональны скорости номинального режима. Для снижения суммарной мощности парка при выборе оптимальной мощности номинального режима тягового модуля нужно принять в расчет скорость номинального режима, определенную из условий минимизации расхода электроэнергии на тягу, то есть наименьшее значение, которое обеспечивает возможность реализации заданной ходовой скорости движения и необходимого для условий эксплуатации уровня резервирования мощности. **Научная новизна.** Уникальность работы состоит в разработке унифицированного алгоритма определения оптимальных значений параметров номинального режима пассажирских, грузовых и грузопассажирских электровозов. **Практическая значимость.** Авторами определена минимизация расходов при изготовлении, приобретении и содержании электровозов, параметры номинального режима которых рассчитаны согласно приведенной методике.

**Ключевые слова:** электровоз; удельная сила тяги; скорость; кратность тяги; избыточная мощность; расход энергии; тяговый модуль; закон распределения

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 OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

**Purpose.** The railways of Ukraine have been operated the locomotives, which are both morally and physically obsolete. Therefore, to ensure the competitiveness of rail transport it is necessary to update the locomotive fleet, and first of all the fleet of electric locomotives, because electrified railways provide the greater part of passenger and freight traffic. In this connection it is of special importance to determine the optimum parameters of the nominal mode of electric rolling stock. The purpose of the work is to examine the features of solution of these problems with respect to electric locomotives. **Methodology.** Assuming that the limit values of traction force are determined by the conditions of wheel-rail grip, then the power of the nominal mode can be represented as the product of rated speed, estimated friction coefficient, train weight and the coefficients that represent the ratio of the estimated (starting) value of traction force to value of traction force the nominal mode and the ratio of the mass of the locomotive to the train weight. Since the mass of the train is not a constant value, there is always a surplus power of the locomotive fleet required for the mastering of a predetermined volume of transportations. Reduced overcapacity of the locomotive fleet can be achieved by introduction of the locomotives of different power, designed for driving trains of different weight that will result in increased completeness of the power use but also in difficulty in selecting of locomotives for trains in operation. The paper shows the method of calculating the optimum values of power, speed and traction force of the nominal mode. It presents the mathematical model of the relationship of traction rate, excessive capacity and power of the traction unit. **Findings.** It is proved that the power of the traction unit, the total fleet power requirement and the excess of power in absolute units are proportional to the speed of the nominal mode. To reduce the total power of the fleet when selecting the optimum power of the traction unit it is necessary to take into consideration the speed of the nominal mode, defined by the condition of minimization of power consumption for traction, i.e. the smallest value that enables the implementation of the given running speed and the power redundancy level required for operation. **Originality.** It consists in the development of a unified algorithm for determining the optimal parameter values of the nominal mode of passenger, freight and freight-passenger electric locomotives. **Practical value.** The authors determined the minimization costs during production, acquisition and maintenance of electric locomotives, whose nominal mode parameters are designed according to the above procedure.

**Keywords:** electric locomotive; specific traction force; speed; traction multiplicity; excess power; energy consumption; the traction unit; distribution law

## REFERENCES

1. Arpul, S. V. (2013). Traction force of passenger electric definition for traction providing solve. *Electrification of Transport*, 5, 8-12.
2. Arpul, S. V. (2014). The definition of speed and power density nominal mode of passenger electric locomotives. *Electrification of Transport*, 7, 107-113.
3. Bosov, A. A. (2007). *Funktsii mnozhestva i ikh primeneniye*. Dneprodzerzhinsk: Izdatelskiy dom «Andrey».
4. Venttsel, Y. S. (1969). *Teoriya veroyatnostey*. Moscow: Nauka.
5. Getman, G. K., Arpul, S. V., Kiyko, A. I., & Mikhaylenko, Y. V. (2012). *Vybor ratsionalnykh parametrov nominalnogo rezhima passazhirskikh elektrovozov*. Dnepropetrovsk: Makovetskiy.
6. Getman, G. K. (2008). *Nauchnyye osnovy opredeleniya ratsionalnogo moshchnostnogo ryada tyagovykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta*. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Press.
7. Getman, G. K. (2007). Measurement of traction module optimum power. *Vestnik OAO «VEINII»*, 1(53), 155-176.
8. Zabarylo, D. O. (2014). Frequency determination of high-frequency link for perspective electric rolling stock. *Science and Transport Progress*, 5(53), 65-73. doi: 10.15802/stp2014/30448
9. All-Soviet Union Research Institute of Railway Transport. (1985). *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty*. Moscow: Transport.
10. Sergienko, N. I. (2010). Resheniye problem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog Ukrainy cherez vzaimodeystviye gosudarstvennogo i chastnogo sektorov ekonomiki. *Locomotive-Inform*, 6, 40-46.
11. Tikhonov, K. K. (1970). Teoreticheskiye osnovy vybora optimalnykh vesovykh norm gruzovykh poyezdov. *Proc. of Moscow Institute of Transport Engineering*, 331.
12. Ignacio, G. F., & Alberto, G. A. (2012). Can High-Speed Trains Run Faster and Reduce Energy Consumption? *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 48, 827-837. doi: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1060.
13. Kim, K., & Chien, S. I. (2011). Optimal Train Operation for Minimum Energy Consumption Considering Track Alignment, Speed Limit, and Schedule Adherence. *Journal of Transportation Engineering*, 137(9), 665-674. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000246

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

---

14. Steimel, A. (2008). *Electric Traction – Motion Power and Energy Supply*. Munich: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.
15. Su, R., Gu, Q., & Wen, T. (2014). Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 1-7. doi: 10.1155/2014/507308

*Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. М. Афанасовим (Україна); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцем (Україна)*

Надійшла до редколегії: 11.10.2016

Прийнята до друку: 12.01.2017

## УДК 629.423.62-83

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@mail.ru, ORCID 0000-0001-5691-0925

## АППРОКСИМАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Цель.** В научной работе предполагается получить аналитическое выражение, описывающее универсальную магнитную характеристику и дающее возможность учитывать размагничивающее действие реакции якоря. А на базе универсальной магнитной характеристики необходимо получить универсальные выражения для индуктивных параметров тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего токов. **Методика.** Универсальная магнитная характеристика (УМХ) представляет собой зависимость в относительных единицах магнитного потока от магнитодвижущей силы (МДС) обмотки возбуждения. Так как УМХ построена для машин, работающих под нагрузкой, следовательно, на самом деле она представляет собой зависимость и от МДС обмотки возбуждения, и от МДС реакции якоря. Для расчета электромеханических характеристик при неизменном возбуждении можно пользоваться одним из известных выражений, аппроксимирующих УМХ. Однако при моделировании работы тягового электродвигателя в широком диапазоне изменения возбуждения необходимо выражение, в котором присутствует вторая переменная в виде МДС реакции якоря. Такое выражение также необходимо для определения индуктивных параметров тягового электродвигателя, в большой степени зависящих от тока. Выражение для аппроксимации УМХ с двумя переменными можно получить путем анализа распределения магнитного поля в воздушном зазоре на расчетной полюсной дуге. **Результаты.** Автором получено выражение для аппроксимации УМХ, которое зависит от двух переменных: МДС возбуждения и МДС реакции якоря. Для конкретного режима ослабления возбуждения возможно преобразование данного выражения в функцию одной переменной, например, тока якоря. Также в качестве аргумента может выступать МДС обмотки возбуждения. **Научная новизна.** Для аппроксимации УМХ предложена методика, позволяющая ввести в аппроксимирующее выражение вторую переменную в виде МДС реакции якоря. **Практическая значимость.** Имея в наличии скоростную характеристику или коэффициент насыщения данного тягового электродвигателя, можно определить его индуктивные параметры в конкретном режиме работы или получить их зависимость от токов обмоток для любого режима работы.

**Ключевые слова:** универсальная магнитная характеристика; аппроксимация; тяговый электродвигатель; индуктивные параметры

### Введение

В практике проектирования тяговых электродвигателей постоянного и пульсирующего тока широко используется так называемая универсальная магнитная характеристика (УМХ) [13]. Она представляет собой зависимость магнитного потока от магнитодвижущей силы (МДС) обмотки возбуждения в относительных единицах (о.е.) и используется для построения магнитной характеристики проектируемой машины в абсолютных единицах. Магнитная характеристика, в свою очередь, является базовой, определяющей все остальные электро-механические характеристики [15, 17–21]. Построение магнитной характеристики по УМХ

выполняют после определения коэффициента насыщения в номинальном режиме. Также, при известном коэффициенте насыщения существующих машин, можно построить их магнитную характеристику без использования скоростной характеристики.

В настоящее время, при широком использовании ЭВМ для проектирования и моделирования электрических машин, возникает задача в представлении УМХ в виде аналитического выражения [5, 6]. Во всех аналитических выражениях, представленных в [5], в качестве аргумента аппроксимирующей функции выступает только МДС обмотки возбуждения. Такой подход является очень удобным, если описываемая

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

такої функцією характеристика використовується для розрахунків або моделювання тільки при заданому коефіцієнті ослаблення возбуждення. Однак, для отримання вираження, описуючого змінення магнітного потоку во всем діапазоні змінення току двигателя і ступені ослаблення возбуждення, необхідно апроксимувати УМХ функцією, зависящою і від МДС обмотки возбуждення і від МДС реакції якоря.

**Цель**

Получить выражение для аппроксимации УМХ, которое учитывает влияние МДС реакции якоря для всего диапазона изменения степени ослабления возбуждения. Разработать методику применения данного выражения для определения индуктивных параметров существующих машин при известном коэффициенте насыщения.

**Методика**

Процесс разработки методики для определения индуктивных параметров машины по УМХ разделим на несколько этапов:

1. Вывод выражения для основного магнитного потока машины с учетом размагничивающего действия реакции якоря.
2. Вывод общих выражений для индуктивных параметров электродвигателя.
3. Определение индуктивных параметров электродвигателя с учетом реакции якоря.
4. Аппроксимация УМХ выражением для основного магнитного потока.
5. Определение на базе аппроксимирующего выражения для УМХ универсальных формул для индуктивных параметров машины (будет рассмотрено в следующих работах).

*1. Вывод выражения для основного магнитного потока машины с учетом размагничивающего действия реакции якоря.* Как известно, реакция якоря машины постоянного тока – это явление, представляющее собой наложение магнитного поля, создаваемого обмоткой якоря, на основное магнитное поле. При увеличении тока якоря (МДС реакции якоря) происходит искажение основного магнитного потока и, как следствие, его уменьшение. Для определе-

ния истинного магнитного потока под нагрузкой существует ряд методик [3, 4, 7, 9, 14].

В фундаментальных работах по теории электрических машин [4, 7, 9] описана графическая методика определения основного магнитного потока в машине под нагрузкой. В работе [15] описаны графические и графоаналитические методики, наиболее широко применяющиеся при проектировании тяговых электромашин. Несмотря на свою простоту, графические и графоаналитические методики не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним при моделировании электрических машин. Главное требование – это возможность определения согласно выбранной методике аналитического выражения, описывающего изменение основного магнитного потока во всем диапазоне изменения МДС обмотки возбуждения и реакции якоря. Наиболее полно этому требованию соответствует методика, описанная в [3].

Задачей, решаемой в работе [3], было получение на основе известных функций, описывающих кривую намагничивания, выражения, в котором была бы вторая переменная, представляющая собой МДС реакции якоря. В конечном счете, такое выражение дает возможность определить значение магнитного потока при любой степени ослабления возбуждения.

В качестве базового выражения для данной методики можно использовать характеристику намагничивания машины  $\Phi_d(F_e)$  или переходную характеристику  $B_\delta(F_{\delta Z})$ . Характеристика намагничивания машины представляет собой зависимость основного магнитного потока от МДС обмотки возбуждения  $F_e$ , определенная из опыта холостого хода. Переходная характеристика представляет собой зависимость индукции в воздушном зазоре от суммы падений магнитного напряжения в зазоре и в зубцовом слое якоря машины  $F_{\delta Z}$ . Заметим, что использование переходной характеристики весьма затруднительно, так как для получения ее аналитического выражения необходимо аппроксимировать:

- собственно переходную характеристику,
- кривую намагничивания зубцового слоя машины и ярма якоря,
- кривую намагничивания стального литья остова машины и главных полюсов, что, в свою



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

очередь, вносит дополнительную погрешность в расчеты.

Поэтому при моделировании предпочтительно использовать характеристику намагничивания машины  $\Phi_d(F_\delta)$ .

Для аппроксимации характеристики намагничивания можно воспользоваться одной из существующих математических моделей кривых намагничивания [1, 2, 11, 12]. В качестве аппроксимирующего выражения возьмем функцию арктангенса, как одну из функций, наиболее точно описывающую кривую намагничивания [11]. Данная функция известна в литературе как формула Дрейфуса. Для характеристики намагничивания она имеет вид

$$\Phi_d(F_\delta) = p_1 \arctg(p_2 F_\delta) + p_3 F_\delta, \quad (1)$$

где  $p_1, p_2, p_3$  – коэффициенты аппроксимации;  $F_\delta$  – МДС обмотки возбуждения.

При нагрузке, основной магнитный поток зависит также и от МДС реакции якоря, действующей в пределах расчетного полюсного деления

$$F_{aq}^* = \frac{1}{2} b_\delta \frac{N}{2aD_a} i_a, \quad (3)$$

где  $i_a$  – ток якоря, А. Здесь и в дальнейшем предполагается, что ток якоря, в общем случае, зависит от времени, поэтому обозначается маленькой буквой;  $b_\delta$  – расчетное полюсное деление;  $N$  – число проводников обмотки якоря;  $D_a$  – диаметр якоря, м;  $a$  – число пар параллельных ветвей обмотки якоря.

Члены в выражении (3), стоящие перед  $i_a$ , представляют собой конструктивные параметры электрической машины и являются константами. Поэтому, их удобно будет обозначить через  $w_a^*$  – число витков обмотки якоря, приходящихся на одно расчетное полюсное деление

$$w_a^* = \frac{1}{2} b_\delta \frac{N}{2aD_a},$$

так как МДС представляет собой произведение числа витков катушки на ток, протекающий по ней. Введя данное обозначение, выражение (3) принимает вид

$$F_{aq}^* = w_a^* i_a. \quad (4)$$

Согласно [3] для основного магнитного потока с учетом реакции якоря  $F_{aq}^*$  имеем

$$\Phi_{dq}(F_\delta, F_{aq}^*) = \frac{1}{2F_{aq}^*} \int_{F_\delta - F_{aq}^*}^{F_\delta + F_{aq}^*} \Phi_d(F) dF. \quad (5)$$

Подставляя выражение (1) в выражение (5), обозначив через  $F_1 = F_\delta - F_{aq}^*$  и  $F_2 = F_\delta + F_{aq}^*$ , получаем выражение для основного магнитного потока в машине, работающей под нагрузкой

$$\Phi_{dq}(F_\delta, F_{aq}^*) = \frac{p_1}{2F_{aq}^*} [F_2 \arctg(p_2 F_2) - F_1 \arctg(p_2 F_1) - \frac{1}{2p_2} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 F_2^2}{1 + p_2^2 F_1^2} \right)] + p_3 F_\delta. \quad (6)$$

Выражение (6) дает возможность определить истинный магнитный поток в машине под нагрузкой, располагая только характеристикой намагничивания машины (характеристикой холостого хода).

2. Вывод общих выражений для индуктивных параметров электродвигателя. Имея выражение для основного магнитного потока при любой нагрузке, появляется возможность определения индуктивных параметров машины в динамическом режиме, например при работе ее в квазистационарном режиме при питании от импульсного источника напряжения. Для получения данных зависимостей необходимо записать уравнение электромагнитного состояния некомпенсированного тягового электродвигателя последовательного возбуждения без учета влияния вихревых токов

$$L_{\sigma\sigma} \frac{d(i_a \beta)}{dt} + (L_{a\sigma} + L_{o\sigma} + L_o) \frac{di_a}{dt} + \frac{d\Psi_\delta}{dt} + \frac{d\Psi_{aq}}{dt} + i_\delta(t) R_\delta + i_a(t) (R_a + R_o) + e(\Phi_{dq}, \omega) + \Delta U_{\text{ш}} = u(t), \quad (7)$$

где  $i_a(t)$  – ток обмотки якоря;  $i_\delta(t) = i_a(t) \beta$  – ток обмотки возбуждения, где  $\beta$  – степень ослабления возбуждения. Для двигателей постоянного тока  $\beta \in [\beta_{\min}; 1]$ , для двигателей пульсирующего тока  $\beta \in [\beta_{\min}; (\beta_{\max} < 1)]$ ;  $\beta_{\max}$  все-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

гда меньше единицы вследствие наличия постоянно включенного шунтирующего сопротивления. В частном случае, для двигателей постоянного тока, при  $\beta = 1$ ,  $i_{\epsilon}(t) = i_a(t)$ ;  $u(t)$  – напряжение источника питания. При питании двигателя постоянным током  $u(t) = U_{уст} = \text{const}$ , а при питании источником импульсного напряжения с периодом  $T = 1/f$  и временем импульса  $t_u$ :

$$u(t) = \begin{cases} U_{уст} & 0 \leq t \leq t_u; \\ 0 & t_u < t \leq T. \end{cases}$$

$e(\Phi_{dq}, \omega)$  – ЭДС вращения (противо-ЭДС), зависящая от основного магнитного потока и угловой скорости вращения якоря,

$$e(\Phi_{dq}, \omega) = c\Phi_{dq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)\omega;$$

$R_a, R_{\delta}, R_{\epsilon}$  – активные сопротивления обмоток: якоря, дополнительных полюсов и обмотки возбуждения;  $L_{a\sigma}, L_{\delta\sigma}, L_{\epsilon\sigma}$  – индуктивности рассеяния обмоток: якоря, дополнительных полюсов и обмотки возбуждения;  $L_{\delta}$  – индуктивность дополнительного полюса (так как магнитная система дополнительного полюса выполнена ненасыщенной, то можно считать его индуктивность постоянной в рабочем диапазоне токов двигателя);  $\Delta U_{щ}$  – падение напряжения на щетках;  $\Psi_{aq}, \Psi_{\epsilon}$  – потокосцепления от основного магнитного потока обмоток якоря и возбуждения для всех полюсов [3]

$$\Psi_{\epsilon} = 2pw_{\epsilon}\Phi_{dq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*); \quad (8)$$

$$\Psi_{aq} = \frac{2pw'_a}{2F_{aq}^{*2}} \int_{F_{\epsilon}-F_{aq}^*}^{F_{\epsilon}+F_{aq}^*} (F - F_{\epsilon})\Phi_d(F) dF, \quad (9)$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $w_{\epsilon}$  – число витков обмотки возбуждения;  $w'_a$  – число витков обмотки якоря, приходящиеся на один полюс (одно полюсное деление  $\tau$ )

$$w'_a = N/8ap.$$

В соответствии с [3] выражения  $d\Psi_{aq}/dt$  и  $d\Psi_{\epsilon}/dt$  могут быть представлены в виде:

$$\frac{d\Psi_{aq}}{dt} = \frac{\partial\Psi_{aq}}{\partial i_a} \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial\Psi_{aq}}{\partial i_{\epsilon}} \frac{di_{\epsilon}}{dt}; \quad (10)$$

$$\frac{d\Psi_{\epsilon}}{dt} = \frac{\partial\Psi_{\epsilon}}{\partial i_a} \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial\Psi_{\epsilon}}{\partial i_{\epsilon}} \frac{di_{\epsilon}}{dt}. \quad (11)$$

Согласно определению индуктивности и взаимной индуктивности [8] частные производные по току в выражениях (10) и (11) можно обозначить

$$\frac{\partial\Psi_{aq}}{\partial i_a} = L_{aq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*); \quad (12)$$

$$\frac{\partial\Psi_{aq}}{\partial i_{\epsilon}} = M_{a-\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*); \quad (13)$$

$$\frac{\partial\Psi_{\epsilon}}{\partial i_a} = M_{\epsilon-a}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*); \quad (14)$$

$$\frac{\partial\Psi_{\epsilon}}{\partial i_{\epsilon}} = L_{\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*), \quad (15)$$

где  $L_{aq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)$ ,  $L_{\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)$  – индуктивности обмоток якоря и возбуждения;  $M_{a-\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)$ ,  $M_{\epsilon-a}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)$  – взаимные индуктивности между якорем и обмоткой возбуждения и между обмоткой возбуждения и якорем.

Очевидно, что вследствие нелинейной зависимости основного магнитного потока от МДС обмотки возбуждения и реакции якоря  $\Phi_{dq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)$ , индуктивные параметры машины, определенные в выражениях (12–15), также являются нелинейно зависимыми от этих МДС.

3. *Определение индуктивных параметров электродвигателя с учетом реакции якоря.* Потокосцепление катушки с током можно определить не только как произведение тока на индуктивность, но и как произведение числа витков на магнитный поток, сцепленный с катушкой [8]. Такой подход используется при выводе выражений (8), (9). Так как в выражении (6) в качестве аргументов использованы МДС, то индуктивные параметры удобнее выразить через производную потокосцеплений по МДС якоря и обмотки возбуждения. Для этого выражения (12–15) помножим и разделим на число витков соответствующих обмоток, по МДС ко-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

торых берется производная. Учитывая это, выражения для индуктивных параметров электродвигателя (12–15) примут вид

$$L_{aq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*) = 2pw_a'^2 \times \left( \frac{\partial \Phi_{dq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)}{\partial F_{\epsilon}} - \frac{\int_{F_{\epsilon}-F_{aq}^*}^{F_{\epsilon}+F_{aq}^*} (F-F_{\epsilon}) \Phi_d(F) dF}{F_{aq}^{*3}} \right); \quad (16)$$

$$M_{a-\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*) = \frac{2pw_a' w_{\epsilon}}{2F_{aq}^{*2}} \times \left( \frac{\partial \left( \int_{F_{\epsilon}-F_{aq}^*}^{F_{\epsilon}+F_{aq}^*} (F-F_{\epsilon}) \Phi_d(F) dF \right)}{\partial F_{aq}^*} \right); \quad (17)$$

$$M_{\epsilon-a}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*) = 2pw_a' w_{\epsilon} \frac{\partial \Phi_{dq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)}{\partial F_{aq}^*}; \quad (18)$$

$$L_{\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*) = 2pw_{\epsilon}^2 \frac{\partial \Phi_{dq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)}{\partial F_{\epsilon}}. \quad (19)$$

Подставляя выражение (6) в выражения (16–19) и учитывая, что

$$M_{a-\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}) = M_{\epsilon-a}(F_{\epsilon}, F_{aq}) \quad [3],$$

получим окончательный вид выражений для индуктивных параметров электродвигателя

$$L_{aq}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*) = 2pw_a'^2 \times \left( \frac{p_1}{p_2 F_{aq}^{*2}} \times \left( \frac{1 + \frac{p_2^2 F_{\epsilon}^2 - 1}{2p_2 F_{aq}^*} \times \left( \arctg(p_2 F_2) - \arctg(p_2 F_1) \right) - \frac{F_{\epsilon}}{2F_{aq}^*} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 F_2^2}{1 + p_2^2 F_1^2} \right)}{\right)} + \frac{p_3}{3} \right); \quad (18)$$

$$M_{\epsilon-a}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*) = M_{a-\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*) = -2pw_{\epsilon} w_a' \frac{p_1}{2F_{aq}^2} \times \left( \frac{F_{\epsilon} (\arctg(p_2 F_2) - \arctg(p_2 F_1)) - \frac{1}{2p_2} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 F_2^2}{1 + p_2^2 F_1^2} \right)}{\right); \quad (19)$$

$$L_{\epsilon}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*) = 2pw_{\epsilon}^2 \times \left( \frac{p_1}{2F_{aq}^*} (\arctg(p_2 F_2) - \arctg(p_2 F_1)) + p_3 \right). \quad (22)$$

Здесь необходимо обратить внимание на физическое обоснование такого индуктивного параметра, как взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и обмоткой якоря  $M_{\epsilon-a}(F_{\epsilon}, F_{aq}^*)$ . Для этого нужно определить степень магнитной связи этих обмоток. Она выражается через коэффициент связи [10]

$$K = \frac{M_{\epsilon-a}}{\sqrt{L_{aq} L_{\epsilon}}}.$$

На рис. 1 построена зависимость коэффициента связи от тока для тягового двигателя РТ-51Д.

Как видно из рис. 1, значение коэффициента связи при малых токах относительно невелико, что согласовывается с физическими процессами при возникновении реакции якоря [4, 7, 9]. При таких токах слабо проявляется насыщение магнитопровода, и реакция якоря оказывает в основном только искажающее воздействие на магнитный поток. При токах, близких к часовому, коэффициент связи достигает максимума. Это связано с тем, что край полюса, под которым происходит увеличение индукции, насыщается, а противоположный край все еще находится на ненасыщенном участке кривой намагничивания. Таким образом, увеличение магнитного потока под насыщенным краем полюса происходит не в такой же степени, как его уменьшение под противоположным краем. Это обуславливает наиболее сильное уменьшение магнитного потока относительно характеристи-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ки намагнічування холостого ходу. При даль-  
нейшем увеличении токов оба края полюса ока-  
зываются насыщенными, что вызывает умень-  
шение разности индукций, в связи с чем, реак-  
ция якоря оказывает меньшее размагничиваю-  
щее влияние на основной магнитный поток.  
Следствием этого, является уменьшение коэф-  
фициента связи.

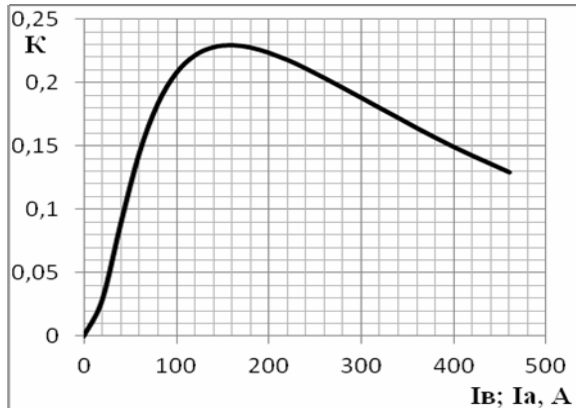


Рис. 1. Зависимость коэффициента связи  
от тока возбуждения и тока якоря

Fig.1. Dependence of coupling coefficient on excita-  
tion and armature current

Также из рис. 1 видно, что коэффициент  
связи может достигать существенных значений.  
Поэтому, несмотря на относительно малую ве-  
личину абсолютных значений  $M_{\phi-a}(F_{\phi}, F_{aq}^*)$ , по  
сравнению с  $L_{\phi}(F_{\phi}, F_{aq}^*)$  данным параметром не  
следует пренебрегать, особенно в случае ослаб-  
ления возбуждения, когда для источника пита-  
ния величина  $L_{\phi}(F_{\phi}, F_{aq}^*)$  оказывается суще-  
ственно снижена, а действие реакции якоря про-  
является сильнее.

4. *Аппроксимация УМХ выражением для ос-  
новного магнитного потока.* Как правило,  
в справочной литературе не приводится харак-  
теристика намагнічування машини  $\Phi_d(F_{\phi})$ .  
Наиболее распространенными данными явля-  
ются скоростные характеристики тяговых дви-  
гателей  $V(I_a)$  [14] и коэффициент насыщения  
в часовом режиме  $k_n$  [16].

Для каждой конкретной машины, используя  
скоростную характеристику при конкретной  
степени ослабления возбуждения (ОВ), можно  
определить основной магнитный поток и по-

строить магнитную характеристику под нагруз-  
кой  $\Phi_{dq}(F_{\phi}, F_{aq}^*)$ . Такую же характеристику  
можно построить, используя УМХ при извест-  
ном коэффициенте насыщения [13, 15], вос-  
пользовавшись одной из аппроксимирующих  
функций [5].

Как уже было сказано, на основной магнит-  
ный поток оказывает влияние не только МДС  
обмотки возбуждения, а также и МДС реакции  
якоря, уменьшая его. Следовательно, выраже-  
ние, аппроксимирующее магнитную характе-  
ристику машины при определенной степени ОВ  
(или УМХ), будет давать существенную по-  
грешность при любых других степенях ОВ.  
Чтобы устранить эту погрешность, в аппрокси-  
мирующее выражение необходимо ввести еще  
одну переменную в виде МДС реакции якоря.  
Для этого можно использовать выражение (5).

Для формулы Дрейфуса аппроксимирующее  
выражение имеет вид формулы (6).

Чтобы проверить адекватность такого ре-  
шения, необходимо оценить степень расхожде-  
ния между УМХ, заданной таблично и аппрок-  
симацией ее выражением (6), а также расчи-  
тать характеристики реально существующих  
машин в соответствии с описанной методикой.

Так как УМХ, по сути, является функцией  
одной переменной, выполнять сравнение удоб-  
но, приведя (6) также к функции одной пере-  
менной, например, тока якоря. Выбор тока яко-  
ря в качестве аргумента обусловлен большей  
наглядностью полученных результатов. В слу-  
чае выбора в качестве аргумента МДС обмотки  
возбуждения, результат будет такой же, однако  
процесс расчета характеристик требует некото-  
рых пояснений.

В связи с этим, выполним преобразования  
в выражении (6). Так как МДС обмотки возбу-  
ждения и реакции якоря являются произведе-  
нием токов, протекающих по этим обмоткам,  
на число их витков, а ток обмотки возбуждения  
может быть выражен, как произведение тока  
якоря на степень ослабления возбуждения. Та-  
ким образом, появляется возможность преоб-  
разовать выражение для основного магнитного  
потока из функции двух переменных в функ-  
цию одной переменной при заданной степени  
ослабления возбуждения.

Если  $F_{\phi} = i_{\phi} w_{\phi} = i_a \beta w_{\phi}$  и  $F_{aq}^* = w_a^* i_a$ , тогда  $F_1$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

и  $F_2$ , присутствующие в (6), преобразуются к виду

$$F_1 = F_\phi - F_{aq}^* = i_a \beta w_\phi - w_a^* i_a = i_a (\beta w_\phi - w_a^*); \quad (23)$$

$$F_2 = F_\phi + F_{aq}^* = i_a \beta w_\phi + w_a^* i_a = i_a (\beta w_\phi + w_a^*); \quad (24)$$

Учитывая (23) и (24), при заданной степени ослабления возбуждения, выражение (6) в относительных единицах принимает вид

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{dq}(\tilde{i}_a) &= \frac{p_1}{2w_a^* i_a} \times \\ &\times \left[ \tilde{i}_a (\beta w_\phi + w_a^*) \operatorname{arctg} \times \right. \\ &\times \left( p_2 \tilde{i}_a (\beta w_\phi + w_a^*) \right) - \tilde{i}_a (\beta w_\phi - w_a^*) \times \\ &\times \left. \operatorname{arctg} \left( p_2 \tilde{i}_a (\beta w_\phi - w_a^*) \right) - \right. \\ &\left. - \frac{1}{2p_2} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 (\tilde{i}_a (\beta w_\phi + w_a^*))^2}{1 + p_2^2 (\tilde{i}_a (\beta w_\phi - w_a^*))^2} \right) \right] + p_3 \tilde{i}_a \beta w_\phi = \\ &= \frac{p_1 \tilde{i}_a}{2w_a^* \tilde{i}_a} \left[ (\beta w_\phi + w_a^*) \operatorname{arctg} \times \right. \\ &\times \left( p_2 \tilde{i}_a (\beta w_\phi + w_a^*) \right) - (\beta w_\phi - w_a^*) \times \\ &\times \left. \operatorname{arctg} \left( p_2 \tilde{i}_a (\beta w_\phi - w_a^*) \right) - \right. \\ &\left. - \frac{1}{2p_2} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 (\tilde{i}_a (\beta w_\phi + w_a^*))^2}{1 + p_2^2 (\tilde{i}_a (\beta w_\phi - w_a^*))^2} \right) \right] + p_3 \tilde{i}_a \beta w_\phi \end{aligned} \quad (25)$$

где  $\tilde{\Phi}_{dq}$  и  $\tilde{i}_a$  – основной магнитный поток и ток якоря машины в относительных единицах.

Как показывает опыт тягового электромашиностроения, отношение числа витков обмотки якоря и обмотки возбуждения (о.я.в.) для различных машин представляет собой значения, довольно близко колеблющиеся относительно какого-то среднего числа. Причем, оно различно для компенсированных и некомпенсированных машин вследствие большего числа витков обмотки возбуждения у последних. В соответствии с этим выражение (25) можно упростить, избавившись от  $w_a^*$  путем вынесения в выражениях (23) и (24)  $w_\phi$  за скобки и заменой о.я.в. их средним числом.

Средним числом о.я.в. для некомпенсированных машин является 0,316. Тогда выражение (25) принимает вид:

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_{dq}(\tilde{i}_a) &= \frac{p_1}{2} \left[ \frac{w_\phi}{w_a^*} \left( \beta + \frac{w_a^*}{w_\phi} \right) \operatorname{arctg} \times \right. \\ &\times \left( p_2 \tilde{i}_a w_\phi \left( \beta + \frac{w_a^*}{w_\phi} \right) \right) - \\ &- \frac{w_\phi}{w_a^*} \left( \beta - \frac{w_a^*}{w_\phi} \right) \operatorname{arctg} \times \\ &\times \left( p_2 \tilde{i}_a w_\phi \left( \beta - \frac{w_a^*}{w_\phi} \right) \right) - \\ &- \frac{1}{2p_2 \tilde{i}_a w_a^*} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 \left( \tilde{i}_a w_\phi \left( \beta + \frac{w_a^*}{w_\phi} \right) \right)^2}{1 + p_2^2 \left( \tilde{i}_a w_\phi \left( \beta - \frac{w_a^*}{w_\phi} \right) \right)^2} \right) \right] + \\ &+ p_3 \tilde{i}_a \beta w_\phi = \\ &= \frac{p_1}{2} \left[ \frac{1}{0,316} (\beta + 0,316) \operatorname{arctg} \times \right. \\ &\times \left( p_2 \tilde{i}_a w_\phi (\beta + 0,316) \right) - \\ &- \frac{1}{0,316} (\beta - 0,316) \operatorname{arctg} \times \\ &\times \left( p_2 \tilde{i}_a w_\phi (\beta - 0,316) \right) - \\ &- \frac{1}{2p_2 \tilde{i}_a w_a^*} \ln \times \\ &\times \left. \left( \frac{1 + p_2^2 (\tilde{i}_a w_\phi (\beta + 0,316))^2}{1 + p_2^2 (\tilde{i}_a w_\phi (\beta - 0,316))^2} \right) \right] + p_3 \tilde{i}_a \beta w_\phi. \end{aligned} \quad (26)$$

Видно, что в выражении (26) в слагаемом, содержащем логарифм, не удалось избавиться от  $w_a^*$ . Однако, как показали расчеты выражения (26) для разных машин, значения слагаемого

$$\frac{1}{2p_2 \tilde{i}_a w_a^*} \ln \left( \frac{1 + p_2^2 (\tilde{i}_a w_\phi (\beta + 0,316))^2}{1 + p_2^2 (\tilde{i}_a w_\phi (\beta - 0,316))^2} \right), \quad (27)$$

остаются одинаковыми во всем диапазоне зна-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

чений тока. Следовательно, каждый раз при расчете характеристик по УМХ, учет  $w_a^*$  в выражении (27) можно не производить. Для этого достаточно получить коэффициент аппроксимации  $p_2$  для любой существующей некомпенсированной машины и подставить его в (27) вместе с числом витков обмотки возбуждения этой машины. Например, для двигателя РТ-51Д  $p_2 = -0,088$ ,  $w_e = 68$ , а произведение  $2p_2w_a^* = -3,342$ .

Расчет характеристик ТЭД по выражению (26), а также, применение его для расчета характеристик компенсированных машин будет рассмотрено в последующих работах. Там же в последующих работах будут рассмотрены примеры расчета характеристик, в случае если аргументом в (25) является МДС обмотки возбуждения.

## Результаты

Получено выражение для аппроксимации УМХ которое зависит от двух переменных: МДС возбуждения и МДС реакции якоря. Для конкретного режима ослабления возбуждения возможно преобразование данного выражения в функцию одной переменной, например, тока

якоря. Также, в качестве аргумента, может выступать МДС обмотки возбуждения.

## Научная новизна и практическая значимость

Для аппроксимации УМХ предложена методика, позволяющая ввести в аппроксимирующее выражение вторую переменную в виде МДС реакции якоря. Таким образом, на базе одного аппроксимирующего выражения может быть получено семейство характеристик при любой степени ослабления возбуждения.

## Выводы

Предложенная методика позволяет определять основной магнитный поток тягового электродвигателя (ТЭД) для любой степени ослабления возбуждения, располагая магнитной характеристикой холостого хода или, в случае использования УМХ, только коэффициентом насыщения машины. Также, появляется возможность определить индуктивные параметры машины в виде аналитических функций, что удобно для моделирования различных режимов работы ТЭД.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасов, А. М. Аппроксимация магнитных характеристик тяговых двигателей электроподвижного состава / А. М. Афанасов // Електромагнітна сумісність та безпека на заліз. 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. – 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. 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 электромеханических 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. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины : учеб. для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – Москва : Энергия, 1980. – 928 с.
8. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей : справ. книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
9. Костенко, М. П. Электрические машины : в 2 ч. : учеб. для студ. высш. техн. заведений / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. – Ленинград : Энергия, 1972. – Ч. 1: Машины постоянного тока. Трансформаторы. – 544 с.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

10. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки : підручник в 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2006. – 336 с.
11. 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.
12. Моделирование тягового электропривода с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения / А. А. Шавелкин, И. А. Костенко, В. А. Герасименко, А. Н. Мовчан // Восточно-Европ. журн. передовых технологий. – 2016. – № 1 (2). – С. 42–48. doi: 10.15587/1729-4061.2016.60322.
13. Находкин, М. Д. Универсальная магнитная характеристика / М. Д. Находкин, В. С. Хвостов // Вестн. электропромышленности. – 1958. – № 1. – С. 44–48.
14. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – Москва : Транспорт, 1985. – 287 с.
15. 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.
16. Справочник по электроподвижному составу тепловозам и дизель-поездам / под ред. А. И. Тищенко. – Москва : Транспорт, 1976. – 432 с.
17. 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.
18. 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 Conference on Neural Networks (IJCNN) (18.07–23.07.2010). – Barcelona, Spain, 2010. – P. 1515–1520. doi: 10.1109/IJCNN.2010.5596331.
19. 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.
20. 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.
21. Electromechanical Coupled Vibration between Traction Motor and Bogie of High-Speed Train / Z. Zhang, X. Zhao, X. Li [et al.] // Proc. of the 6th 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@mail.ru, ORCID 0000-0001-5691-0925

## АПРОКСИМАЦІЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ МАГНІТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

**Мета.** У науковій роботі передбачається отримати аналітичний вираз, що описує універсальну магнітну характеристику та дає можливість враховувати розмагнічуючу дію реакції якоря. А на базі універсальної магнітної характеристики необхідно отримати універсальні вирази для індуктивних параметрів тягових електричних машин постійного та пульсуючого струмів. **Методика.** Універсальна магнітна характеристика (УМХ) являє собою залежність у відносних одиницях магнітного потоку від магніторушійної сили (МРС) обмотки збудження. Так як УМХ побудована для машин, що працюють під навантаженням, отже, насправді вона являє собою залежність і від МРС обмотки збудження, і від МРС реакції якоря. Для розрахунку електромеханічних характеристик при незмінному збудженні можна користуватися одним із відомих виразів, апроксимуючих УМХ. Однак при моделюванні роботи тягового електродвигуна в широкому діапазоні зміни збудження необхідний вираз, в якому присутня друга змінна у вигляді МРС реакції якоря. Такий вираз також необхідний для визначення індуктивних параметрів тягового електродвигуна, у великій мірі залежних від струму. Вираз для апроксимації УМХ з двома змінними можна отримати шляхом аналізу розподілу магнітного поля в повітряному зазорі на розрахунковій полюсній дузі. **Результати.** Автором отриманий вираз для апроксимації УМХ, який залежить від двох змінних: МРС порушення і МРС реакції якоря. Для конкрет-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

ного режиму ослаблення збудження можливо перетворення цього виразу в функцію однієї змінної, наприклад, струму якоря. Також в якості аргументу може виступати МРС обмотки збудження. **Наукова новизна.** Для апроксимації УМХ запропонована методика, що дозволяє ввести в апроксимуючий вираз другу змінну у вигляді МРС реакції якоря. **Практична значимість.** Маючи в наявності швидкісну характеристику або коефіцієнт насичення даного тягового електродвигуна, можна визначити його індуктивні параметри в конкретному режимі роботи або отримати їх залежність від струмів обмоток для будь-якого режиму роботи.

**Ключові слова:** універсальна магнітна характеристика; апроксимація; тяговий електродвигун; індуктивні параметри

A. YU. 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 (056) 373 15 31, e-mail drubetskiy@mail.ru, ORCID 0000-0001-5691-0925

## APPROXIMATION OF UNIVERSAL MAGNETIC CHARACTERISTIC FOR MODELLING ELECTRIC TRACTION MACHINES

**Purpose.** The scientific work is aimed to obtain an analytic expression describing universal magnetic characteristic and enabling to take into account the demagnetizing effect of the armature. On the basis of the universal magnetic characteristics one need to obtain universal expressions for inductive parameters of electric traction machines of direct and pulsating currents. **Methodology.** A universal magnetic characteristic (UMC) is the dependence of the relative units of the magnetic flux on the magnetomotive force (MMF) of the excitation winding. Since MMF was built for machines operating under load, therefore, in fact it is a dependency on the MMF and on the MMF of the armature reaction. For the calculation of electromechanical characteristics at constant excitation one can use one of the well-known expressions approximating the UMC. However, during modeling the electric traction engine operation in wide ranges of excitation change it is necessary the expression, in which there is a second variable in the form of MMF of the anchor reaction. Such an expression is also necessary to determine the inductive parameters of electric traction engine, to a large extent dependent on the current. The expression for the approximation of the UMC with two variables can be obtained by analyzing the magnetic field distribution in the air gap at the calculated pole arc. **Findings.** The author obtained expression for approximation of the UMC, which depends on two variables: MMF of excitation and MMF of armature reaction. For a particular mode of excitation weakening it is possible to convert the expression into the function of one variable, for example, the anchor current. Also, the MMF of excitation winding can be the argument. **Originality.** For the UMC approximation it was proposed a methodology that makes it possible to record into approximating expression the second variable in the form of the anchor reaction MMF. **Practical value.** Due to the presence of speed characteristic or saturation ratio of this electric traction engine, one can determine its inductive parameters in a particular operation mode or to obtain their dependencies on the winding currents for all modes of operation.

**Keywords:** universal magnetic characteristics; approximation; electric traction engine; inductive parameters

### 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.
3. Belman, M. K. (1975). *Perekhodnyye protsessy v mikrodvigatelyakh 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.



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

7. Ivanov-Smolenskiy, A. V. (1980). *Elektricheskiye mashiny*. Moscow: Energiya.
8. Kalantarov, P. L., & Tseytlin, L. A. (1986). *Raschet induktivnostey: spravoch'naya kniga* (3rd ed.). Leningrad: Energoatomizdat.
9. Kostenko, M. P., & Piotrovskiy, L. M. (1972). *Mashiny postoyannogo toka. Transformatory: Elektricheskiye mashiny* (3rd ed.). Leningrad: Energiya.
10. 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.
11. 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.
12. 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
13. Nakhodkin, M. D., & Khvostov, V. S. (1958). Universalnaya magnitnaya kharakteristika. *Vestnik elektropromyshlennosti*, 1, 44-48.
14. All-Soviet Union Research Institute of Railway Transport. (1985). *Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoy raboty*. Moscow: Transport.
15. Nakhodkin, M. D., Vasilenko, G. V., Bocharov, V. I., & Kozorezov, M. A. (1976). *Proyektirovaniye tyagovykh elektricheskikh mashin*. Moscow: Transport.
16. Tishchenko, A. I. (Ed.). (1976). *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu teplovozm i dizel-poyezdam*. Moscow: Transport.
17. Castaneda, C. E., Loukianov, A. G., Sanchez, E. N., & Bernardino, C.-T. (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
18. 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
19. Hayek, E. J., Sobczyk, T. J., & Skarpetowski, G. (2010). Experiences with a traction drive laboratory model. *Electromotion*, 17(1), 30-36.
20. 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*. Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group.
21. 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 6th 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

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. Г. К. Гетьманом (Україна); д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабцом (Україна)

Поступила в редколлегию: 17.10.2016

Принята к печати: 11.01.2017

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

UDC 656.224-026.512.1

M. B. KURHAN<sup>1</sup>, D. M. KURHAN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Roads Design and Construction», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel./fax +38 (056) 373 15 48, e-mail kunibor@mail.ru, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2\*</sup>Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurgan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

### FORECASTING OF PASSENGER TRAFFIC UPON IMPLEMENTATION OF HIGH-SPEED RUNNING

**Purpose.** Forecasting of passenger traffic flows in the future is an essential and integral part of the complex process of designing of high-speed network (HSN). HSN direction and its parameters are determined by the volume of passenger traffic, the estimated value of which depends on the economic performance of the country, as well as the material status of citizens living in HSN concentration area, transport mobility of population, development of competing modes of transport and so on. The purpose of this work is to analyse the existing methods of passenger traffic forecasting, to evaluate errors of the existing models concerning determination of traffic volumes and to specify the scientific approach to the development of high-speed rail transport in Ukraine. **Methodology.** The existing forecasting methods are reduced to the following ones: Delphi approach, extrapolation method, factor and correlation analysis, simulation method. The method described in this paper is based on scientific approaches such as analysis – a comprehensive and detailed study of various aspects of the known forecasting methods, comparing of existing methods for establishing differences and similarities, as well as deduction – use of general knowledge to get the new particular one. Thus, the unified indicators determined for the country as a whole, such as gross domestic product, national income, total population and others cannot be used to forecast the traffic flow on specific areas of HSN construction. Therefore, it is necessary to move from the overall forecast to traffic volume forecast on particular direction. **Findings.** The conclusions are derived from the analysis of different approaches and methods of passenger flow forecasting. It is proposed to create typical techniques of traffic flow forecasting using modern mathematical methods that would allow avoiding unreasonable decisions and shortening project development time. The resulting recommendations will help in the efficiency of design decisions, as well as will determine the quality of the project in whole and the feasibility of its implementation in particular. **Originality.** The scientific approaches to forecasting the passenger traffic volume in HSN agglomeration area were further developed. The HSN feasibility study criteria system was updated; this system takes into account passenger transit flows through Ukraine, the population of the cities covered by the high-speed network, mobility of population and other factors. **Practical value.** The data obtained by authors can be used to justify the concept of high-speed rail transport development in Ukraine, to create a high-speed network and to phase HSN construction.

**Keywords:** high-speed running; high-speed network; passenger traffic volume; passenger traffic flow; forecasting methods; economic efficiency

#### Introduction

The foreign studies on the efficiency analysis of high-speed network projects performed in different countries state that the transport corridor

provided for HSN construction must have certain socio-economic characteristics. The total population of HSN concentration area must be at least 20–25 million people, and the overall total passenger

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

traffic flow (in both directions), formed in this transport corridor prior to the start of HSN operation, shall be not less than 5.6 million passengers per year [17].

Significant factors that determine the success of HSN projects are economic indicators of development of the country and the specific areas of transport corridors, as well as financial situation of the citizens who live in HSN concentration area. One of the economic criteria that characterize the financial situation of citizens is gross domestic product (GDP). If the value of GDP is divided by population size, we will get the index represented in Fig. 1. Yet this average index for a country does not determine the feasibility of implementing high-speed transport. For example, in China, it is the lowest – 5.4 million dollars per person, but the country's success in HSN construction is impressive.

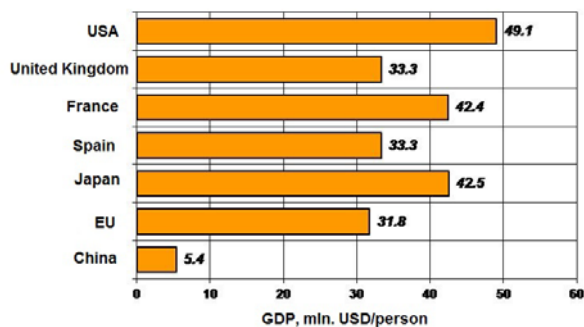


Fig. 1. Gross domestic product, per person

Thus, the HSN project efficiency must be assessed, first, in light of the financial situation of the citizens living in HSN concentration area, secondly, based on GRP indicator, which is calculated by subtracting from the total gross product (GDP) the volume of its intermediate consumption and which fully characterizes the economic activity of the city or region. Using statistics on this indicator one can predict the potential for economic development, and accordingly determine the possibility of the construction and operating conditions of future HSN network sections [9].

In Ukraine GRP is calculated using the mixed method i.e. part of the data is accumulated by regional statistical agencies and transferred to the centre and other part is collected by the State Statistics Committee and other economy sectors.

The relationship of the passenger traffic volume with the above mentioned factors allows predicting

the prospective passenger flow and evaluating efficiency of introduction of high speed traffic in a particular direction.

The distribution of passenger traffic by mode of transport takes place on a market basis, depending on the cost of the trip, travel time, geographical availability of transport infrastructure and other factors. As a result, zones of efficient use of different transport means are formed. At the junctions of these areas there is competition between transport modes (interspecific competition) [15]. In addition, there is intraspecific competition (competition between individual companies representing the same mode of transport).

Dependence published by the International Union of Railways [17] and clarified with a number of additional data is shown in Fig. 2. It shows the current distribution of passenger flows between the air transport and HSN based on travel time by rail.

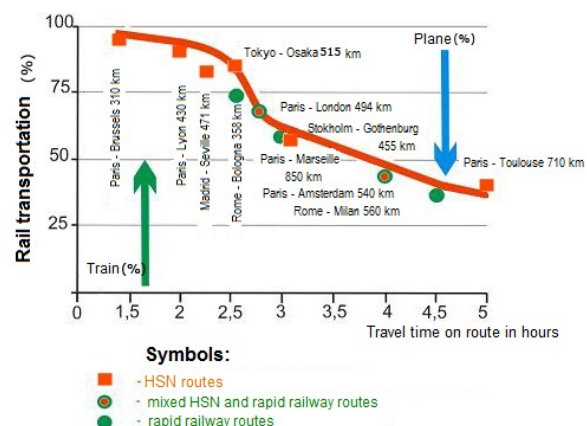


Fig. 2. Distribution of passenger traffic flow between high-speed rail and air transport

One of the important principles of ideology, which is laid in the assessment of options for the distribution of traffic, is based on forming of passenger flows and velocity of the passenger, not of the rolling stock [17].

Today there are a lot of research works that assess and consider the ways of further development of the trans-European high-speed rail network. One of these projects is NGT (Next Generation Train) developed by eight institutes of the German Air and Space Centre (DLR) [13]. The basic idea of NGT is to determine the operating domain of HSN in Europe, designed for a new generation of trains (NGT) with the speed of 400 km/h. The network model covers most of European countries, including Turkey.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

The project NGT investigated the reference direction Paris-Vienna, the model of which is extended to the entire European Union, with recommendations for further adjustments. The basic components and criteria of the model included economic centres (cities), direct rail connections, train traffic frequency and travel time. Herewith traffic volumes and density of population of cities were calculated and regional preferences of passengers by transport means and others were taken into account. The resulting transport model allowed forming the recommended operating domain of the network of new railway lines, proving feasibility of HSN construction for the speed of 400 km/h in Central Europe.

### Purpose

The question is: will this European transport model work in other circumstances and in other countries, such as Ukraine? Obviously, in this case, one must take into account an individual approach to solving a complex of tasks.

The purpose of this work is to analyse the existing methods of passenger traffic forecasting, to evaluate errors of the existing models concerning determination of traffic volumes and to specify the scientific approach to the development of high-speed rail transport in Ukraine.

### Methodology

HSN operating domain being the object of study can be presented as a set of peaks and links between these peaks. In their turn, the peaks are cities (metropolitan areas) that are key links in the network [3].

Both the peaks and the links between them have their own indices or evaluation criteria (social, economic, political, tourism, transport, etc.). For example, social criteria include population size, life expectancy, health conditions or pollution of the environment. Socio-economic factors determine the location of the so-called «strong points», including the intermediate ones, through which or near which HSN must pass.

Economic indicators are as follows: level of welfare, income per capita, gross regional product. Political relations are determined by the location of urban administrative centres, with their status and popularity (conducting of cultural events, conferences, sport competitions), etc. Travel links in-

clude business, cultural, recreational and other trips. Transport links are characterized by the presence or absence of certain means of transport by directions (road, rail, air, etc.), the mobility of the population, passenger traffic flow (transit and domestic), etc.

Within the large stations and units, particularly terminals, the high-speed network route should be connected to the network with other modes of transport: urban, commuter and air transport. Results of approvals from government and business entities may require changing the position of the line, even at the next stages of design.

When examining the operating domain for future HSN it is appropriate to consider the destinations that already have rail lines. Transport streams at these directions are the most intense [14]. Thus, the presence of the railway is one of the criteria for determining the areas for potential high-speed trains.

With a view to selecting of HSN feasibility study criteria assess for a specific region it is necessary to conduct deep investigation of the above factors, to develop appropriate methods of decision-making. A step in this direction is the classification of the main criteria for determining HSN destinations, specified in [10], Fig. 3.

*The first group of criteria* describes the agglomeration which tends to projected HSN. Stable growth and tendency of indices to the maximum possible values will ensure favourable environment for construction and in the future for operation of HSN.

*The second group of criteria* describes the technical and economic potential of destinations of the prospective HSN. The line length varies usually from 400 to 900 km for the purpose of being competitive with air service. [15, 16] The HSN construction cost depends on the line length and on the complexity of construction conditions. According to international estimates the average cost of 1 km of high-speed network is about 25 million Euro [18].

Forecasting of passenger traffic flows in the future is an essential and integral part of the complex process of designing of HSN. HSN direction and its parameters are determined by the volume of passenger traffic. Therefore, the methods for determining the latter are subject to analysis and refinement. Also it should be noted that increasing of passenger traffic flow will enhance the overall economic effect of the introduction of high-speed traffic.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Many scientific papers are dedicated to forecasting of passenger flows. Deep analysis of different models and approaches is presented in [11]. It is appropriate to quote the saying by prof. M. V. Pravdin of this work: «So far, the passenger rail transport forecasting has been neglected, as a result there is no sufficiently strong justification for development of passenger high-speed transport...». It was written more than thirty years ago, but has not lost relevance today.

The existing forecasting methods are reduced to the following ones: Delphi approach, extrapolation method, factor and correlation analysis and state and event simulation method.

The first attempts to use mathematical methods appeared in the late nineteenth century, when A. Wellington (USA) and E. Lille (Austria-Hungary) attempted to establish a mathematical relationship between traffic size, population of corresponding points and distance between them. Later modifications of this model were proposed, which were called «gravity» [11].

These models are based on the assertion that there is transport «attraction» between two large settlements, which is directly proportional to the product of the population of these settlements and inversely proportional to the distance between them in degree  $\beta$

$$\Pi_{ij} = \alpha_{ij} \frac{P_i \cdot P_j}{L_{ji}^\beta}, \quad (1)$$

where  $\Pi_{ij}$  – flow from point  $i$  to point  $j$ ;  $P_i, P_j$  – population size respectively at the points  $i, j$ ;  $L_{ij}$  – distance between two points;  $\alpha_{ij}$  – proportionality factor;  $\beta$  – constant value.

Slightly adjusted dependence was proposed by M.I. Zahordan and F.P. Kravets:

$$\Pi_{ij} = \alpha_{ij} \frac{P_i \cdot P_j}{L_{ji}^2}. \quad (2)$$

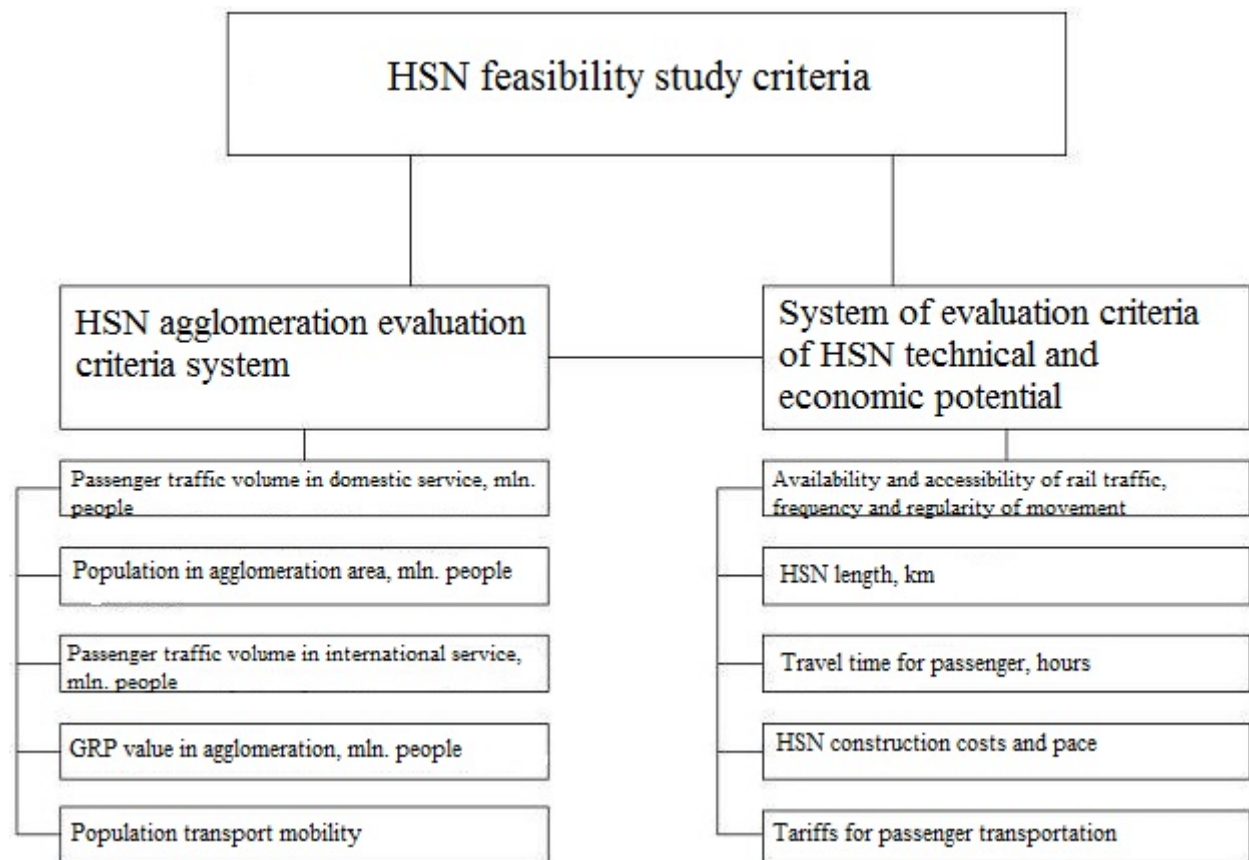


Fig. 3. Classification of the main criteria to determine promising areas of HSN construction

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

They believed that the number of passengers is directly proportional to the product of population of two settlements and inversely proportional to the square of the distance between them.

In these models it is still difficult to determine the proportionality factor  $\alpha_{ij}$  for long-range conditions, since the factor changes significantly over time. Thus, calculated on the basis of statistical data on passenger correspondence between individual points the factor ranged from 0.001 to 0.475. This is due to the effect of the statistical law of passenger behaviour that can be formulated as follows: to overcome the distance  $x$  from the point of view of a passenger it takes some reasonable time, which is associated with scientific and technological progress in transportation. Mathematically the law can be written as

$$\frac{x}{v(x, t)} = a(t), \quad (3)$$

where  $v(x, t)$  – speed, which depends on the distance of travel and technological progress (rolling stock, infrastructure) and is taken into account through the time factor  $t$ ;  $a(t)$  – constant value.

For example, if the average time to overcome the distance of 100 km by high speed train TGV POS climbing 35 ‰ slope is 30 min., then to overcome 1000 km the time increases not by ten, but 9 times, and on the gradient-free sections – 8 times.

The main disadvantage of this model is the high sensitivity to errors while calculating the value  $\alpha_{ij}$  and inability to verify the reliability of the forecasted model.

A number of studies attempted to overcome some of these disadvantages of «gravity» models. In particular, they examined such factors as gross domestic product, national income and others. The linear model was proposed for forecasting, the defining parameters included national income, total population, urban and rural population. As shown above (see Fig. 1) the generalized parameters set for the country as a whole cannot be used to forecast the traffic flow in specific directions.

It should be noted that the models developed as «gravity» ones have found wide application. So, with the participation of experts of SYSTRA Company (France) in 2002 there were investigated the prerequisites for implementation of high-speed

trains in Ukraine, identified possible routes for high-speed rail lines based on passenger traffic volume forecasting [12].

Passenger traffic volume was calculated according to the formula

$$F_{AB} = k_m \frac{P_A \cdot P_B}{f(L_r, T_t)}, \quad (4)$$

where  $k_m$  – model coefficient.

The formula (4) shows that the passenger traffic volume  $F_{AB}$  between two final destinations  $A$  and  $B$  depends on the number of people living in final destinations  $P_A, P_B$ , frequency of trips  $f$ , length of the route  $L_r$  and duration of trip by high-speed train  $T_t$  between the cities  $A$  and  $B$ .

Analysis of formulae (1) and (2) shows that they do not take into account transit passenger flow, which is advisable to transfer partially to high-speed connection. In addition, the consultant of SYSTRA does not reveal the real dependence, included in the denominator of the formula (4).

Conditions for major transit passenger flows are created due to vectors of modern relations of Ukraine with the EU, Belarus, the Baltic States, Central Asia and the Caucasus [8]. In this case, a special place is the study of *population transport mobility* index. It is believed to be the average number of trips per capita per year by all modes of transport, particularly by rail. In the rail transport segment the mobility factor is determined by the ratio of number of passengers transported by rail per year  $P$  to the average annual population of the region  $N$ , served by this rail:

$$k_{mob}^P = \frac{P}{N}. \quad (5)$$

### Findings

The authors analysed the dynamics, trends of passenger traffic and calculated the mobility indices by the formula (5) (Table 1). The forecasted population in 2020 is adopted according to JSC «Ukrzaliznytsia» [1] and the number of outgoing passengers – according to [5].

As the table 1 shows, the calculated long-distance traffic index  $k_{mob}^P$  differs significantly by rail (regions) and ranges from 0.9 to 2.28; it is in average 1.5 trips per year.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

Unlike the formula (4), used by SYSTRA, the work [2] presents the formula to calculate the forecasted passenger traffic volume, which takes into account passenger transit flows through Ukraine and the population in the cities covered by the high-speed network:

$$F_{AB} = 2 \frac{(P_A + T_A) \cdot (P_B + T_B)}{P_{HSN} + T_{HSN}} \cdot k_{mob}^p \cdot k_t \cdot k_{add} \quad (6)$$

where  $F_{AB}$  – forecasted annual number of passengers between two cities  $A$  and  $B$ , ths people;  $P_A$ ,  $P_B$  – population of the cities  $A$  and  $B$  accordingly, ths people;  $T_A$ ,  $T_B$  – transit passenger flow through station  $A$  and reverse movement from station  $B$ , ths people;  $P_{HSN}$  – total number of people at all stations of high-speed network, ths people;  $T_{HSN}$  – transit passenger flow through all stations of high-speed network, ths people;  $k_{mob}^p$  – population mobility in Ukraine on HSN, share;  $k_t$  – coefficient taking into account travel time of passengers on a given section according to the average length of the trip – 4 hours, which varies from 0.75 to 1.25, share;  $k_{add}$  – coefficient additionally tak-

ing into account frequency of passenger's travel on a given section (business trip, change to the airplane, vacation, tourism), which varies from 0.75 to 0.9 for the regional cities with population of up to 600 thousand and the cities of Kriviy Rig, Melitopol and Mariupol, 0.9 – 1.1 for the regional cities with population of up to 600-1000 thousand and the cities of Lviv and Kharkiv, 1.3 – 1.5 for the cities of Kyiv, Simferopol and Odessa.

The coefficient  $k_t$  takes into account the travel time of passengers between specific cities and significantly affects the demand for HSN. For example, travel time from Lviv to Simferopol will be about 6 hours. At the same time, travel time between Kyiv and Dnipropetrovsk will be reduced to two hours. Because of this difference in time the demand for the use of high-speed network can vary by almost in half. These data are recorded in France and other European countries. Experience in operating speed trains in Ukraine in 2013 showed that demand for passenger transportation between Kharkiv and Kyiv 1.5 times higher than that between Donetsk and Kyiv as the difference in travel time is 1.5 hours.

Table 1

## Population mobility in long distance rail traffic

Railways	Number of residents in the territory, ths people	Passengers transported, ths people		Mobility factor	
		total	long distance traffic	overall	long distance traffic
<b>Ukraine</b>	<b>42 400</b>	<b>448 436</b>	<b>62 519</b>	<b>10.58</b>	<b>1.47</b>
Lviv	8 493	65 223	9 133	7.68	1.08
Pivdenno-Zakhidna (Southwestern)	8 882	139 116	20 263	15.66	2.28
Pivdenna (Southern)	4 769	69 430	8 091	14.56	1.70
Pryniprovskia (Near-Dnipro)	7 125	77 836	11 311	10.92	1.59
Odessa	6 894	34 580	8 021	5.02	1.16
Donetsk	6 329	62 252	5 699	9.84	0.90



## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

However, the factor  $k_{mob}^p$  that determines the population mobility needs clarifying because mobility in different regions is different.

In addition, the formula (6) is not without drawbacks. Let us consider a specific example. Fig. 4 shows two variants for high-speed lines between Kyiv and Lviv. The population that lives in urban areas (thousand people) is shown in the diagram. Transit is adopted the same for both variants – 50 thousand people per year. The results by the formula (6), i.e. the projected number of passengers, are as follows: in case of the northern variant – 1 million people a year, the southern variant – 850 thousand people a year, that is not logical as the overall population at all the stations of high-speed network in southern variant is bigger and the passenger traffic flow is smaller. So the formula (6) does not include cases where the transit passenger flow has a significant share.



Fig. 4. Variants for high-speed network with population of cities

Currently, the most developed are extrapolation methods, involving transfer of the trends observed in the past into the future. This approach is possible due to the inertia properties of different processes.

Transport mobility of the population can be characterized either by number of trips per capita per year (mobility factor) or by the average number of passenger-kilometres per inhabitant per year – use of passenger transport services by one resident.

Volume of passenger traffic is calculated using the mobility index that takes into account the frequency of trips per year per inhabitant of the related area.

Getting of qualitatively new effect in the forecasting practice is associated with the use of factor and correlation analysis. So, to check the relation of population incomes with mobility index the work [9] presents the correlation analysis, the results of which revealed that there is quite close de-

pendence of the mobility index on the value of disposable real incomes of the population.

The authors also believe that the most generalized and complete definition of transport mobility should be considered not the number of trips regardless the travel distance, but passenger-kilometres per capita, i.e.

$$k_{mob}^{pkm} = \frac{\sum(p_i \cdot l_i)}{N}, \quad (7)$$

where  $\sum(p_i \cdot l_i)$  – passenger traffic flow of railways, mln pass.-km.

To compare trends in transport mobility and incomes, Fig. 5 and 6 show the results obtained in [7], and Table 2 and Fig. 7 – calculations performed before the year 2015. Column 5 shows the population mobility indices, calculated by the formula (7).

One of the most accurate ways to assess the economic development of the state is considered gross domestic product (GDP), and for population the real income is that cited in statistics as nominal one (reproduced at current prices of this year – c. 6) and real one (adjusted for inflation – c. 7).

The performed correlation and regression analysis showed that the correlation coefficient between them is  $r_{mob}=0.882$ . The linear regression equation, which allows calculating the average standard value of mobility ( $k_{mob}^{pkm}$ ) on the value of disposable real income per capita ( $D$ ), is as follows:

$$k_{mob}^{pkm} = 1046.6 + 0.00876 \cdot D, \quad (8)$$

where the regression coefficient 0.00876 represents more or less uniform chain growth of mobility in arithmetic progression. This means that the change in disposable real income per capita by 1 UAH increases rail transport mobility by 8.76 pass.-km per person. The authors of the work [9] believe that the revealed tendencies (Equation 8) can allow forecasting the disposable real incomes and mobility per person. Their forecast for 2015 is as follows: mobility per capita – 1242 pass.-km, disposable real income per capita – 20.9 thousand UAH. Comparison with factual data for 2015 showed that neither the first nor the second index was not confirmed: mobility per capita made 835 pass.-km, and the real income – about 24 thousand UAH/person.



Table 2

**Calculation of transport (by railways) mobility of the population**

Years	Passenger traffic flow of railways, mln pass.-km	Total income f population, mln UAH	Population size in Ukraine, people	Population mobility, pas.- km / per person	Nominal income UAH/ per person	Real incomes, UAH/ per person
2000	51 800	128 736	49 430	1 048	2 631	2 180
2001	52 700	157 996	48 923	1 088	3 261	2 490
2002	50 400	185 073	48 457	1 040	3 855	2 938
2003	52 200	215 672	48 004	1 087	4 529	3 400
2004	51 800	274 241	47 622	1 088	5 800	4 468
2005	52 400	381 404	47 281	1 108	8 127	6 332
2006	53 400	472 061	46 930	1 135	10 120	7 771
2007	53 400	623 289	46 646	1 145	13 362	10 126
2008	53 225	845 641	46 373	1 148	18 326	13 716
2009	48 327	894 286	46 053	1 049	19 454	14 091
2010	50 240	1 101 175	45 870	1 095	24 006	17 285
2011	50 569	1 266 753	45 693	1 107	27 723	19 683
2012	49 203	1 457 864	45 577	1 080	31 987	22 711
2013	48 876	1 548 733	45 483	1 075	34 051	23 836
2014	37 065	1 516 768	43 722	848	34 691	24 284
2015	35 913	1 520 000	43 000	835	35 349	24 037

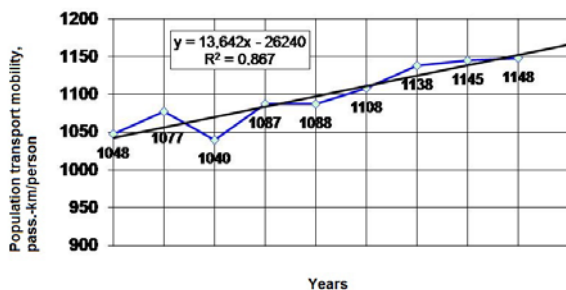


Fig. 5. Transport mobility of the population between 2000 and 2008

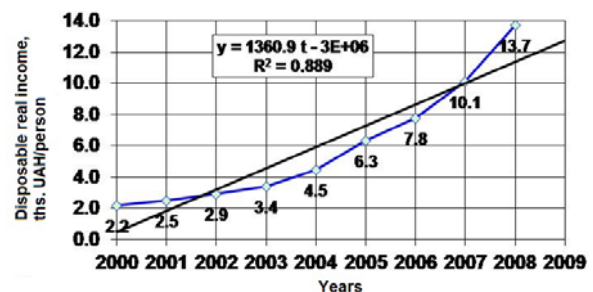


Fig. 6. Real income of the population between 2000 and 2008

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

This can be explained by the following (see Fig. 5 and 7): transport mobility of the population had been increasing by the year 2008, but has decreased in the following years. At the same time, the dynamic of growth of disposable income of the population was positive.

In Ukraine, the first step to improve the quality of transport services was the introduction of rapid trains (Intersiti+ trains): since May 15, 2012 on the section Kyiv – Kharkiv, Kyiv – Lviv, Kyiv – Donetsk; since November 11, 2012 the high-speed train was introduced on the section Kyiv – Dnipropetrovsk, and since May 2013 this route was extended to Zaporizhzhia; in 2014 the following high-speed directions were opened: Kyiv – Odesa, Kyiv – Ternopil, Darnytsia – Truskavets.

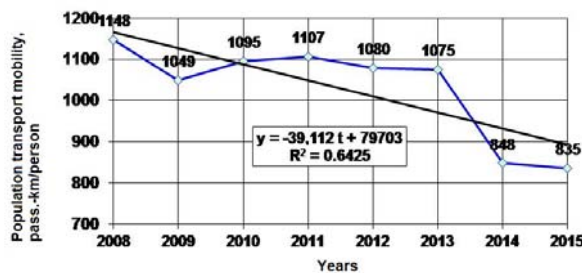


Fig. 7. Transport mobility of the population between 2008 and 2015

The main purpose of new HSN is to provide large volumes of passenger traffic between two or more regional cities and their agglomeration areas with minimal time loss by passengers. The involvement of large settlements to the chosen direction of HSN is determined by the amount of passenger traffic and revenues from the operation.

Future HSN concentration areas in Ukraine [12], including the following cities and economic and tourist centres:

- Kyiv (capital of Ukraine) and the Kyiv region, Kyiv has about 2.9 million inhabitants;
- Regions of Kharkiv and Poltava, Ukrainian cities with about 2.0 million inhabitants;
- Dnipropetrovsk (now Dnipro), Dniprodzerzhinsk (now Kamianske), Zaporizhzhia and Kryvyi Rih – about 3 million inhabitants;
- Donbas, economic activity in large cities such as Donetsk (about 1 million inhabitants), Luhansk (500 thousand inhabitants), Mariupol (about 500 thousand inhabitants), etc.

Tourist regions – Odesa (over 1 million people) Mykolaiv (500 thousand people), Kherson (300 thousand people), Sevastopol and Simferopol (about 700 thousand people).

West Region. Lviv has 730 thousand residents, while in the region – more than 2.5 million inhabitants.

Zakarpattia region is located on the edge of Western Ukraine immediately adjacent to 4 countries: Poland, Slovakia, Hungary and Romania. Zakarpattia, as of 2015 there are more than 250 resorts of different concepts and sightseeing sites of tourism and recreation.

Ukraine is among the countries with high population density (79 people per 1 km<sup>2</sup>). This is a fairly high rate, indicating a generally favourable living conditions and high level of territory development. For comparison, the population density in Russia per 1 km<sup>2</sup> is 8.4 persons, in Republic of Belarus – 47.9 persons, in Kazakhstan – 5.4 persons.

When performing the forecasting calculations by directions of international transport corridors one can use the model of forecasting passenger traffic needs tried and tested within the framework of TACIS involving the companies EPV EuroprojrktVerkehr (Germany) SGTE (England), HyprotransTЭY (Russia), Transmark (England), Transpolis (Ukraine) [5].

This forecasting model, given the high uncertainty of the general economics and sociological position of the concentration area, uses statistic data and opinion of the experts, namely of the International Centre for Policy Studies (Soros Foundation).

Based on forecast data, it is estimated that in Ukraine in 2035 – 2040 about 130 million passengers will use the high-speed network annually. These traffic volumes correspond to an annual turnover of 54 billion pass.-km. One of the possible schemes of HSN development in Ukraine is shown in Fig. 8.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

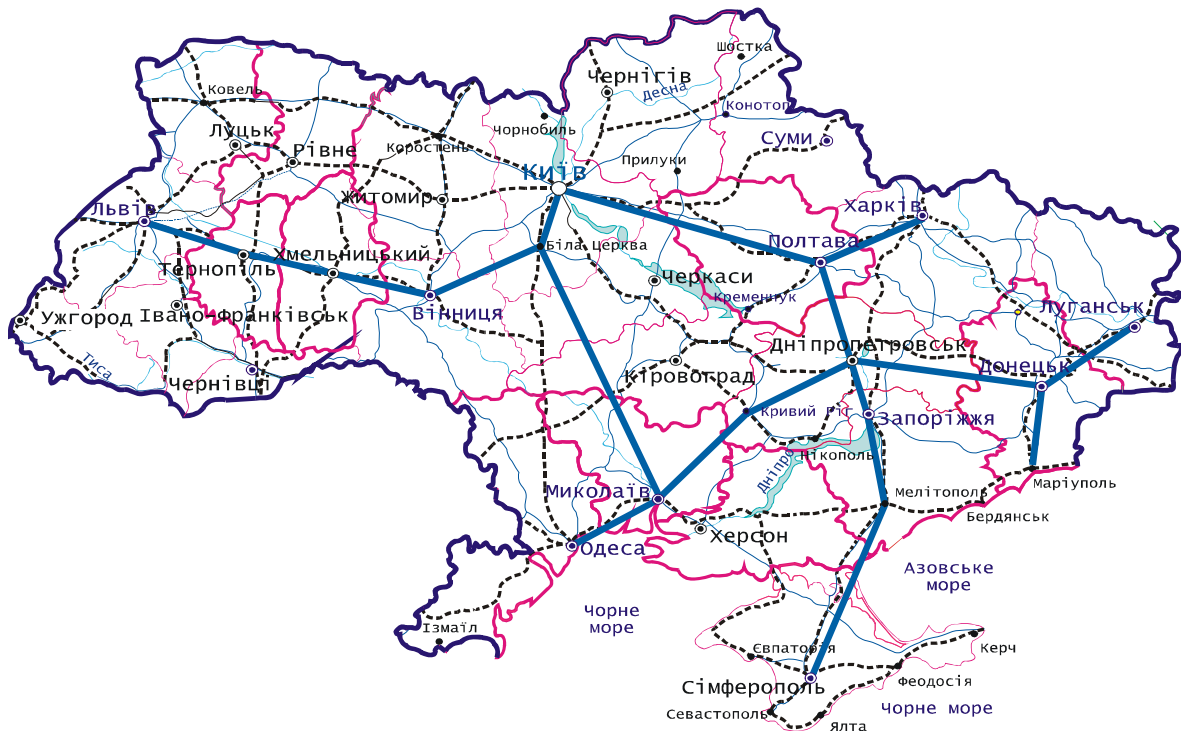


Fig. 8. The recommended variant of HSN

### Originality and practical value

This work further developed the scientific approaches to forecasting the passenger traffic volume in HSN agglomeration area. The HSN feasibility study criteria system was updated; this system takes into account passenger transit flows through Ukraine, the population of the cities covered by the high-speed network, mobility of population and other factors.

The obtained data can be used to justify the concept of high-speed rail transport development in Ukraine, to create a high-speed network and to phase HSN construction.

### Conclusions

Based on the analysis of the studies we can make the following conclusions:

1. To determine the rational routes of high-speed rail lines based on forecasted passenger traffic volume the widespread use is gained by «gravity» mathematical models based on the assumption that the strength of the interaction of cities and regions adjacent to the forecasted HSN is proportional to the product of qualitative and quantitative indices of the regions and inversely proportional to

the distance between the cities. These mathematical models are widely used in regional analysis, during the study of export and import relationships between regions, but should be adjusted on the basis of economic development, regional business activity, population mobility factor, the value of which may vary considerably depending on the growth of income, speed, comfort and service provided by high-speed transport.

2. Economic integration in the European Union can increase the flow of passengers in the international traffic, and the implementation of the European high-speed network expansion program in Eastern Europe and CIS will allow the railways of Ukraine to become integrated in the high-speed network of Europe. The Ukrainian routes of high-speed rail lines proposed by SYSTRA (France) in 2002 based on forecasted passenger traffic volume do not take into account the transit flow through Ukraine and the passenger mobility factor. Thus, the proposed network topology and HSN construction phasing require correction.

3. From the analysis of different approaches and techniques it follows that passenger flow forecasting requires development and use of advanced mathematical techniques, creation of common

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

methods of traffic flow forecasting, which will allow to prevent unreasonable decisions and shorten project development period.

4. The studies show that to attract passengers on the distance of up to 600-800 km the lowest limit is the maximum speed of 250 km/h, at which

travel time will not exceed 4 hours. Based on the fact that the average ratio between the route and the maximum speed is 0.7-0.85, it is necessary to ensure the maximum speed at the level of 300-350 km/h.

## LIST OF REFERENCE LINKS

1. Аналітична записка до Концепції Державної цільової програми розвитку пасажирських перевезень на залізничному транспорті України до 2020 року. – Київ : Київдіпротранс, 2010. – 39 с.
2. Бараш, Ю. С. Економічна ефективність високошвидкісних пасажирських залізничних перевезень в Україні : монографія / Ю. С. Бараш, А. В. Момот. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 137 с.
3. Босов, А. А. Формирование вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украине : монография / А. А. Босов, Г. Н. Кирпа. – Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп., 2004. – 144 с.
4. Довідник основних показників роботи залізниць України (2005–2015 роки) : ПАТ «Українська залізниця». – Київ, 2016. – 58 с.
5. Кірпа, Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему : монографія / Г. М. Кірпа. – 2-е вид., перероб. і доп. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 248 с.
6. Курган, М. Б. Швидкість за міжнародними стандартами / М. Б. Курган // Українські залізниці. – 2015. – № 11-12. – С. 36–39.
7. Курган, Н. Б. Предпосылки создания высокоскоростных магистралей в Украине / Н. Б. Курган // Українські залізниці. – 2015. – № 5-6 (23-24). – С. 16–21.
8. Макаренко, М. В. Аналіз динаміки і структури перевезень пасажирів залізничним транспортом / М. В. Макаренко, І. М. Гойхман / 36. наук. пр. Держ. економ.-технол. ун-ту трансп. Серія: «Економіка і управління». – Київ, 2010. – Вип. 16. – С. 165–184.
9. Миненко, Д. О. Критерии определения направлений, перспективных для организации высокоскоростного железнодорожного движения / Д. О. Миненко ; под ред. В. С. Шварцфельда // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / Дальневост. гос.ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2014. – Вып. 2. – С. 63–70.
10. Правдин, Н. В. Прогнозирование пассажиропотоков (методика, расчеты, примеры) / Н. В. Правдин, В. Я. Негрей. – Москва : Транспорт, 1980. – 224 с.
11. Предварительное технико-экономическое обоснование проекта высокоскоростной железнодорожной сети в Украине. Окончательный отчет. – Киев : SYSTRA, 2002. – 311 с.
12. Проект NGT – новый потенциал высокоскоростного движения в Европе // Железные дороги мира. – 2013. – № 3. – С. 14–23.
13. Fischer, S. Traction Energy Consumption of Electric Locomotives and Electric Multiple Units at Speed Restrictions / S. Fischer // Acta Technica Jaurinensis. – 2015. – Vol. 8, No. 3. – P. 240–256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384.
14. Integrated airline scheduling: considering competition effects and the entry of the high speed rail / L. Cadarso, V. Vaze, C. Barnhart, Á. Marín // Transportation Science. – 2016. – Vol. 18. – P. 212–219. doi: 10.1287/trsc.2015.0617.
15. Moyano, A. High Speed Rail Commuting: Efficiency Analysis of the Spanish HSR Links / A. Moyano // Transportation Research Procedia. – 2016. – Vol. 18. – P. 212–219. doi: 10.1016/j.trpro.2016.12.029.
16. New routes on old railways: increasing rail's mode share within the constraints of the existing railway network / S. P. Blainey, J. Armstrong, A. S. J. Smith, J. M. Preston // Transportation. – 2016. – Vol. 43. – Iss. 3. – P. 425–442. doi: 10.1007/s11116-015-9582-5.
17. High speed rail. First track to sustainable mobility. [Electronic resource] – Paris : UIC, 2009. – 14 p. – Available at: [http://www.vialibre-ffe.com/PDF/4509\\_AVE\\_UIC.pdf](http://www.vialibre-ffe.com/PDF/4509_AVE_UIC.pdf). – Title from the screen. – Accessed : 15.02.2017.

М. Б. КУРГАН<sup>1</sup>, Д. М. КУРГАН<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@mail.ru, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2\*</sup>Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

## ПРОГНОЗУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО РУХУ ПОЇЗДІВ

**Мета.** Прогнозування пасажирських транспортних потоків на перспективу є найважливішою й невід'ємною частиною складного процесу проектування високошвидкісних магістралей (ВШМ). Напрямок ВШМ та її параметри визначаються обсягами пасажирських перевезень, прогнозована величина яких залежить від економічних показників розвитку країни, а також від матеріального становища громадян, які проживають у зоні тяжіння ВШМ, транспортної рухливості населення, розвитку конкуруючих видів транспорту тощо. Метою даної роботи є аналіз існуючих методів прогнозування пасажирських перевезень, оцінка похибок існуючих моделей щодо визначення обсягів перевезень та уточнення наукових підходів до обґрунтування доцільності розвитку в Україні високошвидкісного залізничного транспорту. **Методика.** Існуючі методи прогнозування зводяться до таких: методи експертних оцінок, методи екстраполяції, факторного і кореляційного аналізу, методи моделювання. Методика, викладена в даній роботі, базується на таких наукових підходах, як: аналіз – всебічне і детальне вивчення різних аспектів відомих методів прогнозування; порівняння існуючих методів для встановлення відмінності та подібності; а також на дедукції – використанні загальних знань для отримання нових приватних. Так, узагальнені показники, встановлені для країни в цілому, такі як валовий внутрішній продукт, національний дохід, загальна чисельність населення та ін. не можуть бути використані для прогнозування пасажиропотоку на конкретних напрямках будівництва ВШМ. Отже, від загального прогнозу необхідно переходити до прогнозування обсягів перевезень на конкретному напрямку. **Результати.** Зроблені висновки впливають із аналізу різних підходів та методик прогнозування пасажиропотоків. Запропоновано створювати типові методики прогнозування транспортних потоків на основі сучасних математичних методів, що дасть можливість попередити необґрунтовані рішення й скоротити терміни розробки проектів. Отримані в роботі рекомендації сприятимуть ефективності проектних рішень, визначатимуть якість проекту в цілому та доцільність його реалізації зокрема. **Наукова новизна.** Набули подальшого розвитку наукові підходи до прогнозування обсягів пасажирських перевезень у зоні агломерації, що тяжіє до ВШМ. Доповнена система критеріїв оцінки доцільності спорудження ВШМ, яка враховує транзитні потоки пасажирів через територію України, чисельність населення в містах, охоплених високошвидкісною мережею, мобільність населення та ін. фактори. **Практична значимість.** Отримані авторами дані можуть бути використані для обґрунтування концепції розвитку високошвидкісного залізничного транспорту в Україні, формування мережі високошвидкісних магістралей та встановлення етапів будівництва ВШМ.

**Ключові слова:** високошвидкісний рух поїздів; високошвидкісні магістралі; обсяг пасажирських перевезень; пасажирообіг; методи прогнозування; економічна ефективність

Н. Б. КУРГАН<sup>1</sup>, Д. Н. КУРГАН<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 48, эл. почта kunibor@mail.ru, ORCID 0000-0002-8182-7709

<sup>2\*</sup>Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurhan@brailsys.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ПРИ ВНЕДРЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

**Цель.** Прогнозирование пассажирских транспортных потоков на перспективу есть важнейшей и неотъемлемой частью складывающегося процесса проектирования высокоскоростных магистралей (ВСМ). Направление ВСМ и ее параметры определяются объемами пассажирских перевозок, прогнозируемая величина которых зависит от экономических показателей развития страны, а также от материального положения граждан, которые проживают в зоне тяготения ВСМ, транспортной подвижности населения, развития конкурирующих видов транспорта и т.п. Целью данной работы является анализ существующих методов прогнозирования пассажирских перевозок, оценка погрешностей существующих моделей относительно определения объемов перевозок и уточнение научных подходов к обоснованию целесообразности развития в Украине высокоскоростного железнодорожного транспорта. **Методика.** Существующие методы прогнозирования сводятся к таким: методы экспертных оценок, методы экстраполяции, факторного и корреляционного анализа, методы моделирования. Методика, изложенная в данной работе, базируется на таких научных подходах, как: анализ – всестороннее и детальное изучение разных аспектов известных методов прогнозирования; сравнение существующих методов для установления отличия и сходства; а также на дедукции – использовании общих знаний для получения новых частных. Так, обобщенные показатели, установленные для страны в целом, такие как валовой внутренний продукт, национальный доход, общая численность населения и др. не могут быть использованы для прогнозирования пассажиропотока на конкретных направлениях строительства ВСМ. Таким образом, от общего прогноза необходимо переходить к прогнозированию объемов перевозок на конкретном направлении. **Результаты.** Сделанные выводы вытекают из анализа разных подходов и методик прогнозирования пассажиропотоков. Предложено создавать типовую методику прогнозирования транспортных потоков на основе современных математических методов, которая даст возможность предупредить необоснованные решения и сократить сроки разработки проектов. Полученные в работе рекомендации будут оказывать содействие эффективности проектных решений, определять качество проекта в целом и целесообразность его реализации в частности. **Научная новизна.** Приобрели дальнейшее развитие научные подходы к прогнозированию объемов пассажирских перевозок в зоне агломерации, которая тяготеет к ВСМ. Дополнена система критериев оценки целесообразности сооружения ВСМ, которая учитывает транзитные потоки пассажиров через территорию Украины, численность населения в городах, охваченных высокоскоростной сетью, мобильность населения и др. факторы. **Практическая значимость.** Полученные данные могут быть использованы для обоснования концепции развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в Украине, формирования сети высокоскоростных магистралей и установления этапов строительства ВСМ.

**Ключевые слова:** высокоскоростное движение поездов; высокоскоростные магистрали; объем пассажирских перевозок; пассажирооборот; методы прогнозирования; экономическая эффективность

### REFERENCES

1. *Analitichna zapyska do Kontseptsii Derzhavnoi tsilovoi prohramy rozvytku pasazhyrskykh perevezen na zaliznychnomu transporti Ukrainy do 2020 roku.* (2010). Kyiv: Kyivdiprotrans.
2. Barash, Y. S., & Momot, A. V. (2015). *Ekonomichna efektyvnist vysokoshvydkisnykh pasazhyrskykh zaliznychnykh perevezen v Ukraini.* Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Press.
3. Bosov, A. A., & Kirpa, G. N. (2004). *Formirovaniye variantov ratsionalnoy seti liniy vysokoskorostnogo dvizheniya poyezdov v Ukraine.* Dnepropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Press.
4. PJSC Ukrzaliznytsia (2016). *Dovidnyk osnovnykh pokaznykiv roboty zaliznyts Ukrainy (2005-2015 roky).* Kyiv.
5. Kirpa, H. M. (2004). *Intehratsiia zaliznychnoho transportu Ukrainy u yevropeisku transportnu systemu.* Dnipropetrovsk: Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan Press.
6. Kurhan, M. B. (2015). Shvydkist za mizhnarodnymi standartamy. *Ukrainski zaliznytsi*, 11-12, 36-39.
7. Kurhan, M. B. (2015). Predposylki stvorennya vysokoskorostnykh magistralei v Ukraini. *Ukrainski zaliznytsi*, 5-6(23-24), 16-21.

## ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ

8. Makarenko, M. V., & Hoikhman, I. M. (2010). Analiz dynamiky i struktury perevezen pasazhyriv zaliznychnym transportom. *Proceedings of the State Economic and Technological University of Transport series «Economics and Management»*, 16, 165-184.
9. Minenko, D. O. (2014). Kriterii opredeleniya napravleniy, perspektivnykh dlya organizatsii vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo dvizheniya. In V. S. Shvartsfeld (Ed.), *Proyektirovaniye razvitiya regionalnoy seti zheleznykh dorog* (2, pp. 63-70). Khabarovsk: Izdatelstvo DVGUPS.
10. Pravdin, N. V., & Negrey, V. Y. (1980). *Prognozirovaniye passazhiropotokov (metodika, raschety, primery)*. Moscow: Transport.
11. *Predvaritelnoye tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye proyekta vysokoskorostnoy zheleznodorozhnoy seti v Ukraine*. (2002). Kyiv: SYSTRA.
12. Schumann, T., & Lemmer, K. (2013). Project NGT – new potential for high-speed rail in Europe. *Zheleznyye dorogi mira*, 3, 14–23.
13. Fischer, S. (2015). Traction Energy Consumption of Electric Locomotives and Electric Multiple Units at Speed Restrictions. *Acta Technica Jaurinensis*, 8(3), 240-256. doi: 10.14513/actatechjaur.v8.n3.384
14. Cadarso, L., Vaze, V., Barnhart, C., & Marín, Á. (2016). Integrated airline scheduling: considering competition effects and the entry of the high speed rail. *Transportation Science*. doi: 10.1287/trsc.2015.0617
15. Moyano, A. (2016). High Speed Rail Commuting: Efficiency Analysis of the Spanish HSR Links. *Transportation Research Procedia*, 18, 212-219. doi: 10.1016/j.trpro.2016.12.029
16. Blainey, S. P., Armstrong, J., Smith, A. S. J., & Preston, J. M. (2016). New routes on old railways: increasing rail's mode share within the constraints of the existing railway network. *Transportation*, 43(3), 425-442. doi: 10.1007/s11116-015-9582-5
17. *High speed rail. First track to sustainable mobility*. (2010). Paris: UIC.

*Prof. V. D. Petrenko, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. E. I. Danilenko, D. Sc. (Tech.), (Ukraine)*  
recommended this article to be published

Accessed: Oct. 28, 2016

Received: Jan. 10, 2017

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.42:378.014.6

В. И. ШИНКАРЕНКО<sup>1\*</sup>, Е. С. КУРОПЯТНИК<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>2\*</sup>Каф. «Компьютерные информационные технологии», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, эл. почта elenadiit@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2286-884X

### ПРОБЛЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЛАГИАТА И АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИХ РЕШЕНИЯ

**Цель.** Данное исследование направлено на: 1) определение понятия «плагиата» в текстах на формальных и естественных языках, построение таксономии плагиата; 2) выявление основных проблем обнаружения плагиата при использовании автоматизированных средств их решения; 3) анализ и систематизацию информации, полученной в ходе обзора, тестирования и анализа работы существующих систем обнаружения заимствований. **Методика.** Для выявления требований к программному обеспечению по обнаружению плагиата применяются методы анализа нормативной документации (законодательной базы) и конкурентного инструментария. Для проверки требований используются методы тестирования и обзора интерфейсов GUI. **Результаты.** В работе рассмотрено понятие «плагиата», вопросы его распространения и классификации. Выполнен обзор существующих систем выявления плагиата: настольных приложений и онлайн-ресурсов. Выделены их функциональные характеристики, определены форматы входных и выходных данных и ограничения на них, особенности настройки и доступа. Выполнена детализация требований к рассмотренным системам. **Научная новизна.** Авторами предложено дополнение к существующим иерархическим схемам таксономии плагиата. Выполнен анализ существующих систем с точки зрения функциональности и возможности использования для больших объемов данных. **Практическая значимость.** Практическая значимость определяется широтой проблемы плагиата в различных сферах. В Украине развивается законодательная база для борьбы с плагиатом, что требует активного решения задач разработки, совершенствования и внедрения соответствующего программного обеспечения (ПО). Данная работа способствует решению указанных задач. Обзор существующих программ-антиплагиатов, а также изучение и исследование опыта в этой области, уточнение понятия «плагиата», стратегии его выявления позволяет более полно сформулировать требования к функциональным характеристикам, входным и выходным данным разрабатываемого ПО, а также выявить особенности работы подобного ПО. В статье сделан акцент на особенности решения задачи выявления заимствований в академической среде.

**Ключевые слова:** плагиат; таксономия плагиата; заимствование фрагментов; системы обнаружения плагиата



## Введение

Интенсивность развития всех отраслей общественного производства, а также средств их информационной поддержки приводят к резкому росту объемов информации, в том числе представленной в текстовом виде. Одной из задач обработки текстов является их синтаксическое и семантическое сравнение с целью выявления заимствований.

Решению данной проблемы посвящено множество работ в правовой и академической отраслях [4, 20, 24], а также в сфере информационных технологий [3, 15, 22].

Проблема выявления плагиата усложнена множеством вариантов определения понятия плагиата в разных контекстах. «Плагиат – акт взятия рукописей другого человека и выдачи их как свои собственные. Мошенничество тесно связанное с подделкой и пиратством на практике, как правило, в нарушение закона об авторских правах» [14]. Согласно Закону Украины «Про авторське право та суміжні права» редакції от 13.01.16 «плагиат – оприлюднення (опублікування), повністю або частково, чужого твору під іменем особи, яка не є автором цього твору...». На сегодня существует ряд объектов, охраняемых авторским правом: литературные произведения различного жанра, выступления, лекции, произведения искусства, производные произведения, а также «другие произведения» [11, 13], определены неохранные объекты [9]. Степень производности и специфика произведения требует особого внимания и подходов для решения задачи определения плагиата. В настоящее время получает все большую практику решение этой задачи с помощью ИТ-технологий, сфокусированных на выявление прежде всего текстовых заимствований, которые имеют широкое распространение в сфере науки, образовании, профессиональной деятельности, особенно в СМИ [10]. В таких случаях применяется термин «плагиат». В данной работе понятие «плагиат» используется в более широких семантических пределах, чем рамки нормативно-законодательной базы, что является традиционным для сферы разработки программного обеспечения. Под плагиатом будем понимать наличие в текстовых и иных документах фрагментов, заимствованных с различных источни-

ков без указания их автора и/или с нарушениями правил цитирования.

Существуют разные подходы для его классификации: по техническим средствам маскировки, по объему, степени маскировки [21, 23], сфере использования [10].

Одной из актуальных проблем является устранение последствий маскировки плагиата. В связи с этим выделяют такие типы плагиата [23]: дословный; скрытый плагиат с помощью перефразирования; скрытый плагиат с помощью технических трюков, использующих недостатки существующих систем антиплагиата, умышленное неточное использование ссылок; «жесткий плагиат» – тип плагиата, который особенно тяжело выявлять.

Для студенческих работ характерны такие виды плагиата [14]:

- текстуальные плагиаты: этот тип плагиата обычно делается студентами или исследователями в научных учреждениях, где документы являются идентичными или типичными для исходных документов, докладов, эссе научных работ и дизайнерского искусства;

- плагиат исходного кода компьютерных программ: также используется студентами в университетах, где студенты пытаются сдать копию полного или частей исходного кода, написанного кем-то другим, как свой собственный.

Таким образом, определение понятия плагиата неоднозначно, имеет много формулировок и включает множество различных аспектов.

## Цель

Основной целью данной работы является построение таксономии видов плагиата, выявление основных проблем в задачах обнаружения плагиата и использовании автоматизированных средств для их решения; а также анализ и систематизирование информации, полученной в ходе обзора, тестирования и анализа работы существующих систем обнаружения заимствований.

## Методика

Для выявления требований к программному обеспечению по выявлению плагиата применяются методы анализа нормативной документации (законодательной базы) и конкурентных

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

продуктов, а также метод анализа и черного ящика. Для проверки требований используются методы тестирования и обзора GUI.

### Результаты

В работе рассмотрено понятие плагиата, вопросы его распространения и классификации. Выполнен обзор существующих систем выявления плагиата: настольных приложений и онлайн-ресурсов. Выделены их функциональные характеристики, определены форматы входных и выходных данных и ограничения на них, особенности настройки. Выполнена детализация требований к рассмотренным системам.

*Таксономия плагиата.* Таксономия плагиата предполагают выделения различных его уровней по типу (виду материала, рис. 1), сложности и путям его реализации. Каждый тип работ (студенческая, исследовательская) может содержать заимствования такие, как цитаты первоисточника, ссылки на результаты экспериментов и апробаций. Правильное оформление подобных вставок является нормальной практикой в научно-образовательной сфере, пренебрежение ними – плагиатом.

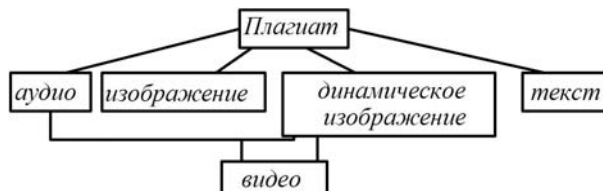


Рис. 1. Формы представления материалов, подвергаемых заимствованию

Fig. 1. The forms of presentation materials subjected to borrow

Умышленное неточное использование ссылок является одним из способов, применяемых при выполнении учебных заданий. Студенты могут использовать неправильные и неточные цитаты, проявляя неспособность определить цитируемый текст с необходимой точностью. Методы такого типа плагиата включают в себя [23]:

– обеспечение поддельной ссылки, то есть выдуманной ссылки, которой не существуют, и, следовательно, невозможно цитировать и текст ссылки точно;

– предоставление ложных ссылок: ссылка существует, но материал по ней не соответствует приведенному в работе;

– использование «забытых» или аннулированных ссылок на источники: добавление цитат или скобок, но непредставление информации о ссылке на источники.

Плагиат может быть полным и частичным в зависимости от процента заимствованных фрагментов. Классификация плагиата представлена в табл. 1.

Таблица 1

### Характеристика плагиата

Table 1

### Characteristics of plagiarism

Признак	Значение	
Объем	Полный	
	Частичный	
Количество источников	Один	Простой плагиат
	Много	Сложный плагиат
Структурный источник	Обзор Постановка задачи Основная часть Примеры Выводы (результаты)	
Непрерывность	Сплошной Фрагментарный	
Степень важности	Насколько заимствованный фрагмент важен для данного документа (текста)	
Наличие изменений	Отсутствуют	
	Использованы «маскировочные трюки»	
	Перевод на другой язык	
	Перестановка фраз и/или других фрагментов	

Полный плагиат может быть классифицирован как простой и сложный. К первому типу можно отнести получение псевдо оригинального текста на основе одного документа: манипуляции с таким документом минимальны и не требуют сложного интеллектуального труда, и отчасти могут быть реализованы по средствам онлайн-сервисов или компьютерных про-

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

грамм. Сложный плагиат, характеризующийся наличием нескольких источников, предполагает более сложную работу, связанную не только с поиском материалов, но и требует понимание предметной области исходных текстов.

Маскирование плагиата, или так званый латентный плагиат, является актуальным вопросом не только в сфере образования, но и информационных технологий, так как ряд программ, направленных на выявления заимствований, не имеют стопроцентной защиты от данной проблемы. Параллельно с программами-антиплагиатами разрабатываются антиплагиаты-киллеры, направленные на сокрытие заимствований в автоматическом режиме.

К приемам маскировки можно отнести:

- использование символов с разной кодировкой [23]: замена кириллических символов похожими по написанию латинскими символами;
- вставка в текст непечатных символов, в том числе добавление последовательностей из двух и более пробелов;
- допущения орфографических ошибок с определенной вероятностью;
- изменение регистра (изменение больших букв на малые и наоборот);
- добавление пустых абзацев и замена символа абзаца на символ разрыва строки;
- замена сокращений единиц измерения на их полные названия и наоборот;
- замена цифр их наименованием прописью.

При оценке текста на плагиат можно выделить такие задачи (табл. 2): определение типа документа по языку; определение уровня, на котором будет вестись поиск заимствований; определения лексических конструкций, на уровне которых будет вестись поиск заимствований; проверка на уникальность; анализ результатов.

Текст может быть написан на естественном языке или формализованном, а также содержать фрагменты обоих типов (табл. 3). Проверка текстов на естественном языке предполагает учет таких его особенностей:

- нестрогий порядок слов в предложении;
- наличие многозначных слов, синонимов, омонимов;
- изменения порядка слов может приводить к изменению смысла высказываний;
- эволюция языка.

Таблица 2

## Этапы обнаружения плагиата

Table 2

## Stages of plagiarism detection

Этап	Основные характеристики
Определение типа документа	ЕЯ, формальный язык, смесь (гибрид)
Определение уровня	Синтаксический, семантический, гибридный
Определение масштаба	Слова, словосочетания, предложения (фразы, абзацы)
Проверка на уникальность	
Анализ результатов	Объем, цитирование, пересечение фрагментов, структурный источник, важность фрагмента

Таблица 3

## Типы документов

Table 3

## Document Types

Документы	Примеры
Естественные языковые	Издания СМИ Худ. лит-ра
Формальные языковые	Мат. выкладки Программы UML-модели прочее
Смешанные документы	Техническая литература Пособия, монографии Диссертации Чертежи и конструкторская документация Учебные работы Документация к ПО

Общими проблемами являются:

- определение «границ» идиоматических единиц;
- изменения знаков препинания может приводить к изменению смысла фразы («Казнить

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

нельзя помиловать»).

Ряд языков, подобных uml [25], имеют графическую интерпретацию в виде геометрических фигур; распознавания символов в формулах также является проблемой (частично она обусловлена различиями форматов редакторов формул).

Анализ результатов может быть выполнен по нескольким критериям (табл. 2), исходя из характеристик плагиата (табл. 1). По объему плагиат может быть единым, целым фрагментом, а может быть выборочными (отдельными, разрозненными) частями документа. По принадлежности текст может быть: свой (в том числе самоцитирование), общеизвестные вещи (например, народное творчество, правила языка), чужой.

Цитирование может быть сторонних источников и авторское (самоцитирование).

По принадлежности к структурному источнику фрагменты могут быть справочными или теоретическими сведениями (например, в лабораторных работах студентов), основным текстом, обзором аналогов, литературы, фрагментами, которые дополняют картину или вносят ясность в дальнейший текст. Последние могут быть допустимыми лишь в отдельных разделах документа (например, в докторской диссертации). По важности заимствованные фрагменты могут передавать основные мысли, а могут вспомогательные элементы работы (периферию): примеры решения задач, примеры начальных условий и т.п. По количеству источников фрагменты могут быть моно- и полизаимствованными.

*Системы обнаружения плагиата.* На сегодня существует ряд программ (настольных приложений и онлайн-сервисов), позволяющих выявлять заимствования текстов на естественном языке и на языках программирования. Среди них общего назначения: Etxt Анти плагиат, Advego Plagiat, Double Content Finder (DCFinder), Praide Unique Content Analyser 2, Copyscape, istio.com и другие. А также специализированные – для использования в вузах: Anti-Plagiarism [6], пакет «Антиплагиат. ВУЗ», «Plagiarism» [12], strikeplagiarism.com, unplug.com. Описанию и сравнению различных систем антиплагиата посвящено ряд работ [5, 15, 19].

Рассмотрено 27 ресурсов по обнаружению плагиата: онлайн и настольные приложения

с различными типами баз данных исходных текстов (рис. 2). Далее приведен перечень ресурсов:

1. eTXT Антиплагиат [1, 3, 5]
  2. Advego Plagiat [3, 5]
  3. Double Content Finder [3, 5, 18]
  4. Praide Unique Content Analyser II [5]
  5. Viper [5]
  6. Плагиат.НЕТ [5]
  7. Duplichecker [5]
  8. PaperRater [5]
  9. Anti-Plagiarism [6]
  10. strikeplagiarism.com [33]
  11. Plagiarisma.Net [5, 26]
  12. PlagiarismChecker [5, 27]
  13. Plagium [5, 28]
  14. PlagTracker [5, 31]
  15. SeeSources [5]
  16. PlagScan [5, 30]
  17. Plagiarism Detector [5, 29]
  18. Защита уникальности контента [5]
  19. FindCopy [3, 5]
  20. Docol©c [5, 17]
  21. Grammarly [5]
  22. Text.ru [5, 7]
  23. Антиплагиат ру [3, 5, 8]
  24. Copyscape [10, 16]
  25. Miratools [3]
  26. smallSeoTools.com/plagiarismChecker [32]
  27. unplug.com [34].
- В результате анализа [3, 5–8, 10, 16, 17, 26–34] были сформулированы требования к входным и выходным данным программ-антиплагиатов, а также их функциональным характеристикам. Непосредственная работа с ресурсом начинается с подачи документа на проверку, которая может быть осуществлена такими способами:
- url сайта, контент которого необходимо проверить (ресурсы 1–4, 7, 11, 12, 13, 16, 24, 25, 26);
  - отдельный файл (1–4, 7, 28, 11, 13, 16, 17, 20, 27);
  - пакет файлов (1, 25), несколько документов одним zip-архивом (16);
  - проверяемый текст вводится в специальную экранную форму (1, 3, 4, 7, 8, 11–14, 17, 22, 26, 27).

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

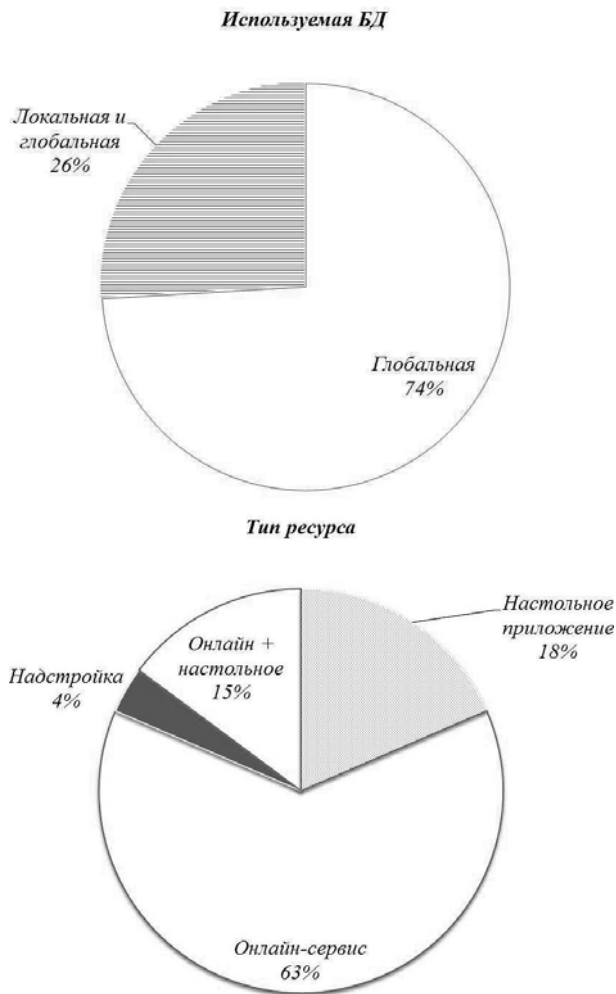


Рис. 2. Анализ ресурсов

Fig. 2. Resource analysis

Результаты работы по обнаружению плагиата представляются следующим образом:

- экранная форма с выделением заимствованных фрагментов (1, 2, 16, 17, 22–25);
- сохранение отчета в pdf-формате (16, 26, 27), в doc (1, 16), rtf (5);
- сохранение отчета о проверке в личном аккаунте (20, 27);
- отправка отчета о проверке по электронной почте (20).

По результатам работы система-антиплагиат формирует отчет, в котором могут быть представлены такие данные:

- список источников заимствования (1–5, 8, 11, 14, 16, 22, 23, 26);
- общий процент плагиата в работе (14, 16, 23, 24, 26);

– указания на фрагменты, где необходимо оформить текст как цитату и поставить ссылку на источник (14);

– процент уникальности (1, 3, 5, 8, 11, 22, 25, 26);

– проверяемый текст (26);

– сообщение о наличии плагиата (8);

– объем введенного текста (11, 22, 24);

– количество совпадений на источник (16).

Основными функциональными характеристиками являются:

– сравнение текстов с базой (выполняют все);

– сравнение текстов один к одному (тексты предоставляет пользователь) (13, 24, 27) или по url (7, 24);

– дословное сравнение и определение смысловых совпадений (1);

– формирование отчета о плагиате/уникальности (все с разной степенью детализации);

– замена латинских символов на кириллические (если есть такого вида маскировка) (6);

– предоставления сведений о плагиате с какого-либо сайта еженедельно или ежемесячно (7);

– проверка грамматики, правописания или стилистики встроенным литературным редактором (8);

– оповещение пользователя (по электронной почте) о плагиате его текстов (12);

– создание аккаунтов научных учреждений, институтов (13);

– настройка параметров проверки (1, 4, 25, 11);

– защита от проверки пустых документов (9);

– поиск по базам Google Scholar, Google Books (11).

Также предоставляется возможность выполнить настройку параметров проверки работы (сравнения):

– задание сайтов, с которыми не выполнять сравнение (25);

– задание параметра «размера выборки» (1, 27);

– наличие разных уровней проверки: обычная, экспресс, глубокая (1).

– установка «порога уникальности» (1);

– выбор поисковой машины (4, 11).

Рассмотрим возможности систем, имеющих внедрения [6, 8, 33].

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Система Anti-Plagiarism (Україна) [6] з 2008 розроблялась як відкрита система, а з 2010 введена в Хмельницькому національному університеті. Особливостями являються:

- перевірка текстів на ЕЯ і ЯП;
- підтримка локальної і глобальної бази;
- перевірка граматических помилок;
- захист від додавання символів, додавання або зміни пунктуаційних знаків, зміни літерального складу;
- захист від перевірки порожніх документів.

«Антиплагиат. ВУЗ» являється частиною проекту компанії Forecsys (Росія), надає онлайн-сервіс [antiplagiat.ru](http://antiplagiat.ru). Особливістю цього пакету являється:

- текстова база продукту, включаючи матеріали, які були зібрані в Інтернеті, а також додаткові джерела, включаючи методичну літературу і студентські роботи минулих років. Таким чином, ВУЗ має можливість вести власну базу оригінальних робіт, яка буде постійно розширюватися;
- при використанні продукту викладачем можливо оцінювати роботу, яка була перевірена;
- робота в межах організаційно-штатної структури навчального закладу, а також наявність різних типів користувачів з різними правами (викладачі, менеджери кафедр, адміністратори);
- можливість урахування результатів роботи в статистичних даних закладу [1];
- наявність локальної і Інтернет-версії дає великі можливості для інтеграції продукту в існуючі в навчальному закладі інформаційні системи.

К недолікам можна віднести такі особливості продукту:

- студенти не являються користувачами даного пакету ([1]), інформація про них використовується тільки для персоналізації роботи;
- вся робота по завантаженні робіт (і поповненню бази), перевірки їх ляже на викладачів, для поповнення бази використовується спеціальний тип користувачів;
- не передбачено ведення статистики по окремій дисципліні.

На сьогодні користувачами даного продукту являються ВАК Росії, Державний університет – Вища школа економіки (ГУ-

ВШЕ), Московський інститут економіки, менеджменту і права (МІЕМП), Московський державний психолого-педагогічний університет (ММП), Нижегородський державний університет (ННГУ) і др.

Strikeplagiarism.com – система антиплагиату студентських робіт, розроблена в Польщі. Має ряд таких особливостей [33]:

- інтегрується з Системами управління навчанням (LMS) і підключається до Moodle;
- надає детальний звіт про подібність зі списком джерел заїмствувань;
- має функцію «Тревожного сигналу» для позначення спроб перешкодити аналізу на наявність плагиату;
- виконує порівняння з ресурсами глобальної мережі Інтернет і базою даних установ або ВУЗів;
- виявляє подібності за допомогою алгоритмів, заснованих на аналізі N-грамм, лінгвістичний аналіз; постійно удосконалюється пошуковий алгоритм і передбачена адаптація алгоритмів виявлення до специфіки перевіряємих документів;
- виконує аналіз на багатьох мовах;
- надає можливість додавати документи до бази даних ВУЗів і підключитися до Міжвузовської програми обміну базами даних.

Розглянуті ресурси мають ряд обмежень, які є перешкодою для масового впровадження, наприклад, в вузах, а саме:

- відсутність підтримки або стадії тестування, або проблеми з доступом (не знайдено/не відповідає);
- обмеження по обсягу перевіряємих текстів і частоті запитів;
- тривала перевірка документа;
- для повноцінної роботи необхідний преміум-акаунт;
- відсутність детального звіту;
- відсутність підтримки російської і/або української мов.

Для технічних ВУЗів актуальні також наступні проблеми:

- більшість ресурсів працюють тільки з природною мовними текстами;
- обробка тільки текстів (немає обробки зображень, формул і іншого).

### Научная новизна и практическая значимость

Предложено дополнение существующих иерархических схем таксономии плагиата. Выполнен анализ существующих систем с точки зрения функциональности и возможности использования для больших объемов данных. Практическая значимость определяется широтой проблемы плагиата в различных сферах. В Украине развивается законодательная база для борьбы с плагиатом, что требует активного решения задач разработки, усовершенствования и внедрения соответствующего программного обеспечения (ПО). Данная работа способствует решению указанных задач. Обзор существующих программ-антиплагиатов, а также изучение и исследование опыта в этой области и уточнение понятия плагиата, стратегии его выявления позволяет более полно сформулировать требования к функциональным характери-

стикам, входным и выходным данным разрабатываемого ПО, а также выявить особенности работы подобного ПО. В статье сделан акцент на особенности решения задачи выявления заимствований в среде высших технических учебных заведений.

### Выводы

Определение понятие плагиата является одним из основных этапов в формировании требований к системам обнаружения плагиата. Его определение, а также классификация видов плагиата является важной составляющей при формировании требований к функциональным характеристикам соответствующего программного обеспечения (ПО). Обзор и тестирование конкурентных продуктов позволили выделить основные требования к ПО, а также ряд дополнительных, которые являются полезными в зависимости от области применения ПО.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Антиплагиат. ВУЗ [Электронный ресурс] : рук-во пользователя. – Режим доступа: <http://antiplagiat.nsu.ru/files/manual.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 08.12.2016.
2. Антиплагиат eTxt.ru. Проверка уникальности текстов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.etxt.ru/antiplagiat/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.10.2016.
3. Болілий, В. О. Перевірка унікальності тексту при оцінюванні студентських робіт творчого або дослідницького характеру / В. О. Болілий, В. В. Копотій // Наук. записки НДУ ім. М. Гоголя. Серія: Психолого-педагогічні науки : зб. наук. пр. / Ніжин. держ. ун-т ім. М. Гоголя. – Ніжин, 2011. – № 7. – С. 134–145.
4. Голунов, С. В. Студенческий плагиат как вызов системе высшего образования в России и за рубежом / С. В. Голунов // Вопросы образования. – 2010. – № 3. – С. 243–257.
5. Лупаренко, Л. А. Інструментарій виявлення плагіату в наукових роботах: аналіз програмних рішень // Інформ. технології і засоби навчання. – 2014. – Т. 40, № 2. – С. 151–169.
6. Михайловский, Ю. Б. Система Anti-Plagiarism як інструмент запобігання плагіату в навчальній та науковій діяльності / Ю. Б. Михайловский, Н. А. Длугунович. – Вісн. Хмельн. нац. ун-ту. Технічні науки. – 2013. – № 3. – С. 162–168.
7. Онлайн сервис проверки текста на уникальность [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://text.ru/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.10.2016.
8. Офіційна сторінка компанії Форексис. Розділ «Продукти» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.forecsys.ru/ru/site/products/antiplagiat/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 15.11.2016.
9. Про авторське право та суміжні права [Электронный ресурс] : Закон України. – Режим доступа: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3792-12>. – Загл. с экрана. – Проверено : 30.10.2016.
10. Романова, І. В. Явище плагіату: історія та сьогодення / І. В. Романова // Зовнішня торгівля: право, економіка, фінанси. – 2012. – № 3. – С. 267–272.
11. Цивільний кодекс України [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/435-15>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.01.2017.
12. Шостак, І. В. Комп'ютеризація процесу виявлення плагіату у студентських роботах / І. В. Шостак, І. В. Груздо // Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – Київ, 2013. – Вип. 41. – С. 99–109.
13. Штефан, О. Плагіат: поняття, ознаки, відповідальність / О. Штефан // Теорія і практика інтелектуальної власності. – 2011. – № 6. – С. 17–25.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

14. Asim, M. El Tahir Ali. Overview and Comparison of Plagiarism Detection Tools / M. El Tahir Ali Asim, Hussam M. Dahwa Abdulla, V. Snasel. – Dateso, 2011. – P. 161–172.
15. Bin-Habtoor, A. S. A Survey on Plagiarism Detection Systems / A. S. Bin-Habtoor, M. A. Zaher // Intern. J. of Computer Theory and Engineering. – 2012. – Vol. 4, No. 2. – P. 185–188. doi: 10.7763/IJCTE.2012.V4.447.
16. Copyscape. Compare Articles or Web Pages [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.copyscape.com/compare.php>. – Загл. с экрана. – Проверено : 18.10.2016.
17. Docol©c [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://docoloc.de/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 18.10.2016.
18. Double Content Finder [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://textbroker.ru/main/dcfinder.html>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.10.2016.
19. Culwin, F. A review of electronic services for plagiarism detection in student submissions / F. Culwin, Th. Lancaster // 8<sup>th</sup> Annual Conf. on the Teaching of Computing – Edinburgh, 2010. – P. 54–61.
20. Jarrah, A. Al. Plagiarism Detection based on studying correlation between Author, Title and Content / A. Al. Jarrah, I. Alsmadi, Z. Za'atreh // Intern. Conf. on Information Communication System (CICS) (22.05.2011). – Shanghai, 2011. – P. 22–24.
21. Kakkonen, T. AntiPlag – A Sampling-based Tool for Plagiarism Detection in Student Texts / T. Kakkonen, N. Myller // The Proc. of the 8th European Conference on E-learning (29.10–30.10.2009). – Bari, Italy, 2009. – P. 287–293.
22. Meuschke, N. State-of-the-art in detecting academic plagiarism / N. Meuschke, B. Gipp // Intern. J. for Educational Integrity. – 2013. – Vol. 9, No. 1. – P. 50–71.
23. Mozgovoy, M. Automatic Student Plagiarism Detection: Future Perspectives / M. Mozgovoy, T. Kakkonen, G. Cosma // J. of Educational Computing Research. – 2010. – Vol. 43. – Iss. 4. – P. 511–531. doi: 10.2190/ec.43.4.e.
24. Mozgovoy, M. Desktop Tools for Offline Plagiarism Detection in Computer Programs / M. Mozgovoy // Informatics in Education. – 2006. – Vol. 5, No. 1. – P. 97–112.
25. OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Infrastructure : Version 2.4.1. – 2011. – 748 p.
26. Plagiarisma [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://plagiarisma.net/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.10.2016.
27. Plagiarism-Checker.com [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.plagiarism-checker.com/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 18.10.2016.
28. Plagiarism checker & plagiarism detection [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.plagium.com/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 18.10.2016.
29. Plagiarism Detector [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://plagiarismdetector.net/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 18.10.2016.
30. PlagScan [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.plagscan.com/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 18.10.2016.
31. Plagtracker. The most accurate plagiarism checking service [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://www.plagtracker.com/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 18.10.2016.
32. Small SEO Tools. Plagiarism Checker [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://smallseotools.com/plagiarism-checker/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.10.2016.
33. StrikePlagiarism.com [Електронний ресурс] – Режим доступа: <http://strikeplagiarism.com/ua/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.10.2016.
34. Unplag.com. Plagiarism Detection Engine [Електронний ресурс] – Режим доступа: <https://ua.unplag.com/>. – Загл. с экрана. – Проверено : 08.12.2016.

В. І. ШИНКАРЕНКО<sup>1\*</sup>, О. С. КУРОП'ЯТНИК<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта [shinkarenko\\_vi@ua.fm](mailto:shinkarenko_vi@ua.fm), ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>2\*</sup>Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта [elenadiit@rambler.ru](mailto:elenadiit@rambler.ru), ORCID 0000-0003-2286-884X



## ПРОБЛЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ПЛАГІАТУ ТА АНАЛІЗ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЇХ ВИРІШЕННЯ

**Мета.** Дане дослідження спрямоване на: 1) визначення поняття «плагіату» в текстах на формальних і природних мовах, побудова таксономії плагіату; 2) встановлення основних проблем виявлення плагіату і використання автоматизованих засобів їх вирішення; 3) аналіз та систематизацію інформації, отриманої у ході огляду, тестування і аналізу роботи існуючих систем виявлення запозичень. **Методика.** Для формулювання вимог до програмного забезпечення з виявлення плагіату застосовуються методи аналізу нормативної документації (законодавчої бази) і конкурентного інструментарію. Для перевірки вимог використовуються методи тестування та огляду інтерфейсів GUI. **Результати.** У роботі розглянуто поняття «плагіату», питання його поширення та класифікації. Виконано огляд існуючих систем виявлення плагіату: настільних додатків та онлайн-ресурсів. Виділено їх функціональні характеристики, визначені формати вхідних та вихідних даних і обмеження на них, особливості налаштування і доступу. Виконана деталізація вимог до розглянутих систем. **Наукова новизна.** Авторами запропоновано доповнення до існуючих ієрархічних схем таксономії плагіату. Виконано аналіз існуючих систем із точки зору функціональності та можливості використання для великих обсягів даних. **Практична значимість.** Практична значимість визначається широтою проблеми плагіату в різних сферах. В Україні розвивається законодавча база для боротьби з плагіатом, що вимагає активного вирішення завдань розробки, вдосконалення та впровадження відповідного програмного забезпечення (ПЗ). Дана робота сприяє вирішенню зазначених завдань. Огляд існуючих програм-антиплагіатів, а також вивчення і дослідження досвіду в цій галузі, уточнення поняття «плагіату», стратегії його виявлення дозволяє більш повно сформулювати вимоги до функціональних характеристик, вхідних і вихідних даних розроблюваного ПЗ, а також виявити особливості роботи подібного ПЗ. У статті зроблено акцент на особливості вирішення завдання виявлення запозичень в академічному середовищі.

*Ключові слова:* плагіат; таксономія плагіату; запозичення фрагментів; системи виявлення плагіату

V. I. SHYNKARENKO<sup>1\*</sup>, O. S. KUROPYATNYK<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail shinkarenko\_vi@ua.fm, ORCID 0000-0001-8738-7225

<sup>2\*</sup>Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 37, e-mail elenadiit@rambler.ru, ORCID 0000-0003-2286-884X

## PLAGIARISM DETECTION PROBLEMS AND ANALYSIS SOFTWARE TOOLS FOR ITS SOLVE

**Purpose.** This study is aimed at: 1) the definition of plagiarism in texts on formal and natural languages, building a taxonomy of plagiarism; 2) identify major problems of plagiarism detection when using automated tools to solve them; 3) Analysis and systematization of information obtained during the review, testing and analysis of existing detection systems. **Methodology.** To identify the requirements of the software to detect plagiarism apply methods of analysis of normative documentation (legislative base) and competitive tools. To check the requirements of the testing methods used and GUI interfaces review. **Findings.** The paper considers the concept of plagiarism issues of proliferation and classification. A review of existing systems to identify plagiarism: desktop applications, and online resources. Highlighting their functional characteristics, determine the format of the input and output data and constraints on them, customization features and access. Drill down system requirements is made. **Originality.** The authors proposed schemes complement the existing hierarchical taxonomy of plagiarism. Analysis of existing systems is done in terms of functionality and possibilities for use of large amounts of data. **Practical value.** The practical significance is determined by the breadth of the problem of plagiarism in various fields. In Ukraine, develops the legal framework for the fight against plagiarism, which requires the active solution development tasks, improvement and delivery of relevant software (PO). This work contributes to the solution of these problems. Review of existing programs, Anti-plagiarism, as well as study and research experience in the field and update the concept of plagiarism, the strategy allows it to identify more fully articulate to the functional performance requirements, the input and

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

output of the developed software, as well as to identify the features of such software. The article focuses on the features of solving the problem of identification of borrowing in an academic environment.

**Keywords:** plagiarism; taxonomy of plagiarism; borrowing fragments; plagiarism detection system

## REFERENCES

1. *ANTIPLAGIAT.VUZ. Rukovodstvo polzovatelya. Funktsionalnye vozmozhnosti rabochikh mest prepodavatelya, ministratora, menedzhera.* (2011). Moscow: NGU. Retrieved from <http://antiplagiat.nsu.ru/files/manual.pdf>
2. *eTxt Antiplagiat:Proverka unikalnosti tekstov.* (n.d.) Retrieved from <https://www.etxt.ru/antiplagiat/>
3. Bolilyi, V. O., & Kopotii, V. V. (2011). Perevirka unikalnosti tekstu pry otsiniuvanni studentskykh robit tvorchoho abo doslidnytskoho kharakteru. *Naukovi zapysky Naukovi zapysky Nizhynskoho derzhavnoho universytetu im. M. Hoholia. Seriya: Psykholoho-pedahohichni nauky*, 7, 134-145.
4. Golunov, S. V. (2010). Plagiarism in students as challenge to higher education system in Russia and abroad. *Educational Studies*, 3, 243-257.
5. Luparenko, L. A. (2014). Plagiarism detection tools for research works: analysis of software solutions. *Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia*, 40(2), 151-169.
6. Mikhaylovskiy, Y. B., & Dlugunovych, N. A. (2013). Anti-plagiarism system as a tool for plagiarism preventing in educational and research activities. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Tekhnichni nauky*, 3, 162-168.
7. *TEXT.RU: Onlayn servis proverki teksta na unikalnost.* (n.d.) Retrieved from <http://text.ru/>
8. *Foreksis:Antiplagiat.* (n.d.) Retrieved from <http://www.forecsys.ru/ru/site/products/antiplagiat/>
9. Pro avtorske pravo ta sumizhni prava: Zakon Ukrainy 1994, No 1651-19 (2016). Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/3792-12>
10. Romanova, I. V. (2012). Yavyshe plahiutu: istoria ta sohodennia. *Foreign trade: economics, finance, law*, 3(62), 267-272.
11. Tsyvilnyi kodeks Ukrainy 2003, No 1666-19 (2016). Retrieved from <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/435-15>
12. Shostak, I. V., & Hruzdo, I. V. (2013). Kompiuteryzatsiia protsesu vyavleniia plahiutu u studentskykh robotakh. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka*, 41, 99-109.
13. Shtefan, O. (2011). Plagiarism: the concept, attributes, responsibility. *Teoriia i praktyka intelektualnoi vlasnosti*, 6, 17-25.
14. Ali, Asim M. El Tahir, Abdulla, Hussam M. Dahwa, & Snasel, V. (2011, April 20). Overview and Comparison of Plagiarism Detection Tools. *Proceedings of the DATESO 2011: Annual International Workshop on Databases, TExtS, Specifications and Objects, Czech Republic*, 161-172. Retrieved from <http://ceur-ws.org/Vol-706/poster22.pdf>
15. Bin-Habtoor, A. S., & Zaher, M. A. (2012). A Survey on Plagiarism Detection Systems. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 4(2), 185-188. doi: 10.7763/IJCTE.2012.V4.447
16. *Copyscape. Compare Articles or Web Pages.* (n.d.) Retrieved from <http://www.copyscape.com/compare.php>
17. *Docol©c.* (n.d.) Retrieved from <http://docoloc.de/>
18. *Textbroker:Double Content Finder.* (n.d.) Retrieved from <https://textbroker.ru/main/dcfinder.html>
19. Culwin, F., & Lancaster, T. (2000). A review of electronic services for plagiarism detection in student submissions. *Proceedings of the First Annual Conference of the Learning and Teaching Support Network for Information and Computer Sciences.* Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.176.8211&rep=rep1&type=pdf>
20. Jarrah, A. Al, Alsmad, I., & Za'atreh, Z. (2011). Plagiarism Detection based on studying correlation between Author, Title and Content. *International Conference on Information Communication System (CICS), May 22-24, Irbid, Jordan.*
21. Kakkonen, T., & Myller, N. (2009). AntiPlag – A Sampling-based Tool for Plagiarism Detection in Student Texts. *Proceedings of the 8th European Conference on E-learning, October 29-30, Bari, Italy.* 287-293.
22. Meuschke, N., & Gipp, B. (2013). State-of-the-art in detecting academic plagiarism. *International Journal for Educational Integrity*, 9(1), 50-71. doi: 10.21913/IJEI.v9i1.847
23. Mozgovoy, M., Kakkonen, T., & Cosma, G. (2010). Automatic Student Plagiarism Detection: Future Perspectives. *Journal of Educational Computing Research*, 43(4), 511-531. doi: 10.2190/ec.43.4.e

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

24. Mozgovoy, M. (2006). Desktop Tools for Offline Plagiarism Detection in Computer Programs. *Informatics in Education*, 5(1), 97-112.
25. OMG Unified Modeling Language (OMG UML), Infrastructure: Version 2.4.1 (2011).
26. *Plagiarisma*. (n.d.) Retrieved from <http://plagiarisma.net/>
27. *Plagiarism-Checker.com*. (n.d.) Retrieved from <http://www.plagiarism-checker.com/>
28. *Plagium:Plagiarism checker & plagiarism detection*. (n.d.) Retrieved from <http://www.plagium.com/>
29. *Plagiarism Detector*. (n.d.) Retrieved from <http://plagiarismdetector.net/>
30. *PlagScan*. (n.d.) Retrieved from <http://www.plagscan.com/>
31. *Plagtracker. The most accurate plagiarism checking service*. (n.d.) Retrieved from <http://www.plagtracker.com/>
32. *Small SEO Tools:Plagiarism Checker*. (n.d.) Retrieved from <http://smallseotools.com/plagiarism-checker/>
33. *StrikePlagiarism.com*. (n.d.) Retrieved from <http://strikeplagiarism.com/ua/>
34. *Unplag.com. Plagiarism Detection Engine*. (n.d.) Retrieved from <https://ua.unplag.com/>

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. В. В. Скалозубом (Україна); к.филос.н., доц.  
И. В. Агиенко (Україна)

Поступила в редколлегию: 03.11.2016

Принята к печати: 12.01.2017

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.867.21

В. М. БОГОМАЗ<sup>1\*</sup>, М. В. БОРЕНКО<sup>2\*</sup>, І. В. НЕЧАЙ<sup>3\*</sup>, О. П. СЕВЕРИН<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Військова підготовка спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, ел. пошта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

<sup>2\*</sup>Каф. «Військова підготовка спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, ел. пошта bmw1961@ukr.net, ORCID 0000-0001-9578-3906

<sup>3\*</sup>Каф. «Прикладна математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, ел. пошта i.v.nechay@gmail.com, ORCID 0000-0002-9250-7794

<sup>4\*</sup>Каф. «Військова підготовка спеціалістів Державної спеціальної служби транспорту», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, ел. пошта severinlist@gmail.com, ORCID 0000-0001-9967-4731

### ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ПРИВОДУ СТРІЧКОВОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО-ПОХИЛОГО КОНВЕЄРА ВІД ЙОГО ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ

**Мета.** Одним із основних елементів стрічкових конвеєрів є привід. Для аналізу впливу проектних параметрів на величину потужності приводу необхідно провести розрахунки за стандартними методиками, які викладені в сучасній технічній літературі. Основними проектними параметрами стрічкового конвеєра є тип вантажу, проектна продуктивність, геометричні розміри ділянок та конфігурація траси в цілому. Особливістю розрахунків стрічкового конвеєра, в порівнянні з елеваторами, є залежність ширини його стрічки від продуктивності, кута нахилу ділянки та типу вантажу. В статті, для врахування цього факту при розрахунках, необхідно побудувати залежність ширини стрічки від узагальненого параметру, який враховує зміну проектних параметрів. Для визначення загальної закономірності зміни величини потужності приводу стрічкового конвеєра при варіюванні його проектних параметрів в статті необхідно побудувати відповідні графічні залежності з урахуванням стандартних розмірів та параметрів стрічок. **Методика.** У роботі розглядається стрічковий конвеєр із двома ділянками: похилою та горизонтальною. Проводиться детальний аналіз залежності ширини стрічки конвеєра та потужності його приводу від типу вантажу, проектною продуктивності, геометричних розмірів та конфігурації траси конвеєра, використовуючи відповідні параметричні залежності, які побудовані авторами в попередніх роботах. **Результати.** Для стрічкових конвеєрів розглянутого типу побудовано графічні залежності ширини стрічки від параметру, що характеризує проектну продуктивність та кут нахилу ділянки траси, а також – від продуктивності при фіксованому куті нахилу. З урахуванням зміни ширини стрічки при зростанні величини проектною продуктивності побудовано графічні залежності потужності приводу від продуктивності та кута нахилу похилої ділянки. **Наукова новизна.** Авторами вперше побудовані загальні залежності ширини стрічки та потужності приводу конвеєра з двома ділянками (похилою та горизонтальною) від проектних параметрів та побудовані відповідні графіки. **Практична значимість.** Використання побудованих графічних залежностей потужності приводу стрічкових конвеєрів із похилою та горизонтальною ділянками від проектних параметрів дає можливість швидкого

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

визначення приблизного значення потужності приводу на стадії проектування, а також визначити загальний характер зміни її величини при варіюванні проектних параметрів.

*Ключові слова:* конвеєр; стрічка; привід; потужність; продуктивність; кут нахилу

**Вступ**

Машина безперервного транспорту відносять до транспортуючих машин, які є важливими елементами в галузі транспортного та промислового будівництва. Вони використовуються для інтенсифікації навантажувально-розвантажувальних робіт у багатьох виробничих процесах. Найбільш поширеним типом машин безперервного транспорту є стрічкові конвеєри. Як відомо, стрічковими конвеєрами є машини безперервної дії, основним елементом яких є прогумована вертикально замкнута стрічка, що огинає кінцеві барабани, один з яких, як правило, є приводним, інший – натяжним. Стрічкові конвеєри дуже широко застосовуються на підприємствах хімічної, металургійної, машинобудівної промисловості, у виробництві будівельних матеріалів, транспортному та промислому будівництві, на вуглезбагачувальних фабриках [12].

Основними публікаціями, які описують будову, конструктивні особливості, експлуатаційні та розрахункові параметри сучасних машин безперервного транспорту є [1, 5–15]. Аналіз публікацій показує, що для визначення параметрів приводу конвеєра, зокрема його потужності, потрібно виконати детальний розрахунок його елементів. Порядок виконання таких розрахунків детально описаний в роботах [7, 8, 9]. Але існують роботи, в яких наведені скорочені алгоритми розрахунку величини потужності приводу машин безперервного транспорту. В роботі [2] автори побудували аналітичні залежності потужності приводу елеваторів. В роботі [3] запропоновано алгоритм прискореного розрахунку величини потужності стрічкового елеватору при заданих проектних характеристиках. Робота [4] присвячена побудові залежності потужності стрічкових конвеєрів від його проектних величин. Особливістю розрахунку стрічкових конвеєрів порівняно з елеваторами є те, що параметри стрічки мають задовольняти не тільки умові міцності, але й умові забезпечення заданої продуктивності. Цей факт дещо ускладнює подібні дослідження.

**Мета**

Метою роботи є графічний аналіз залежності потужності приводу стрічкового конвеєра з похилою та горизонтальною ділянками від проектної продуктивності, кута нахилу похилої частини траси при фіксованих типі вантажу та геометричних параметрах конвеєра, а також дослідження залежності необхідної ширини стрічки від проектних параметрів конвеєра.

**Методика**

Як відомо, основними параметрами, що впливають на величину потужності приводу стрічкового конвеєра, є: тип вантажу, необхідна продуктивність, висота підйому та довжина транспортування вантажу, необхідна конфігурація траси транспортування вантажу, умови роботи конвеєра. Розрахункова схема конвеєра наведена на рис. 1.

За аналогією з [4], вихідними даними для проектного розрахунку стрічкового транспортера розглянутої конструкції є наступні:

- транспортований матеріал;
- продуктивність конвеєра;
- висота або кут нахилу похилої частини конвеєра  $H$  або  $\beta$  відповідно;
- довжини відрізків та радіуса конвеєра:  $L_{12}$ ,  $L_{34}$ ,  $L_{56}$ ,  $L_{78}$ ,  $L_{156}$ ,  $L_{67}$ ,  $L_{78}$ ,  $R_1$  м.

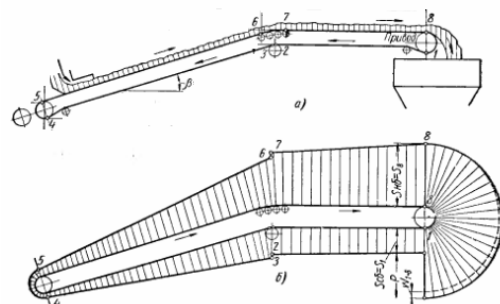


Рис. 1. Стрічковий конвеєр:  
а – розрахункова схема; б – діаграма натягу стрічки

Fig. 1. Band conveyor:  
a – design scheme; b – diagram of band tension

Для зручності у подальшому дослідженні визначаємо, що на конвеєрі використовуються

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

жолобчаті трироликові опори з кутом нахилу бокових роликів  $20^\circ$  на робочій гілці та рядові прямі роликоопори – на холостій гілці.

Враховуючи дані табл. 8.1 та 8.2 з [9], а також табл. 1 з [4] наведено в табл. 1 основні властивості вантажів, які необхідні для подальших розрахунків.

Значення швидкості руху стрічки в табл. 1 пораховані, як середнє в заданому діапазоні можливих значень для даного вантажу.

Ширина стрічки, необхідна для забезпечення заданої продуктивності  $\Pi$ , визначається за формулою:

$$B_n \geq 1,1 \left( \sqrt{\frac{\Pi}{k_n k_\beta \rho v}} + 0,05 \right), \quad (1)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт площі поперечного перерізу матеріалу на стрічці (табл. 1);  $k_\beta$  – коефіцієнт, який враховує зменшення площі перерізу матеріалу на стрічці внаслідок його часткового зсипання в бік, протилежний напрямку руху (стор. 403, [9]);  $\rho$  – насипна щільність транспортованого матеріалу (табл. 1), т/м<sup>3</sup>.

Пораховане значення ширини стрічки округлюється до найближчого більшого зі стандар-

тного ряду ширини стрічки: 400; 500; 650; 800; 1 000, 1 200 мм.

Для зручності подальших досліджень зробимо деякі алгебраїчні перетворення у виразі (1). Після них маємо:

$$k_n \rho v (0,91 B_n - 0,05)^2 \geq \frac{\Pi}{k_\beta}. \quad (2)$$

Для однозначного визначення необхідної ширини, яка забезпечує проектну продуктивність конвеєра, потрібно, щоб співвідношення  $\Pi/k_\beta$  належало деякому діапазону значень. Такі діапазони наведені в табл. 2 [4]. Як відомо з формули (2), значення величини  $\Pi/k_\beta$  залежить від ширини стрічки, типу вантажу та прийнятої щільності матеріалу вантажу. Граничні значення діапазонів наведені у табл. 2 та пораховані для відповідних граничних значень щільності матеріалу. Наприклад, для піску та ширини стрічки  $B = 400$  мм діапазон зміни  $\Pi/k_\beta = 84,3 - 99,4$ , при цьому 84,3 відповідає щільності піску 1,4 т/м<sup>3</sup>, а 99,4 – щільності піску 1,65 т/м<sup>3</sup>. Приклад використання даних табл. 2 детально описаний в роботі [4].

Таблица 1

## Швидкість руху стрічки та властивості вантажів

Table 1

## Rate of movement of band and properties of loads

Насипні вантажі	Щільність матеріалу $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт $k_n$	Швидкість руху стрічки, м/с, при ширині, мм				
			400	500 та 650	800–1 200	1 200–1 600	1 800–2 000
Пісок	1,4–1,65	470	1,3	1,5	2,6	3,3	5,5
Торф	0,33–0,4	550	1,3	1,5	2,6	3,3	5,5
Земля	1,1–1,6	470	1,3	1,5	2,6	3,3	5,5
Гравій	1,5–1,9	470	1,1	1,3	1,8	2,6	3,6
Каміння	1,8–2,2	550	–	1,3	1,3	1,8	2,6
Вугілля	0,8–1,0	470	1,1	1,3	1,4	1,8	–
Цемент	1,0–1,8	470	–	1,1	1,0	–	–
Щебінь	1,3–1,8	550	1,1	1,3	1,8	2,6	3,6

Таблиця 2

Діапазони значень співвідношення  $\Pi/k_B$ , які відповідають типу вантажу та ширині стрічки

Table 2

Ranges of values of correlation  $\Pi/k_B$  corresponding to the type of load and band width

Насипні вантажі	Щільність матеріалу $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Діапазони значень співвідношення $\Pi/k_B$ , т/год, при ширині стрічки, мм		
		400	500	650
пісок	1,4–1,65	84,3–99,4	161,9–190,8	289,4–341,1
торф	0,33–0,4	23,3–28,2	44,6–54,1	79,8–96,7
земля	1,1–1,6	66,3–96,4	127,2–185	227,4–330,7
гравій	1,5–1,9	76,5–96,9	150,3–190,4	268,7–340,4
каміння	1,8–2,2	–	211,1–258	377,3–461,2
вугілля	0,8–1,0	40,8–51	80,2–100,2	143,3–179,1
цемент	1,0–1,8	–	84,8–152,6	151,6–272,8
щебінь	1,3–1,8	77,6–107,4	152,5–211,1	272,6–377,4

Закінчення табл. 2

End of table 2

Насипні вантажі	Щільність матеріалу $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Діапазони значень співвідношення $\Pi/k_B$ , т/год, при ширині стрічки, мм		
		800	1 000	1 200
Пісок	1,4–1,65	786,5–926,9	1 265,3–1 491,3	2 357,6–2 778,6
Торф	0,33–0,4	216,9–262,9	349–423	650,3–788,3
Земля	1,1–1,6	617,9–898,8	994,2–1 446,1	1 852,4–2 694,4
Гравій	1,5–1,9	583,3–738,9	938,5–1 188,8	1 990,2–2 520,9
Каміння	1,8–2,2	591,6–723,1	951,9–1 163,4	1 934,8–2 364,8
Вугілля	0,8–1,0	242–302,5	389,4–486,7	734,88–918,6
Цемент	1,0–1,8	216,1–388,9	347,6–625,7	–
Щебінь	1,3–1,8	591,6–819,2	951,9–1 318	2 018,5–2 794,8

Для визначення параметричної залежності потужності приводу від проектних параметрів у роботі [4] розбито контур тягового органу конвеєра на прямолінійні та криволінійні ділянки (рис. 1, а), та для подальшого розрахунку використано метод тягового розрахунку по контуру. Для визначеності прийнято привід конвеєра з одним ведучим барабаном, кут обхвату якого  $\gamma = 180^\circ$ . Поверхня барабана футерована гумою. Таким чином, тяговий фактор конвеєра відповідно до табл. 3 [4] за прийнятих припущень буде  $e^{\mu\gamma} = 3,52$ .

Залежність питомої ваги матеріалу на стрічці від ширини стрічки та продуктивності конвеєра наведені в табл. 3.

Для визначеності у подальших розрахунках прийнято як робочий орган стрічкового конвеєра стрічку конвеєрну гумовотканинну за ГОСТ 20-85 БКНЛ-150, межа міцності прокладок якої на розрив  $S_p = 150$  Н/мм. Крім того, всюди далі будемо вважати, що умови роботи конвеєра важкі або дуже важкі, тобто коефіцієнт опору руху стрічки  $w = 0,03$ .

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Залежність значення лінійної ваги стрічки від кількості прокладок та ширини стрічки наведено в табл. 4 [4].

Аналітичні залежності потужності приводу

конвеєра від проектних параметрів побудовані та обґрунтовані в роботі [4]. Такі залежності наведені в табл. 5.

Таблиця 3

**Залежність питомої ваги матеріалу  $q_m$  на стрічці  
від ширини стрічки та продуктивності конвеєра**

Table 3

<b>Dependence of specific gravity of material <math>q_m</math> at the band on the band width and conveyor productivity</b>					
Насипні вантажі	Ширина стрічки, мм				
	400	500 та 650	800–1 200	1 200–21 600	1 800–2 000
Пісок	2,14П	1,85П	1,07П	0,84П	0,51П
Торф	2,14П	1,85П	1,07П	0,84П	0,51П
Земля	2,14П	1,85П	1,07П	0,84П	0,51П
Гравій	2,53П	2,14П	1,54П	1,07П	0,77П
Каміння	–	2,14П	2,14П	1,54П	1,07П
Вугілля	2,53П	2,14П	1,98П	1,54П	–
Цемент	–	2,53П	2,78П	–	–
Щебінь	2,53П	2,14П	1,54П	1,07П	0,77П

Таблиця 4

**Лінійна вага стрічок**

Table 4

<b>Linear weight of bands</b>				
Ширина стрічки $B$ , мм	Лінійна вага стрічки при $i = 3$ , Н/м	Лінійна вага стрічки при $i = 4$ , Н/м	Лінійна вага стрічки при $i = 5$ , Н/м	Лінійна вага стрічки при $i = 6$ , Н/м
400	51,2	57,6	64	70,4
500	64	72	80	88
650	83,2	93,6	104	114,4
800	102,4	115,2	128	140,8
1 000	128	144	160	176
1 200	153,6	172,8	192	211,2



Таблиця 5

## Установлювана потужність приводу

Table 5

## Calculation drive power

Ширина стрічки, мм	$P_y$ при щільності вантажу $\rho$ , Н/м		
	до 1 т/м <sup>3</sup>	1–2 т/м <sup>3</sup>	Більше ніж 2 т/м <sup>3</sup>
1	2	3	4
400	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+0,65(L_r+L_{34}+3,08(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+0,7(L_r+L_{34}+3,06(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+0,75(L_r+L_{34}+3,08(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$
500	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+0,81(L_r+L_{34}+2,82(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+0,87(L_r+L_{34}+2,84(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+0,94(L_r+L_{34}+2,82(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$
650	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+1,23(L_r+L_{34}+2,18(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+1,31(L_r+L_{34}+2,2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+1,43(L_r+L_{34}+2,2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$
800	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+2,15(L_r+L_{34}+2,2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+2,31(L_r+L_{34}+2,2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+2,51(L_r+L_{34}+2,2(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$
1 000	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+2,75(L_r+L_{34}+2,1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+2,98(L_r+L_{34}+2,1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+3,25(L_r+L_{34}+2,1(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$
1 200	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+3,13(L_r+L_{34}+2,14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+3,39(L_r+L_{34}+2,14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$	$[\nu(1,08e^{\mu\gamma}-0,92)e^{w\alpha}/833,3\eta(e^{\mu\gamma}-1,08e^{w\alpha})][0,033q_c(L_r+L_{34}+L_{56})\cos\beta+32,3(L_{56}-L_{34})\sin\beta+L_{78}/e^{w\alpha}]+3,7(L_r+L_{34}+2,14(L_{56}+L_{78}/e^{w\alpha}))+q_m(L_{56}(0,03\cos\beta+\sin\beta)+0,03L_{78}/e^{w\alpha})]$

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

## Результати

Виконаємо графічний аналіз впливу проектних параметрів горизонтально-похилого стрічкового конвеєра (рис. 1) для транспортування землі на потужність необхідного приводу.

Вихідні дані для дослідження приймемо такі:

- транспортований матеріал – земля;
- щільність  $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$ ;
- продуктивність конвеєра  $\Pi = 40 \text{ м}^3/\text{год} = 64 \text{ т/год}$ ;
- висота підйому вантажу  $H = 6,5 \text{ м}$ ;
- траса конвеєра: довжина  $L_T = 37,1 \text{ м}$ ;
- відрізки траси  $L_{34} = L_{56} = 15,02 \text{ м}$ ,  
 $L_T = L_{78} = 21,02 \text{ м}$ ,  $L_{T56} = 16,08 \text{ м}$ ,  $L_{67} = 2,67 \text{ м}$ ,  
 $R_1 = 6 \text{ м}$ .

За умови, що  $H = 6,5 \text{ м}$  та  $L_{T56} = 16,08 \text{ м}$ , визначаємо кут нахилу похилої частини конвеєра:

$$\beta = \arctg \frac{H}{L_{T56}} = \arctg \frac{6,5}{16,08} \approx 22^\circ.$$

За допомогою табл. 5 (с. 403, [9]) маємо:  $k_\beta = 0,76$ .

Визначаємо значення співвідношення  $\Pi/k_\beta$  за умови  $\Pi = 64 \text{ т/год}$  та  $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$ :

$$\Pi/k_\beta = 64/0,76 = 84,2 < 96,4.$$

За табл. 2 приймаємо значення ширини стрічки для забезпечення необхідної проектної продуктивності конвеєра  $B = 400 \text{ мм}$ . За табл. 1 для вантажу (земля) обираємо швидкість руху стрічки  $v = 1,3 \text{ м/с}$ .

Графічна залежність ширини стрічки для забезпечення необхідної проектної продуктивності конвеєра від значення співвідношення  $\Pi/k_\beta$  при вантажу – земля зі щільністю  $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$  зображена на рис. 2.

Графічна залежність ширини стрічки для забезпечення необхідної проектної продуктивності конвеєра від значення продуктивності  $\Pi$  при куті нахилу похилої ділянки конвеєра  $\beta = 22^\circ$  та відповідному  $k_\beta = 0,76$  при вантажу – земля зі щільністю  $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$  зображена на рис. 3.

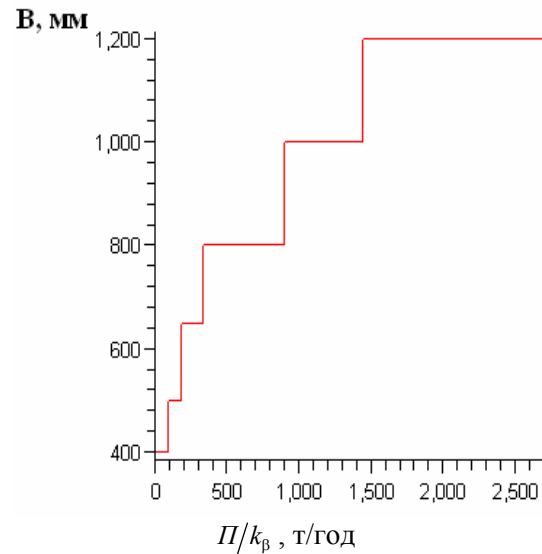


Рис. 2. Графічна залежність ширини стрічки для забезпечення необхідної проектної продуктивності конвеєра від значення співвідношення  $\Pi/k_\beta$

Fig. 2. Graphical dependence of band width to provide the necessary project productivity on the value of the ratio  $\Pi/k_\beta$

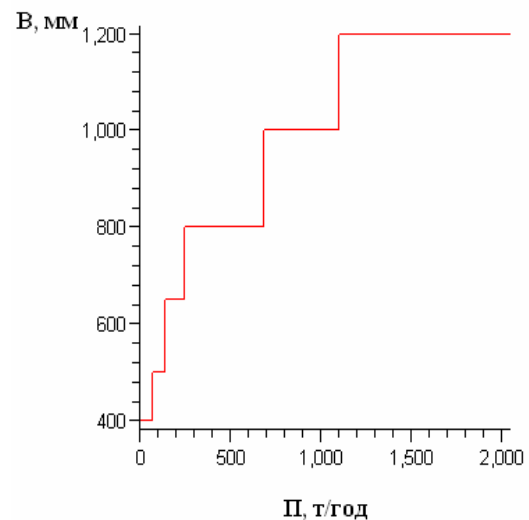


Рис. 3. Графічна залежність ширини стрічки для забезпечення необхідної проектної продуктивності конвеєра від значення продуктивності  $\Pi$  при  $\beta = 22^\circ$  та  $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$

Fig. 3. Graphical dependence of band width to provide the necessary project productivity of conveyor on the value of performance  $\Pi$  at  $\beta = 22^\circ$  and  $\rho = 1,6 \text{ т/м}^3$

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Відповідно до  $B = 400$  мм з табл. 3 обираємо відповідну залежність питомої ваги матеріалу на стрічці від продуктивності конвеєра  $q_m = 2,14\Pi$  Н/м.

Приймаємо кількість прокладок стрічки  $i = 4$  та відповідну ширину  $B = 400$  мм за табл. 4 її лінійну вагу  $q_c = 57,6$  Н/м.

При  $L_{67} = 2,67$  м,  $R_1 = 6$  м визначаємо кут обхвату стрічкою батареї роликів за формулою:

$$\alpha = \frac{L_{67}}{R_1} = \frac{2,67}{6} = 0,445 \text{ рад} \approx 25,5^\circ.$$

Для зазначених умов, тобто  $B = 400$  мм,  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup> (земля),  $q_m = 2,14\Pi$  Н/м,  $\beta = 22^\circ$  та заданих геометричних розмірах ділянок конвеєра графічна залежність установлюваної потужності приводу конвеєра від величини проектної продуктивності зображена на рис. 4. Діапазон зміни продуктивності прийнятий  $[0, 73,3]$ , оскільки при іншому зміниться ширина стрічки та відповідно параметрична залежність потужності приводу від продуктивності.

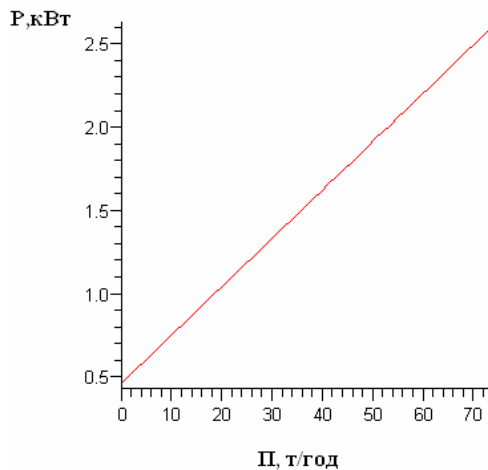


Рис. 4. Графічна залежність потужності приводу від проектної продуктивності конвеєра  $\Pi$  при  $\beta = 22^\circ$  та  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup>

Fig. 4. Graphic dependence of drive power on the project productivity of conveyor  $\Pi$  at  $\beta = 22^\circ$  and  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup>

Аналітична залежність установлюваної потужності приводу конвеєра від величини проектної продуктивності при вищезазначених умовах має вигляд:

$$P = 0,029\Pi + 0,47.$$

Для зазначених умов, тобто  $B = 400$  мм,  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup> (земля),  $q_m = 2,14\Pi$  Н/м,  $\Pi = 64$  т/год та заданих геометричних розмірах ділянок конвеєра графічна залежність установлюваної потужності приводу конвеєра від величини кута нахилу похилої ділянки конвеєра  $\beta$  зображена на рис. 5. Діапазон зміни кута нахилу  $\beta$  прийнятий  $[0, \pi/6]$ , оскільки при іншому зміниться ширина стрічки та відповідно параметрична залежність потужності приводу від продуктивності та кута нахилу.

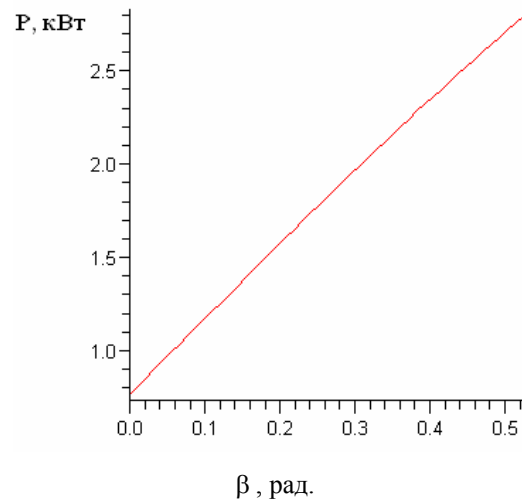


Рис. 5. Графічна залежність потужності приводу від кута нахилу похилої ділянки конвеєра  $\beta$  при  $\Pi = 64$  т/год та  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup>

Fig. 5. Graphical dependence of drive power on the angle of the inclined conveyor section  $\beta$  at  $\Pi = 64$  т/год and  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup>

Аналітична залежність установлюваної потужності приводу конвеєра від кута нахилу похилої ділянки конвеєра  $\beta$  при вищезазначених умовах має вигляд:

$$P = 0,238 \cos \beta + 4,11 \sin \beta + 0,534.$$

Для розуміння характеру зміни потужності від кута  $\beta$  наведемо цей же графік, але на більшому діапазоні зміни кута  $\beta$ , тобто  $[0, 2\pi]$ .

Бачимо, що така залежність являє собою синусоїду з амплітудою 4,11, яка зсунута по вертикалі на 0,872. Але наведена на рис. 6 залежність відповідає дійсності лише на відрітку змі-

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

ни кута нахилу  $\beta$   $[0, \pi/6]$ .

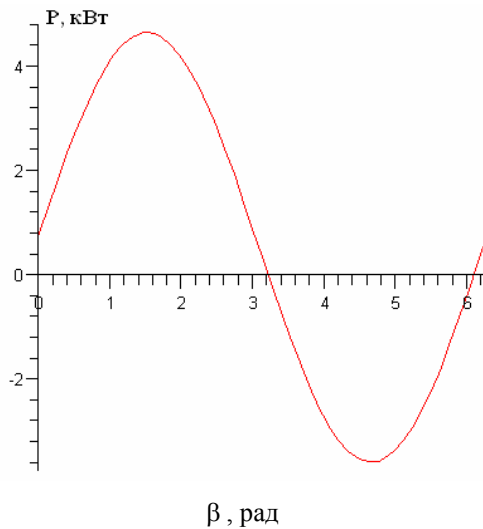


Рис. 6. Графічна залежність потужності приводу від кута нахилу похилої ділянки конвеєра  $\beta$  при  $\Pi = 64$  т/год та  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup>

Fig. 6. Graphical dependence of drive power on the angle of the inclined conveyor section  $\beta$  at  $\Pi = 64$  t/h and  $\rho = 1,6$  t/m<sup>3</sup>

Наведемо графічну залежність установлюваної потужності приводу конвеєра від значення проектної продуктивності конвеєра заданої конфігурації та геометричних розмірах його ділянок з урахуванням зміни ширини стрічки та відповідних їй швидкості руху стрічки, питомої ваги стрічки та питомої ваги вантажу на стрічці при досягненні значення продуктивності до граничного в табл. 2. Умови роботи – важкі.

Для зазначених умов, тобто  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup> (земля),  $\beta = 22^\circ$  визначимо за табл. 2 та 5 аналітичні залежності установлюваної потужності приводу конвеєра від значення проектної продуктивності конвеєра та межі їх дій:

$$P = 0,029\Pi + 0,47 \text{ при } \Pi \in (0, 73.3];$$

$$P = 0,025\Pi + 0,571 \text{ при } \Pi \in (73.3, 140.6];$$

$$P = 0,025\Pi + 0,732 \text{ при } \Pi \in (140.6, 251.3];$$

$$P = 0,014\Pi + 1,061 \text{ при } \Pi \in (251.3, 683.1];$$

$$P = 0,014\Pi + 1,326 \text{ при } \Pi \in (683.1, 1099];$$

$$P = 0,011\Pi + 1,56 \text{ при } \Pi \in (1099, 2047.7].$$

Відповідна наведеним аналітичним залежностям графічна залежність установлюваної потужності приводу конвеєра від величини проектної продуктивності на діапазоні  $[0, 2047,7]$  т/год зображена на рис. 7.

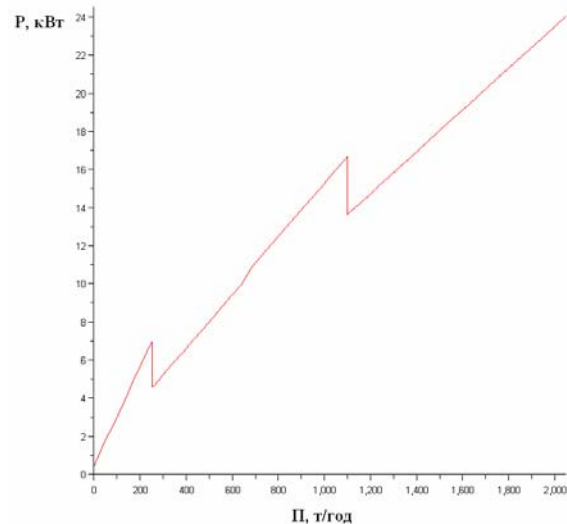


Рис. 7. Графічна залежність потужності приводу від проектної продуктивності конвеєра  $\Pi$  при  $\beta = 22^\circ$  та  $\rho = 1,6$  т/м<sup>3</sup>

Fig. 7. Graphic dependence of drive power on the project performance of conveyor  $\Pi$  at  $\beta = 22^\circ$  and  $\rho = 1,6$  t/m<sup>3</sup>

### Наукова новизна та практична значимість

Виконано дослідження залежності ширини стрічки конвеєра від узагальненого параметру, який враховує проектну продуктивність конвеєра та кут нахилу його похилої ділянки. Для конкретного типу вантажу та кута нахилу ділянки конвеєра побудовано графічну залежність ширини стрічки від продуктивності при фіксованих інших проектних параметрів.

Виконано якісний аналіз залежності потужності приводу стрічкових транспортерів з похилою та горизонтальною ділянками (в тому числі і з урахуванням зміни ширини стрічки) від проектної продуктивності, кута нахилу похилої частини при фіксованих геометричних розмірах та конфігурації траси конвеєра, умов роботи, а також з урахуванням стандартних розмірів та параметрів стрічок, роликкоопор. Побудовані відповідні графічні залежності.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Використання побудованих залежностей дає можливість визначити загальний характер зміни потужності приводу при варіюванні таких параметрів, як продуктивність та кут нахилу ділянки конвеєра.

Запропоновані залежності можуть бути використані для визначення раціональної потужності приводу конвеєра при конкретних проектних даних.

**Висновки**

Для стрічкових транспортерів з похилою та горизонтальною ділянками побудовано графічну залежність необхідної ширини стрічки від проектних параметрів: типу вантажу, проектної продуктивності, геометричних розмірів та конфігурації траси конвеєра. Побудована залежність дає можливість швидко отримувати необхідну ширину стрічки при відомих проектних даних. За результатами досліджень побудовано

графічні залежності потужності приводу конвеєра від продуктивності з урахуванням зміни ширини стрічки при її зростанні, а також – від кута нахилу ділянки траси конвеєра. Встановлено, що функція зміни величини потужності конвеєра від проектної продуктивності (при фіксованих інших параметрах) є лінійною та монотонно зростаючою на ділянках постійної ширини стрічки, а залежність величини потужності конвеєра від його кута нахилу (при фіксованих інших параметрах) є нелінійною, синусоїдальною.

Такі залежності дають можливість встановити загальну закономірність відповідних залежностей та отримувати необхідне значення потужності приводу із врахуванням типу та фізико-механічних властивостей вантажів, величини висоти підйому, довжини транспортування та проектної продуктивності.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Александров, М. П. Подъемно-транспортные машины : учебник / М. П. Александров. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Баумана : Высш. шк., 2000. – 522 с.
2. Аналіз впливу проектних характеристик похилого ковшового елеватору на потужність його приводу / В. М. Богомаз, М. В. Боренко, С. В. Пацановський, О. О. Ткачов // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 6 (66). – С. 136–157. doi: 10.15802/stp2016/90497.
3. Богомаз, В. М. Аналіз впливу проектних характеристик елеватору на параметри його приводу / В. М. Богомаз // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 3 (57). – С. 162–175. doi: 10.15802/stp2015/46076.
4. Богомаз, В. М. Дослідження залежності потужності приводу стрічкового конвеєра від його проектних параметрів / В. М. Богомаз // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 131–146. doi: 10.15802/stp2016/61024.
5. Зенков, Р. Л. Машины непрерывного транспорта : учебник / Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, Л. Н. Колобов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 432 с.
6. Иванченко, Ф. К. Подъемно-транспортные машины : підручник / Ф. К. Иванченко. – Київ : Вища шк., 1993. – 413 с.
7. Катрюк, И. С. Машины непрерывного транспорта. Конструкции, проектирование и эксплуатация : учеб. пособие / И. С. Катрюк, Е. В. Мусияченко. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 266 с.
8. Кузьмин, А. В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин : учеб. пособие / А. В. Кузьмин. – Минск : Вышэйш. шк., 1983. – 350 с.
9. Подъемно-транспортные машины: розрахунки підймальних і транспортувальних машин : підручник / В. С. Бондарев, О. І. Дубинець, М. П. Колісник [та ін.]. – Київ : Вища шк., 2009. – 734 с.
10. Ракша, С. В. Аналіз впливу пружних деформацій несучого каната на зусилля в тяговому канаті підвісної дороги / С. В. Ракша, Ю. К. Горячов, О. С. Куроп'ятник // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 6 (48). – С. 110–119. doi: 10.15802/stp2013/19686.
11. Расчет и проектирование транспортных средств непрерывного действия : науч. пособие для вузов / А. И. Барышев, В. А. Будишевский, А. А. Сулима, А. М. Ткачук. – Донецк : Норд-Пресс, 2005. – 689 с.
12. Ромакин, Н. Е. Машины непрерывного транспорта : учеб. пособие / Н. Е. Ромакин. – Москва : Академия, 2008. – 432 с.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

13. Askari, H. Nonlinear Oscillations Analysis of the Elevator Cable in a Drum Drive Elevator System / H. Askari, D. Younesian, Z. Saadatnia // *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*. – 2015. – Vol. 7. – Iss. 01. – P. 43–57. doi: 10.4208/aamm.2013.m225.
14. Failure Analysis on Conveyer Chain Links of a Central Bucket Elevator / J. Yin, O. Muvengi, J. Kihui, K. Njoroge / *J. of Mechanical and Civil Engineering*. – 2016. – Vol. 13. – Iss. 04. – P. 56–63. doi: 10.9790/1684-1304075663.
15. Li, S. C. Study on Elevator Drive System Dynamics Simulation of Rail Transport Conveyer / S. C. Li, X. J. Wang // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 511–512. – P. 619–622. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.511-512.619.

В. Н. БОГОМАЗ<sup>1\*</sup>, Н. В. БОРЕНКО<sup>2\*</sup>, И. В. НЕЧАЙ<sup>3\*</sup>, А. П. СЕВЕРИН<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Военная подготовка специалистов Государственной специальной службы транспорта», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, эл. почта wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

<sup>2\*</sup>Каф. «Военная подготовка специалистов Государственной специальной службы транспорта», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, эл. почта bmv1961@ukr.net, ORCID 0000-0001-9578-3906

<sup>3\*</sup>Каф. «Прикладная математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, эл. почта i.v.nechay@gmail., ORCID 0000-0002-9250-7794

<sup>4\*</sup>Каф. «Военная подготовка специалистов Государственной специальной службы транспорта», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 19 09, эл. почта severinlist@gmail.com, ORCID 0000-0001-9967-4731

## КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО-НАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА ОТ ЕГО ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

**Цель.** Одним из основных элементов ленточных конвейеров является привод. Для анализа влияния проектных параметров на величину мощности привода необходимо провести расчеты по стандартным методикам, изложенным в современной технической литературе. Основными проектными параметрами ленточного конвейера являются: тип груза, проектная производительность, геометрические размеры участков и конфигурация трассы в целом. Особенностью расчетов ленточного конвейера, по сравнению с элеваторами, является зависимость ширины его ленты от производительности, угла наклона участка и типа груза. В статье для учета этого факта при расчетах необходимо построить зависимость ширины ленты от обобщенного параметра, который учитывает изменение проектных параметров. Для определения общей закономерности изменения величины мощности привода ленточного конвейера при варьировании его проектных параметров в статье необходимо построить соответствующие графические зависимости с учетом стандартных размеров и параметров лент. **Методика.** В работе рассматривается ленточный конвейер с двумя участками: наклонным и горизонтальным. Проводится детальный анализ зависимости ширины ленты конвейера и мощности его привода от типа груза, проектной производительности, геометрических размеров и конфигурации трассы конвейера, используя соответствующие параметрические зависимости, построенные авторами в предыдущих работах. **Результаты.** Для ленточных конвейеров рассматриваемого типа построены графические зависимости ширины ленты от параметра, характеризующего проектную производительность и угол наклона участка трассы, а также – от производительности при фиксированном угле наклона. С учетом изменения ширины ленты при росте величины проектной производительности построены графические зависимости мощности привода от производительности и угла наклона наклонного участка. **Научная новизна.** Авторами впервые построены общие зависимости ширины ленты и мощности привода конвейера с двумя участками (наклонной и горизонтальной) от проектных параметров и приведены соответствующие графики. **Практическая значимость.** Использование построенных графических зависимостей мощности привода ленточных конвейеров с наклонным и горизонтальным участками от проектных параметров дает возможность быстрого определения приблизительного значения мощности привода на стадии проектирования, а также определить общий характер изменения ее величины при варьировании проектных параметров.

**Ключевые слова:** конвейер; лента; привод; мощность; производительность; угол наклона

V. M. BOHOMAZ<sup>1\*</sup>, M. V. BORENKO<sup>2\*</sup>, I. V. NECHAY<sup>3\*</sup>, O. P. SEVERYN<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 19 09, e-mail wbogomas@i.ua, ORCID 0000-0001-5913-2671

<sup>2\*</sup>Dep. «Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 19 09, e-mail bmw1961@ukr.net, ORCID 0000-0001-9578-3906

<sup>3\*</sup>Dep. «Applied Mathematics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 19 09, e-mail i.v.nechay@gmail, ORCID 0000-0002-9250-7794

<sup>4\*</sup>Dep. «Military Training of Specialists of the State Special Service of Transport», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 19 09, e-mail severinlist@gmail.com, ORCID 0000-0001-9967-4731

## QUALITATIVE ANALYSIS OF DEPENDENCE OF DRIVE POWER HORIZONTAL-INCLINED BELT CONVEYOR ON ITS INITIAL PARAMETERS

**Purpose.** One of the main elements of band conveyors is a drive. To analyze the effect of design parameters on the drive power it is necessary to carry out the calculations according to standard procedures outlined in the current technical literature. The main design parameters of the band conveyor are: the type of cargo, project performance, the geometric dimensions of sections and track configuration as a whole. The feature of band conveyor calculation as compared to the elevators is the dependence of the band width on its performance, the inclination angle and the type of cargo. In the article for the account of this fact during calculations it is necessary to construct the dependence of the band width on the generalized parameter, which takes into account change in the design parameters. To determine the general pattern of changing the value of band conveyor drive power when varying its design parameters in the article it is necessary to construct the corresponding graphic dependences taking into account the standard sizes and bands parameters. **Methodology.** We consider the band conveyor with two sections: the inclined and horizontal one. It is conducted a detailed analysis of dependence of the conveyor band width and its drive power on the type of cargo, project performance, geometric dimensions and configuration of the conveyor track, using the appropriate parameter dependences constructed by the authors in previous papers. **Findings.** For band conveyors of this type there were constructed the graphics dependences of the band width on the parameter characterizing the project performance and the inclination angle of the track section, and on the performance at a fixed angle of inclination. Taking into account the changes in the band width with an increase in the value of project performance the graph dependences of drive power on the productivity and the inclination angle of the inclined section were built. **Originality.** For the first time there were built the general dependences of the conveyor band width and the drive power with two sections (inclined and horizontal) on the design parameters and there were presented the corresponding graphs. **Practical value.** Use of the built graphic dependences of drive power of band conveyors with the inclined and horizontal sections on the design parameters makes it possible to quickly determine the approximate value of drive power at the design stage, and to determine the general change nature of its value while varying the design parameters.

**Keywords:** conveyor; band; drive; power; productivity; inclination angle

### REFERENCES

1. Aleksandrov, M. P. (2000). *Pod'yemno-transportnyye mashiny*. Moscow: MGTU.
2. Bohomaz, V. M., Borenko, M. V., Patsanovskiy, S. V., & Tkachov, O. O. (2016). Analysis of influence of design characteristics of inclined bucket elevator on the power of its drive. *Science and Transport Progress*, 6(66), 136-157. doi: 10.15802/stp2016/90497
3. Bohomaz, V. M. (2015). Influence analyses of designed characteristics of the elevator to the parameters of its drive. *Science and Transport Progress*, 3(57), 162-175. doi: 10.15802/stp2015/46076
4. Bohomaz, V. M. (2016). Research of dependence of belt conveyer drive power on its design parameters. *Science and Transport Progress*, 1(61), 131-146. doi: 10.15802/stp2016/61024
5. Zenkov, R. L., Ivashkov, I. I., & Kolobov, L. N. (1987). *Mashiny nepreryvnogo transporta*. Moscow: Mashinostroeniye.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

6. Ivanchenko, F. K. (1993). *Pidiomno-transportni mashyny*. Kyiv: Vyshcha shkola.
7. Katryuk, I. S., & Musiyachenko, Y. V. (2006). *Mashyny nepreryvnogo transporta. Konstruktsii, proyektirovaniye i ekspluatatsiya*. Krasnoyarsk: IPTs KGTU.
8. Kuzmin, A. V. (1983). *Spravochnik po raschetam mekhanizmov podemno-transportnykh mashin*. Minsk: Vysheyschaya shkola.
9. Bondariev, V. S., Dubynets, O. I., Kolisnyk, M. P., Bondariev, S. V., Horbatenko, Y. P., & Barabanov, V. Y. (2009). *Pidiomno-transportni mashyny: rozrakhunky pidiimalnykh i transportuvalnykh mashyn*. Kyiv: Vyshcha shkola.
10. Raksha, S. V., Goryachev, Y. K., & Kuropyatnik, A. S. (2013). Influence analysis of elastic deformations of the track cable on efforts in the hauling rope of aerial ropeway. *Science and Transport Progress*, 6(48), 110-119. doi: 10.15802/stp2013/19686
11. Baryshev, A. I., Budishevskiy, V. A., Sulima, A. A., & Tkachuk, A. M. (2005). *Raschet i proyektirovaniye transportnykh sredstv nepreryvnogo deystviya*. Donetsk: Nord-Press.
12. Romakin, N. Y. (2008). *Mashyny nepreryvnogo transporta*. Moscow: Akademiya.
13. Askari, H., Younesian, D., & Saadatnia, Z. (2015). Nonlinear Oscillations Analysis of the Elevator Cable in a Drum Drive Elevator System. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 7(01), 43-57. doi: 10.4208/aamm.2013.m225
14. Yin, J., Muvengei, O., Kihui, J., & Njoroge, K. (2016). Failure Analysis on Conveyer Chain Links of a Central Bucket Elevator. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(04), 56-63. doi: 10.9790/1684-1304075663
15. Li, S. C., & Wa, J. (2014). Study on Elevator Drive System Dynamics Simulation of Rail Transport Conveyer. *Applied Mechanics and Materials*, 511-512, 619-622. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.511-512.619

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С. В. Ракшою (Україна);  
д.т.н., проф. В. Г. Заренбіним (Україна)

Надійшла до редколегії: 10.10.2016

Прийнята до друку: 10.01.2017



НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 621.875.5:004.942

В. В. СУГЛОБОВ<sup>1\*</sup>, Е. В. ТКАЧУК<sup>2</sup><sup>1</sup>Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, эл. почта suglobov\_v\_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894<sup>2</sup>Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (066) 149 23 49, эл. почта t-katya@inbox.ru, ORCID 0000-0002-0309-1644

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННЫХ СТРЕЛОВЫХ СИСТЕМ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ

**Цель.** В исследовании необходимо: 1) сформировать массив геометрических, весовых и варьируемых данных для автоматизированного синтеза шарнирно-сочлененных стреловых систем; 2) разработать методику расчета и определения рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем в зависимости от основных технических параметров портального крана (максимальный и минимальный рабочие вылеты стрелы, высота подъема груза, значение заднего габарита, грузоподъемность крана); 3) провести изучение адекватности методики на компьютерных моделях портальных кранов.

**Методика.** Для определения кинематических характеристик каждого звена шарнирно-сочлененной стреловой системы (стрелы, хобота, оттяжки, противовеса, груза) разработана динамическая и математическая модели, которые позволяют описать движение шарнирно-сочлененной стреловой системы при изменении вылета стрелы. Впервые предложена методика расчета и определения рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем в зависимости от технических параметров портального крана.

**Результаты.** С помощью математического моделирования научно обоснована целесообразность использования предложенной методики определения конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем. Разработанный пакет геометрических, весовых и варьируемых данных позволяет упростить процесс подготовительных расчетов перед автоматизированным синтезом и оптимизировать конструкцию шарнирно-сочлененной стреловой системы портальных кранов.

**Научная новизна.** Впервые предложена методика расчета параметрических данных, которые позволяют определить рациональные конструктивные параметры шарнирно-сочлененной стреловой системы. Разработаны локальные программы для комплексного оптимизационного синтеза, позволяющие выполнить отбор наилучшего варианта конструкции одновременно по нескольким критериям качества и функциональным ограничениям.

**Практическая значимость.** Предложенная методика расчета конструктивных параметров может быть использована при проектировании новых и модернизации существующих портальных кранов с шарнирно-сочлененными стреловыми системами, что, в свою очередь, снизит материалоемкость и энергопотребление кранов.

**Ключевые слова:** портальный кран; шарнирно-сочлененная стреловая система; синтез; метод расчета; конструктивные параметры; динамическая модель; математическая модель

### Введение

Задача определения размеров шарнирно-сочлененной стреловой системы является важным этапом проектирования портального крана.

Для решения этой задачи предложены различные подходы [1, 9, 2–4, 14–18], однако ни один из них не дает рекомендаций по выбору геометрических, весовых и варьируемых параметров уравновешенной шарнирно-сочлененной стреловой системы на начальных стадиях расчета.

На структурной схеме шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана (рис. 1) указаны звенья, геометрические, весовые и варьируемые параметры которых необходимы для начала автоматизированного синтеза стреловой системы и уравнивающего устройства. К ним относятся:  $L_x$  – длина хобота;  $L_{кх}$  – длина контрхобота;  $L_c$  – длина стрелы;  $L_o$  – длина оттяжки;  $t_x$  – высота хобота;  $l_c$  – расстояние от оси стрелы до оси шарнира крепления тяги;  $X_{o2}$  – горизонтальная

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

координата крепления оттяжки от оси шарнира стрелы  $O_1$ ;  $Y_{o2}$  – вертикальная координата крепления оттяжки от оси шарнира стрелы  $O_1$ ;  $L_{\min}$  – минимальный вылет стрелы;  $L_{\max}$  – максимальный вылет стрелы;  $R_3$  – предельное значение величины заднего габарита;  $\alpha$  – угол наклона стрелы;  $\rho$  – угол отклонения грузового каната;  $G_c$  – вес стрелы;  $G_x$  – вес хобота;  $0.5G_o$  – половина веса оттяжки;  $G_{\Pi}$  – вес противовеса;  $Q_{\Gamma}$  – вес груза;  $l_k$  – длина переднего плеча коромысла;  $l_T$  – длина тяги противовеса;  $l$  – расстояние по вертикали от оси качания стрелы до оси качания коромысла;  $h$  – высота коромысла.

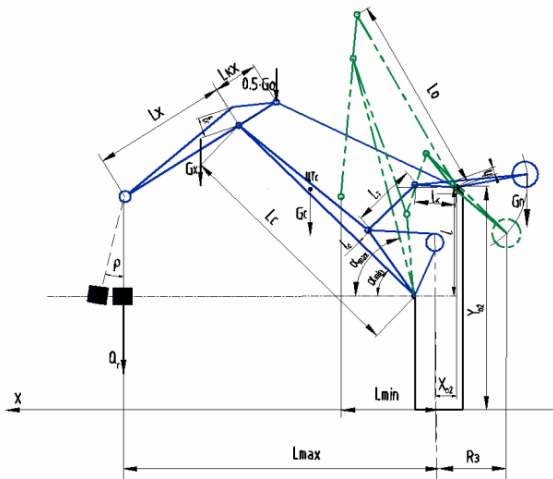


Рис. 1. Шарнирно-сочлененная стреловая система портального крана КПП 16(20)-36-10,5

Fig. 1. Articulated jib system of portal crane KPP 16 (20) -36-10,5

## Цель

Целью данных исследований является определение рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана и формирование массива геометрических, весовых и варьируемых данных для автоматизированного синтеза. Для достижения цели в исследовании предусмотрено: 1) разработать динамическую и математическую модели, позволяющие описать движение шарнирно-сочлененной стреловой системы при изменении вылета; 2) разработать методику расчета и определения рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененной

стреловой системы в зависимости от технических параметров портального крана (максимальный и минимальный рабочие вылеты стрелы, высота подъема груза, значение заднего габарита, грузоподъемность крана); 3) изучить адекватность методики на компьютерных моделях портальных кранов.

## Методика

Для проведения теоретических исследований, направленных на совершенствование процесса проектирования и синтеза шарнирно-сочлененной стреловой системы, разработана динамическая модель (рис. 2).

1. Разработка динамической модели шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана. Динамическая модель характеризуется геометрическими и инерционными параметрами.

За основу взята стреловая система, грузовый канат в которой проходит параллельно жесткой оттяжке.

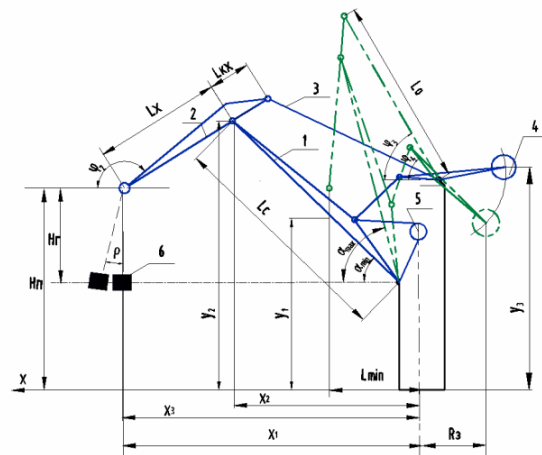


Рис. 2. Динамическая модель шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана:

1 – стрела; 2 – хобот; 3 – оттяжка;

4 – коромысло с противовесом;

5 – привод механизма изменения вылета; 6 – груз

Fig. 2. Dynamic model of articulated jib system of portal crane:

1 – jib, 2 – arm, 3 – jib tie,

4 – rocker with a counterweight,

5 – drive of luffing mechanism 6 – load

К первой группе относят:  $L_x$  – длина хобота;  $L_{cx}$  – длина контрхобота;  $L_c$  – длина стрелы;

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

$L_0$  – длина оттяжки;  $H_{\Pi}$  – высота подъема груза;  $H_{\Gamma}$  – высота подвеса груза;  $R_z$  – величина заднего габарита;  $\alpha$  – угловая координата стрелы;  $\rho$  – угол отклонения грузового каната от вертикали;  $y_1, y_2, y_3$  – вертикальные координаты центров тяжести стрелы, хобота, противовеса;  $x_1, x_2$  – горизонтальные координаты центров тяжести груза и хобота;  $x_3$  – горизонтальная координата оси блока хобота;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – угловые координаты ротора электродвигателя механизма изменения вылета стрелы, хобота, оттяжки и противовеса;  $L_{\min}$  – минимальный вылет стрелы;  $L_{\max}$  – максимальный вылет стрелы. К инерционным параметрам относят:  $m_1, m_2, m_3, m_4, m$  – массы стрелы, хобота в сборе с контрхоботом, оттяжки, противовеса и груза;  $J, J_1, J_2, J_3, J_4$  – моменты инерции относительно собственных осей вращения ротора электродвигателя механизма изменения вылета, стрелы, хобота, оттяжки, противовеса.

2. *Разработка математической модели шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана.* Входные данные математической модели, исходя из рекомендаций [5, 6], могут состоять из ее кинематической схемы, геометрии масс и характеристик цикла движения. Входными данными являются параметры шарнирно-сочлененной стреловой системы и позиционные критерии; максимальные значения скоростей и ускорений звеньев, главных векторов и главных моментов сил инерции.

Изменение положения стрелы приводит к изменению положений других звеньев, которые определяются координатами хобота –  $\varphi_2, y_2$ ; оттяжки –  $\varphi_3$ ; противовеса –  $\varphi_4$ ; груза –  $x_1$ . За счет сил инерции и собственного веса груз не только изменяет свое положение, которое определяется горизонтальной координатой и высотой подвеса груза, но и совершает колебания в вертикальной плоскости, определяемое координатой  $\rho$ .

Для составления обобщенных дифференциальных уравнений движения динамической модели шарнирно-сочлененной стреловой системы используем уравнения Лагранжа второго рода.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_{\alpha}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\rho}} - \frac{\partial T}{\partial \rho} = Q_{\rho}, \end{cases}$$

где  $t$  – время;  $\alpha, \rho$  – обобщенные координаты системы;  $Q_{\alpha}, Q_{\rho}$  – обобщенные силы, соответствующие координатам  $\alpha, \rho$ ;  $T$  – кинетическая энергия системы.

Кинетическая энергия шарнирно-сочлененной стреловой системы складывается из кинетической энергии привода механизма изменения вылета  $T_{эд}$ , стрелы  $T_c$ , хобота  $T_x$ , оттяжки  $T_0$ , противовеса  $T_{\Pi}$ , груза  $T_{\Gamma}$ .

Угловые и линейные скорости звеньев шарнирно-сочлененной стреловой системы связаны с обобщенными координатами и скоростями зависимостями:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1 &= \dot{\alpha} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha}; \quad \dot{\varphi}_2 = \dot{\alpha} \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}; \quad \dot{\varphi}_3 = \dot{\alpha} \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha}; \\ \dot{\varphi}_4 &= \dot{\alpha} \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha}; \quad \dot{x}_2 = \dot{\alpha} \frac{\partial x_2}{\partial \alpha}; \quad \dot{y}_2 = \dot{\alpha} \frac{\partial y_2}{\partial \alpha}, \end{aligned}$$

где  $\frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha}, \frac{\partial x_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial y_2}{\partial \alpha}$  – операторы передачи движения первого порядка.

Общий момент инерции шарнирно-сочлененной стреловой системы без учета груза:

$$\begin{aligned} J_{cc} &= J \left( \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} \right)^2 + J_1 + J_2 \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \right)^2 + \\ &+ m_2 \left( \frac{\partial x_2}{\partial \alpha} + \frac{\partial y_2}{\partial \alpha} \right)^2 + \\ &+ J_3 \left( \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha} \right)^2 + J_4 \left( \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha} \right)^2. \end{aligned}$$

Для вычисления обобщенных сил придадим системе возможное перемещение  $\delta \alpha > 0$ , в результате получим:

$$\begin{cases} Q_{\alpha} = M \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} + mg \frac{x_1 - x_2}{H} \frac{\partial x_3}{\partial \alpha}, \\ Q_{\rho} = -mg \frac{x_1 - x_3}{H}, \end{cases}$$

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

где  $M$  – момент на валу электродвигателя привода механизма изменения вылета;  $g$  – ускорение свободного падения.

В результате преобразований получено дифференциальное уравнение движения шарнирно-сочлененной стреловой системы при изменении вылета [6–8, 10]

$$\begin{cases} J_{cc} \ddot{\alpha} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_{cc}}{\partial \alpha} \ddot{\alpha} = M \frac{\partial \varphi_1}{\partial \alpha} + mg \frac{x_1 - x_2}{H} \frac{\partial x_3}{\partial \alpha}, \\ m \ddot{x}_1 = -mg \frac{x_1 - x_3}{H}. \end{cases}$$

**3. Методика расчета и определение рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы.** Определяющими исходными параметрами, имеющими конечные значения при проектировании портального крана, являются:  $L_{\min}$  – минимальный вылет стрелы;  $L_{\max}$  – максимальный вылет стрелы;  $R_z$  – предельное значение величины заднего габарита;  $H_{\Pi}$  – высота подъема груза. Эти параметры задаются заказчиком либо назначаются исходя из требований к технической характеристике конкретного крана.

Значениями всех остальных параметров обычно необходимо задаваться в качестве входных данных для выполнения расчета, синтеза и оптимизации шарнирно-сочлененной стреловой системы. Количество этих неопределенных параметров и диапазон их возможных геометрических значений достаточно велики, что затрудняет работу и приводит к большому числу вариантов вычислений.

Ранее [11–13] авторами выведены математические зависимости между заданными основными характеристиками портальных кранов и значениями неопределенных параметров, которые позволяют значительно сократить число таких параметров.

Расчет выполняется автоматически в программе MathCAD, в результате которого получаем массив геометрических параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы (рис. 3).

Исследование показало, что при одинаковом значении грузоподъемности и максимального вылета длины звеньев шарнирно-сочлененной стреловой системы значительно отличаются [12].

Экспериментально установлено, что у кранов одинаковой грузоподъемности усредненные веса одного погонного метра стрелы, хобота, оттяжки примерно одинаковы. Это дает возможность принять длины стрелы, хобота и оттяжки в качестве основных характеристик для определения весовых параметров других звеньев стреловой системы.

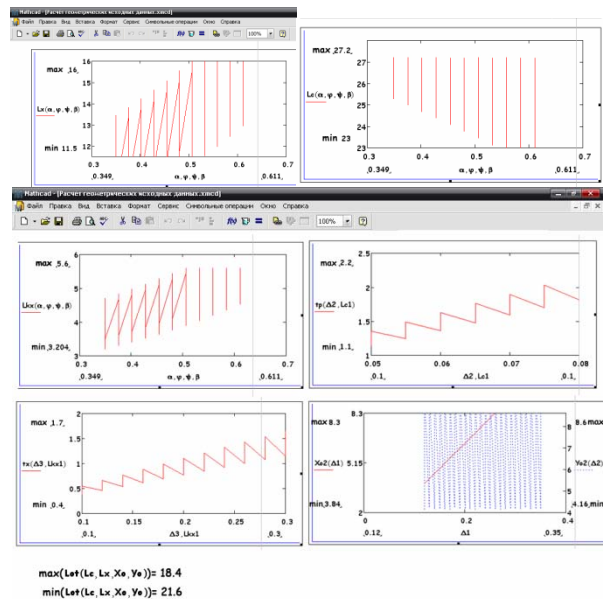


Рис. 3. Определение геометрических параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы в программе MathCAD

Fig. 3. Determination of geometrical parameters of the articulated jib system in MathCAD program

На основе обработанных статистических данных изученных портальных кранов получены значения веса  $q$  одного погонного метра звеньев шарнирно-сочлененной стреловой системы (табл. 1) и рассмотрена его взаимосвязь с номинальной грузоподъемностью крана  $q = f(Q)$ .

Экспериментально установленные значения усредненного веса 1 погонного метра каждого элемента в зависимости от грузоподъемности крана описываются разными аналитическими зависимостями, определение которых выполнено методом аппроксимации. Поиск аппроксимирующих функций, максимально приближенных к экспериментальным данным, осуществлен посредством программы MS Excel методом наименьших квадратов.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

В результате установлено, что зависимость  $q = f(Q)$  для стрелы наилучшим образом описывается линейной функцией  $q = 316,99 + 9,92Q$ ; для хобота – квадратичной функцией  $q = -113,21 + 27,35Q - 0,2Q^2$ ; для оттяжки – квадратичной функцией  $q = 41,03 + 5,45Q - 0,049Q^2$ .

Таблица 1

## Вес 1 погонного метра элементов шарнирно-сочлененной стреловой системы

Table 1

Weight of 1 long meter of the articulated jib system elements				
Тип крана	$Q, t$	Вес 1 п.м. элементов ШСС		
		Стрела	Хобот	Оттяжка
Альбатрос	20	388	287	130
		404	291	117
Марк-25	25	689	505	163
Сокол	32	479	393	147
Азовец		713	725	160
Марк-36	36	689	515	168
Кондор	40	834	618	183
Марк-40		789	710	198
Марк-45		735	740	191

Определение усредненного веса 1 погонного метра стрелы, хобота и оттяжки возможно при использовании построенных графиков (рис. 4), что позволяет рассчитать прогнозируемый вес каждого звена шарнирно-сочлененной стреловой системы, кг:

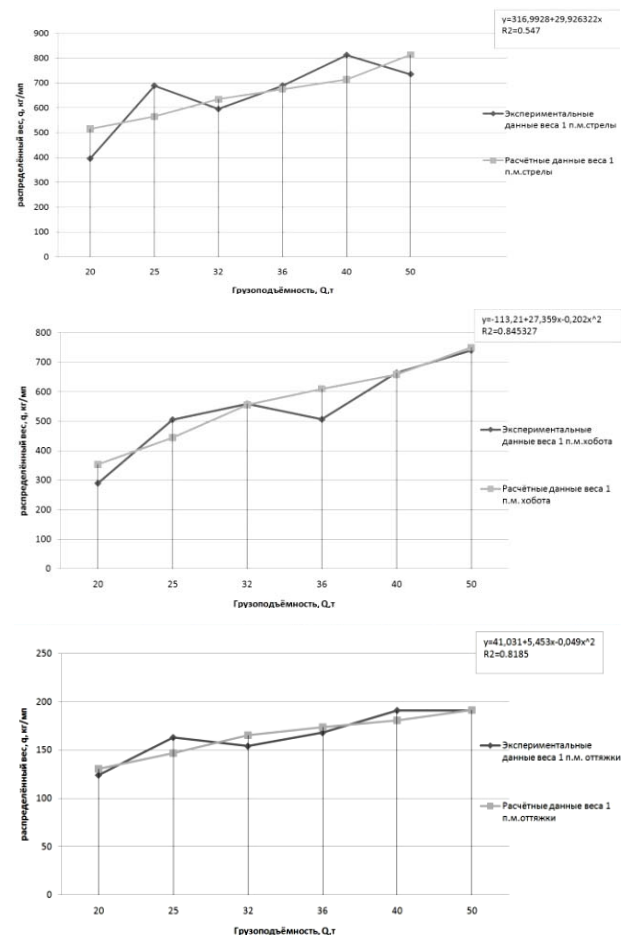
$$m_c = \mu \cdot S \cdot L \cdot q,$$

где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий отклонение от теоретической оптимальной формы;  $S$  – коэффициент, учитывающий прочность материала;  $L$  – длина звена стреловой системы;  $q$  – вес 1 погонного метра звена стреловой системы.

В реальной конструкции крана возможности варьирования параметрами очень ограничены. Изменение некоторых параметров вообще невозможно, так как это вызовет значительные конструктивные изменения крана.

В качестве варьируемых параметров приняты длины звеньев, значения которых существенно влияют на общую компоновку и материалоемкость шарнирно-сочлененной стреловой системы (рис. 5).

В результате определен массив варьируемых параметров (табл. 2) и исследовано влияние координаты  $k$  и координаты  $l$  на общепринятые критерии оценки качества шарнирно-сочлененной стреловой системы: неуравновешенность системы, вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов.

Рис. 4. Графики зависимости  $q=f(Q)$  для стрелы, хобота и оттяжкиFig. 4. Dependency graphs of  $q=f(Q)$  for jib, arm and jib tie

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

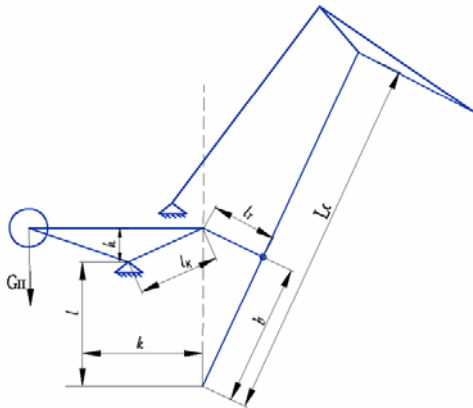


Рис. 5. Схема шарнирно-сочлененной стреловой системы с указанием варьируемых параметров:  $b$  – расстояние от оси качания стрелы до места крепления тяги противовеса;  $l_k$  – длина переднего плеча коромысла;

$l_T$  – длина тяги противовеса;  $k$  – расстояние по горизонтали от оси качания стрелы до оси качания коромысла;  $l$  – расстояние по вертикали от оси качания стрелы до оси качания коромысла;  $h$  – высота коромысла

Fig. 5. Diagram of the articulated jib system with indication of variable parameters:

$b$  – distance from jib trunnion to counter-jib tie mounting place;  $l_k$  – length of front rocker arm;  $l_T$  – length of counter-jib tie;  $k$  – horizontal distance from jib trunnion to rocker trunnion;  $l$  – vertical distance from jib trunnion to rocker trunnion;  $h$  – rocker height

Таблица 2

## Массив варьируемых параметров

Table 2

## Array of variable parameters

Параметр	Значение	
	Минимум	Максимум
$l_k$ , м	3,1	3,6
$l_T$ , м	8,1	9,0
$h$ , м	0,5	0,8
$k$ , м	4,54	5,53
$l$ , м	11,854	12,84
$G_{\Pi}$ , кг	21 500	27 000

Данные исследования показали:

1. Оптимальные значения названных критериев качества достигаются при  $k = 4,63$  м,  $l = 11,94$  м.

2. Уменьшать значения параметров возможно относительно оптимальных значений  $k$  и  $l$  не более, чем на 0,1 м. Дальнейшее уменьшение недопустимо по ограничениям угла захода противовеса и обеспечения собираемости и подвижности звеньев стреловой системы и системы уравнивания.

3. Изменение параметра  $l$  в наибольшей степени влияет на качество уравнивания системы (неуравновешенность системы, вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов).

4. Характер изменения неуравновешенного момента в оптимизированном варианте ( $k = 4,63$  м,  $l = 11,94$  м) полностью отвечает всем требованиям к системе уравнивания.

5. При уменьшении параметров  $k$  и  $l$  неуравновешенный момент по знаку (направлению) соответствует нормативным значениям, но процент неуравновешенности увеличивается. При увеличении параметров  $k$  и  $l$  неуравновешенный момент в зоне минимального вылета принимает нежелательную направленность, вызывающую опасность запрокидывания стрелы, а неуравновешенность достигает 23 %.

4. Экспериментальное исследование адекватности предложенной методики на компьютерных моделях порталных кранов. Выполнена апробация предложенного метода формирования массива геометрических параметров шарнирно-сочлененной стреловой системы применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев стреловой системы и уравнивающего устройства (табл. 3).

Метод формирования значений весовых параметров для программы синтеза шарнирно-сочлененной стреловой системы проверен путем сравнительного анализа с весовыми параметрами кранов, характеризующихся относительно небольшой материалоемкостью (табл. 4).

Сравнительный анализ подтверждает правильность принятого метода определения основных геометрических и весовых параметров для синтеза шарнирно-сочлененной стреловой системы и показывает, что вес звеньев изученных кранов завышен.

Таблица 3

**Анализ геометрических параметров  
шарнирно-сочлененной  
стреловой системы**

Table 3

**Analysis of geometrical parameters  
of the articulated jib system**

Тип крана	Показатели
Марк-25	$L_c = 27,44$ м $L_x = 16,3$ м $L_{кх} = 5,7$ м $L_o = 21,8$ м
Азовец	$L_c = 27,35$ м $L_x = 15$ м $L_{кх} = 4,8$ м $L_o = 21,3$ м
Марк-40	$L_c = 26,04$ м $L_x = 11,93$ м $L_{кх} = 4,32$ м $L_o = 20,6$ м

Примечание: результаты расчета:  
 $L_c = 23...27,2$  м,  $L_x = 11.5...16$  м,  $L_{кх} = 3.2...5,6$  м,  
 $L_o = 18.4...21,6$  м; отклонения от расчета: 0,88 %, 1,87 %, 1,78 %, 0,92 %.

Таблица 4

**Анализ весовых параметров  
шарнирно-сочлененной стреловой системы**

Table 4

**Analysis of weight parameters  
of the articulated jib system**

Результаты расчета	Модели порталных кранов	Отклоне- ние от рас- чета, %
	Альбатрос	
$G_c = 21\,415$ кг	$G_c = 20\,000$ кг	7 %
$G_x = 11\,557$ кг	$G_x = 14\,425$ кг	20 %
$G_o = 4\,303$ кг	$G_o = 4\,340$ кг	1 %

Окончание табл. 4

End of Table 4

Результаты расчета	Модели порталных кранов	Отклоне- ние от рас- чета, %
	Марк-25	
$G_c = 21\,415$ кг	$G_c = 26\,985$ кг	7 %
$G_x = 11\,557$ кг	$G_x = 19\,190$ кг	20 %
$G_o = 4\,303$ кг	$G_o = 5\,910$ кг	1 %

### Результаты

С помощью компьютерного моделирования научно обоснована эффективность методики определения рациональных конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем. Разработанный пакет геометрических, весовых и варьируемых параметров позволяет упростить процесс подготовки исходных данных перед автоматизированным синтезом и, в конечном счете, оптимизировать конструкцию шарнирно-сочлененной стреловой системы порталных кранов.

### Научная новизна и практическая значимость

Впервые предложена методика расчета параметрических данных, которая дает возможность определять рациональные конструктивные параметры шарнирно-сочлененных стреловых систем порталных кранов. Разработаны локальные программы для комплексного оптимизационного синтеза, позволяющие выполнить отбор наилучшего варианта конструкции одновременно по нескольким критериям качества и функциональным ограничениям.

Предложенная методика определения рациональных конструктивных параметров может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих шарнирно-сочлененных стреловых систем, что, в свою очередь, будет способствовать снижению материалоемкости и энергопотребления порталных кранов.

### Выводы

В работе представлен упрощенный метод определения исходных данных для автоматизированного расчета, синтеза и оптимизации



## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

шарнирно-сочлененной стреловой системы. Метод не требует специального программного обеспечения, так как разработки выполнены на базе простых, распространенных программ MS Excel та MathCAD.

Авторами выполнен анализ влияния варьируемых параметров на общепринятые критерии оценки качества шарнирно-сочлененной стреловой системы: неуравновешенность системы,

вес противовеса, показатели грузового и стрелового неуравновешенных моментов.

С помощью компьютерного моделирования выполнена апробация предложенной методики расчета конструктивных параметров шарнирно-сочлененных стреловых систем применительно к кранам, компоновка которых обеспечивает собираемость и подвижность звеньев всех систем.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрианов, Е. Н. Актуальные вопросы конструирования и расчета механизма изменения вылета стрелы порталных кранов / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Журн. ун-та водных коммуникаций. – 2010. – Вып. 2. – С. 81–92.
2. Гильдеев, Д. Южмонтаж смонтировал порталный кран в Измаильском порту / Д. Гильдеев // Подъемные сооружения. Специальная техника. – 2010. – № 8. – С. 11–12.
3. Горский, Б. Е. Шарнирно-сочлененные укосины порталных кранов / Б. Е. Горский. – Москва : Машгиз, 1965. – 185 с.
4. Душанін, Я. С. Оптимізація сталого руху зміни вильоту врівноваженої шарнірно-зчленованої стрілової системи крана : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Душанін Ян Станіславович ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2001. – 20 с.
5. Ловейкін, В. С. Метод мінімізації коливань вантажу в шарнірно-зчленованій стріловій системі крана під час зміни вильоту / В. С. Ловейкін, Д. А. Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2010. – № 76. – С. 35–40.
6. Ловейкін, В. С. Теорія технічних систем : навч. посіб. / В. С. Ловейкін, І. І. Назаренко, О. Г. Онищенко. – Київ ; Полтава : ІЗМН : ПДТУ, 1998. – 176 с.
7. Мисюра, В. П. Исследование и оптимальное проектирование уравнивающих устройств стреловых систем порталных кранов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Мисюра Василий Петрович ; Укр. заоч. политех. ин-т. – Харьков, 1980. – 24 с.
8. Михеев, В. А. Автоматизированное проектирование уравнивающих устройств стреловых систем порталных кранов / В. А. Михеев, В. П. Мисюра // Підйомно-транспортна техніка : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2005. – Вип. 3 (15). – С. 15–28.
9. Моделирование динамического нагружения датчика ограничителя грузового момента в шарнирно-сочлененных стреловых системах порталных кранов с прямолинейным хоботом / И. В. Бурданов, Д. В. Попов, А. Н. Кривонос, В. П. Самусько // Соврем. пути развития науки и образования : материалы науч.-практ. конф., г. Смоленск (31 июля 2015 г.) / ООО «Новаленсо». – Смоленск, 2015. – С. 126–129.
10. Паламарчук, Д. А. Оптимізація режимів руху шарнірно-зчленованої стрілової системи крана з горизонтальним переміщенням вантажу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Паламарчук Дмитро Анатолійович ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ, 2013. – 25 с.
11. Суглобов, В. В. Методика определения входных геометрических данных для совместного автоматизированного расчета, синтеза и оптимизации стреловой системы и системы уравнивания порталного крана / В. В. Суглобов, В. А. Михеев, Е. В. Ткачук // Підйомно-транспортна техніка. – 2013. – № 1 (37). – С. 86–96.
12. Суглобов, В. В. Методика определения исходных весовых данных для проектирования стреловой системы порталного крана / В. В. Суглобов, В. А. Михеев, Е. В. Ткачук // Вестн. Харьк. нац. автомоб.-дорож. ун-та : сб. науч. тр. – Харьков, 2014. – Вып. № 65-66. – С. 198–204.
13. Суглобов, В. В. Метод расчета определения входных данных для автоматизированного проектирования шарнирно-сочлененной стреловой системы порталного крана / В. В. Суглобов, В. А. Михеев, Е. В. Ткачук // Вестн. Харьк. нац. автомоб.-дорож. ун-та : сб. науч. тр. – Харьков, 2012. – Вып. № 57. – С. 264–269.
14. Keqin, L. Inverse Design of a New Double-link Luffing Mechanism and Realization on MATLAB / L. Keqin, J. Cuxiang // Proc. of the 3<sup>rd</sup> ICMEM Intern. Conf. on Mechanical Engineering and Mechanics (21.10–23.10.2009). – Beijing, China. – P. 301–304.



## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

15. Kolonic, F. Tensor Product Model Transformation-based Controller Design for Gantry Crane Control System – An Application Approach / F. Kolonic, A. Poljugan, I. Petrovic // Acta Polytechnica Hungarica. – 2006. – Vol. 3, No. 4. – P. 95–112.
16. Mauri, K. Intelligent container positioning helps [Електронний ресурс] / K. Mauri. – Konecranes Magazine. – 2012. – № 1. – P. 22–27. – Режим доступа: <http://www.konecranes.com/sites/default/files/download/sagt.pdf>. – Загл. с экрана. – Проверено : 25.01.2017.
17. Palis, S. Anti-Sway System for Slewing Cranes / S. Palis, F. Palis, M. Lehnert // 22<sup>nd</sup> Intern. Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC. – Ferrara, 2005. – P. 9–18.
18. Salleh, S. B. Modeling and Control of a Boom Crane [Електронний ресурс] / S. B. Salleh / Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia. – 2010. – 60 p. – Режим доступа: [http://portal.fke.utm.my/libraryfke/files/541\\_SAZILAHBINTISALLEH2010.pdf](http://portal.fke.utm.my/libraryfke/files/541_SAZILAHBINTISALLEH2010.pdf). – Загл. с экрана. – Проверено : 25.01.2017.

В. В. СУГЛОБОВ<sup>1\*</sup>, К. В. ТКАЧУК<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, ел. пошта [suglobov\\_v\\_v@ukr.net](mailto:suglobov_v_v@ukr.net), ORCID 0000-0003-1743-0894

<sup>2</sup>Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (066) 149 23 49, ел. пошта [t-katya@inbox.ru](mailto:t-katya@inbox.ru), ORCID 0000-0002-0309-1644

## ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНИХ СТІЛОВИХ СИСТЕМ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ

**Мета.** У дослідженні необхідно: 1) сформулювати масив геометричних, вагових та варійованих даних для автоматизованого синтезу шарнірно-зчленованих стрілових систем; 2) розробити методику розрахунку й визначення раціональних конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем в залежності від основних технічних параметрів порталного крана (максимальний і мінімальний робочі вильоти стріли, висота підйому вантажу, значення заднього габариту, вантажопідйомність крана); 3) провести вивчення адекватності методики на комп'ютерних моделях порталних кранів. **Методика.** Для визначення кінематичних характеристик кожної ланки шарнірно-зчленованої стрілової системи (стріли, хобота, відтягнення, противаги, вантажу) розроблені динамічна та математична моделі, які дозволяють описати рух шарнірно-зчленованої стрілової системи при зміні вильоту стріли. Вперше запропоновано методику розрахунку і визначення раціональних конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем в залежності від технічних параметрів порталного крана. **Результати.** За допомогою математичного моделювання науково обґрунтовано доцільність використання запропонованої методики визначення конструктивних параметрів шарнірно-зчленованих стрілових систем. Розроблений пакет геометричних, вагових і варійованих даних дозволяє спростити процес підготовчих розрахунків перед автоматизованим синтезом та оптимізувати конструкцію шарнірно-зчленованої стрілової системи порталних кранів. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано методику розрахунку параметричних даних, які дозволяють визначити раціональні конструктивні параметри шарнірно-зчленованої стрілової системи. Розроблено локальні програми для комплексного оптимізаційного синтезу, які дозволяють виконати відбір найкращого варіанту конструкції одночасно за кількома критеріями якості та функціональними обмеженнями. **Практична значимість.** Запропонована методика розрахунку конструктивних параметрів може бути використана при проектуванні нових та модернізації існуючих порталних кранів із шарнірно-зчленованими стріловими системами, що, в свою чергу, знизить матеріалоємність та енергоспоживання кранів.

**Ключові слова:** порталний кран; шарнірно-зчленована стрілова система; синтез; метод розрахунку; конструктивні параметри; динамічна модель; математична модель

V. V. SUGLOBOV<sup>1\*</sup>, K. V. TKACHUK<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Lifting-Transport Machines and Details of Machines», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 623 12 69, e-mail suglobov\_v\_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

<sup>2</sup>Dep. «Lifting-Transport Machines and Details of Machines», Pryazovskyi State Technical University, Universytetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (066) 149 23 49, e-mail t-katya@inbox.ru, ORCID 0000-0002-0309-1644

## DETERMINATION OF DESIGN PARAMETERS OF ARTICULATED JIB SYSTEMS OF PORTAL CRANE

**Purpose.** The study involves: 1) formation of an array of geometry, weight and variable data for the automated synthesis of articulated jib systems; 2) development of methodology of calculation and determination of rational design parameters of the articulated jib systems, depending on the main technical parameters of the portal crane (maximum and minimum working radius, cargo lift height, tail radius value, carrying capacity of crane); 3) conducting of the study of the methodology adequacy on computer portal crane models. **Methodology.** To determine the kinematic characteristics of each link of the articulated jib system (boom, arm, jib tie, counterweight, load) we developed a dynamic and mathematical models that allow us to describe the movement of the articulated jib system when luffing. For the first time the technique of calculation and determination of rational design parameters of the articulated jib systems depending on the technical parameters of the portal crane. **Findings.** The conducted mathematical modeling allowed scientifically proving the usefulness of the proposed methodology for determining the design parameters of the articulated jib systems. The designed package of geometry, weight and variable data helps to simplify the process of preparatory calculations before the automated synthesis and to optimize the design of the articulated jib systems of portal cranes. **Originality.** For the first time the work proposes the technique for calculation of the parametric data that allow us to determine the rational design parameters of the articulated jib system. There are developed local programs for the integrated optimization synthesis that make it possible to select the best design option simultaneously by several quality criteria and functional constraints. **Practical value.** The proposed method of calculating the design parameters can be used in the design of new and modernization of existing portal cranes with the articulated jib systems, which, in turn, will reduce the material and energy consumption of the cranes.

**Keywords:** portal crane; articulated jib system; synthesis; calculation method; design parameters; dynamic model; mathematical model

### REFERENCES

1. Andrianov, E. N., & Ivanov, A. N. (2012). Topical problems of construction and design of the gantry crane boom outreach control mechanisms. *Zhurnal univversityeta vodnykh komunikatsiy*, 2(14), 81-92.
2. Gildeev, D. (2010). Yuzhmormontazh smontiroval portalnyy kran v Izmailskom portu. *Podemnyye sooruzheniya. Spetsialnaya tekhnika*, 8, 11-12.
3. Gorskiy, B. Y. (1965). *Sharnirno-sochlenennyye ukosiny portalnykh kranov*. Moscow: Mashgiz.
4. Dushanin, Y. S. (2001). *Optimisation of the established mode of change in radius counterbalanced articulated boom system of the crane*. (Author's PhD thesis). Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv.
5. Loveikin, V. S., & Palamarchuk, D. A. (2010). Metod minimizatsii kolyvan vantazhu v sharnirno-zchlenovanii strilovii systemi krana pid chas zminy vyhotu. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, 76, 35-40.
6. Loveikin, V. S., Nazarenko, I. I., & Onishenko, O. G. (1998). *Teoriia tekhnichnykh system*. Kyiv, Poltava: Poltava State Technical University.
7. Misyra, V. P. (1980). *Issledovaniye i optimalnoye proektirovaniye uravnoveshivayushchikh ustroystv strelovykh sistem portalnykh kranov*. (Author's PhD thesis). Ukrainskiy zaochnyy politekhnicheskyy institute, Kharkov.
8. Mikheev, V. A., & Misyra, V. P. (2005). Avtomatizirovannoye proyektirovaniye uravnoveshivayushchikh ustroystv strelovykh sistem portalnykh kranov. *Pidiomno-transportna tekhnika*, 3(15), 15-28.

## НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

9. Byrdanov, I. V., Popov, D. V., Krivonos, A. N., & Samusko, V. P. (2015). Modelirovaniye dinamicheskogo nagruzheniya datchika ogranichatelya gruzovogo momenta v sharnirno-sochlenennykh strelovyykh sistemakh portalnykh kranov s pryamolineynym khobotom. *Proceedings of the Modern Ways of Development of Science and Education*. July 31, 2015, Smolensk, 126-129.
10. Palamarchuk, D. A. (2013). *Optimizatsiia rezhymiv rukhu sharnirno-zchlenovanoi strilovoi systemy krana z horyzontalnym peremishchenniam vantazhu*. (Author's PhD thesis). Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv.
11. Suglovov, V. V., Mikheev, V. A., & Tkachuk, K. V. (2013). Metodika opredeleniya vkhodnykh geometricheskikh dannykh dlya sovmestnogo avtomatizirovannogo rascheta, sinteza i optimizatsii strelovoy systemy i systemy uravnoveshivaniya portalnogo krana. *Pidiomno-transportna tekhnika*, 1(37), 86-96.
12. Suglovov, V. V., Tkachuk, K. V., & Mikheev, V. A. (2014). A calculating technique for determining weight input data to design boom systems of overhead gantry cranes. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 65-66, 198-204.
13. Suglovov, V. V., Mikheev, V. A., & Tkachuk, K. V. (2012). A method of input data calculation for automated design of gantry crane articulated systems. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 57, 264-269.
14. Keqin, L., & Cuxiang, J. (2009). Inverse Design of a New Double-link Luffing Mechanism and Realization on MATLAB. *Proceedings of the 3rd ICMEM International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics, October 21-23, 2009, Beijing, P. R. China*, 301-304.
15. Kolonic, F., Poljugan, A., & Petrovic, I. (2006). Tensor Product Model Transformation-based Controller Design for Gantry Crane Control System – An Application Approach. *Acta Polytechnica Hungarica*, 3(4), 95-112.
16. Kaarre, M. (2012). Intelligent Container Positioning Helps. *Way Up*, 1, 22-27. Retrieved from <http://wayup.konecranes.com/sites/wayup/files/wu0112-www-hq.pdf>
17. Palis, S., Palis, F., & Lehnert, M. (2005). Anti-Sway System for Slewing Cranes. *Proceedings of the 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005, September, 11-14, 2005, Ferrara, Italy*, 9-18.
18. Salleh, S. B. (2010). Modeling and Control of a Boom Crane. *Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia*. Retrieved from [http://portal.fke.utm.my/libraryfke/files/541\\_SAZILAHBINTISALLEH2010.pdf](http://portal.fke.utm.my/libraryfke/files/541_SAZILAHBINTISALLEH2010.pdf).

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. С. Самотугиным (Украина); д.т.н., проф. А. А. Андилахаем (Украина); д.т.н., проф. А. А. Ищенко (Украина)

Поступила в редколлегию: 19.10.2016

Принята к печати: 12.01.2017

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК [629.463.62:656.073.235]-047.58

А. О. ЛОВСЬКА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагони», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків,  
Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

### УДОСКОНАЛЕННЯ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

**Мета.** Дане дослідження спрямоване на удосконалення несучої конструкції вагона-платформи для підвищення ефективності контейнерних перевезень. **Методика.** Для досягнення зазначеної мети проведені дослідження міцності універсального вагону-платформи моделі 13-401, визначені резерви міцності несучих елементів його конструкції та запропоновані більш оптимальні, з точки зору мінімальної матеріалоемності, профілі виконання основних поздовжніх балок рами. Правильність прийнятих рішень підтверджено розрахунками несучої конструкції вагона-платформи на міцність (при основних експлуатаційних режимах навантаження) та втому – з урахуванням бази випробувань  $10^7$  циклів. Для можливості закріплення контейнерів на рамі вагона-платформи пропонується оснащення його відкидними фітинговими упорами, що дозволить здійснювати перевезення 20-ти та 40-футових контейнерів. З метою підвищення ефективності контейнерних перевезень у напрямку міжнародних транспортних коридорів, які проходять через територію України, на базі удосконаленої конструкції вагона-платформи розроблено вагон-платформу зчленованого типу. Проведене математичне моделювання динамічної навантаженості вагона-платформи з контейнерами, розміщеними на ньому (два контейнери типорозміру 1СС) при експлуатаційних режимах навантаження. Визначено максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію, та враховано їх чисельні значення при комп'ютерному моделюванні міцності вагона-платформи зчленованого типу. **Результати.** Розроблено несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу на базі універсального вагона-платформи. Отримано уточнені величини динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами, розміщеними на ньому при експлуатаційних режимах навантаження, та визначено максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції вагона-платформи. **Наукова новизна.** Запропоновано математичну модель переміщень вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами, розміщеними на ньому при експлуатаційних режимах навантаження. Розроблено модель міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу, створеного на базі універсального вагона-платформи. **Практична значимість.** Результати проведених досліджень можуть використовуватися при проектуванні вагонів-платформ зчленованого типу для забезпечення їх міцності при комбінованих перевезеннях.

**Ключові слова:** вагон-платформа зчленованого типу; несуча конструкція; оптимізація; динаміка; міцність; моделювання; навантаженість конструкції; комбіновані перевезення

#### Вступ

Прискорені темпи інтеграції України в систему міжнародних транспортних коридорів викликають необхідність створення та введення в експлуатацію комбінованих транспортних систем.

Одними з найбільш перспективних на сьогодні є контейнерні перевезення, що зумовлено мобільністю контейнера, як транспортного засобу. Перевезення контейнерів залізницею здійснюється здебільшого на вагонах-платформах.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Для забезпечення ефективності перевізного процесу необхідними є розробка та впровадження у експлуатацію вагонів-платформ нового покоління з покращеними техніко-економічними показниками. Це зумовило створення та введення в експлуатацію вагонів-платформ зчленованого типу, які вже не перший рік успішно експлуатуються на залізницях України.

Відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 1390-2009-п від 16.12.2009 «Про затвердження Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки», метою якої є розвиток конкурентного середовища на ринку залізничних послуг, підвищення ефективності його функціонування, а також задоволення потреб національної економіки та населення в перевезеннях, необхідним є створення рухомого складу нового покоління з підвищеними техніко-економічними показниками, а також комбінованих систем транспорту, що забезпечить підвищення об'ємів перевезень вантажів через міжнародні транспортні коридори.

Недостатній рівень поповнення вагонного парку Укрзалізниці за останні роки зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію нових технічних рішень щодо удосконалення несучих конструкцій кузовів вагонів для здійснення потреб у перевезеннях завданої номенклатури вантажів.

Питання проектування рухомого складу для перевезення великовагових вантажів розглянуті у [23]. Дослідження динаміки та міцності здійснено за допомогою сучасних засобів програмного забезпечення ProMechanica та CosmosWorks. При проектуванні несучої конструкції транспортеру виконано дослідження щодо можливості його виконання з різнотипних матеріалів.

Конструкційні особливості вагона для інтермодальних перевезень розглянуті у [24]. Вагон має понижену середню частину, а наявність обортної частини дає можливість здійснювати завантаження/вивантаження автотехніки на/з нього самокатом.

Питання удосконалення комбінованих перевезень, зокрема контейнерних, розглянуті у [16], де виконано аналіз особливостей кріплення контейнерів на вагонах-платформах. З метою підвищення техніко-економічних показників вагонів при перевезенні контейнерів різно-

го типорозміру обґрунтовано удосконалення конструкцій довгобазних вагонів-платформ та вагонів-платформ зчленованого типу для цих перевезень.

Порівняльний аналіз витрат на повний життєвий цикл 80-футового вагона-платформи та вагона-платформи зчленованого типу наведений у [5]. Виконані дослідження дозволили обґрунтувати доцільність використання вагонів-платформ зчленованого типу в експлуатації.

Дослідження навантаженості та довговічності залізничних екіпажів методами динаміки систем тіл виконується у [25]. Розглянута методика використана при дослідженні динамічної навантаженості та втомної довговічності рами довгобазного вагона-платформи для перевезення контейнерів.

Аналіз конструкції вагона-платформи нового покоління наведений у [30]. Особливістю вагона-платформи є можливість регулювання корисної довжини залежно від габаритів вантажу, який перевозять.

Важливо зазначити, що у розглянутих працях не приділяється уваги дослідженню динамічної навантаженості вагонів при експлуатаційних режимах.

Дослідження міцності вагона-платформи при статичній та динамічній навантаженості його конструкції наведені у [29], при цьому використані експериментальні методи, зокрема – електричного тензометрування.

Дослідження динаміки вагона-платформи з використанням методів мультитіла наведені у [27]. Розрахунок виконаний стосовно вагона-платформи з обертовою середньою частиною в середовищі програмного забезпечення MSC Adams. Рівняння руху вагона-платформи сформульовані в абсолютних координатах з використанням методу Лагранжа I роду.

Дослідження динаміки залізничного вагона з відкритою завантажувальною платформою наведені в [28]. Розрахунок виконаний у середовищі програмного забезпечення MSC Adams. При цьому дослідження стійкості проти перекидання вагона здійснювалося при його вписуванні у криву радіусом 250 м з урахуванням різної швидкості руху.

Питання моделювання міцності несучої конструкції вагона-платформи в зазначених роботах не розглянуті.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Особливості дослідження динамічних якостей зчленованого вагона-платформи на математичних моделях розглядаються у [21]. В статті наведені оцінка власних форм коливань та стійкості незбуреного руху, дослідження динамічних якостей на нелінійній моделі зчленованого вагона-платформи. При цьому дослідженню динамічних особливостей вагона-платформи при I розрахунковому режимі, як випадку найбільшої навантаженості конструкції в експлуатації, уваги не приділяється.

Поліпшення технічних характеристик секційного вагона-платформи шляхом удосконалення його конструкції наведені у [7]. В роботі наводяться математичні моделі, які дозволяють визначити динамічні і міцнісні характеристики вагона-платформи зчленованого типу. Отримані теоретичні розрахунки підтверджені шляхом експериментальних досліджень міцності вагона-платформи.

При цьому в роботі не виконується дослідження прискорень, як складової динамічного навантаження вагона-платформи при дії повздовжніх сил на його несучу конструкцію в умовах експлуатаційних навантажень.

Дослідження просторових коливань вагона-платформи з довгомірним вантажем при русі по залізничній колії зі стиковими та гармонійними нерівностями у горизонтальній та вертикальній площинах наведені у [2]. Опис коливань механічної системи здійснений шляхом складання системи з двадцяти диференціальних рівнянь.

Особливості динаміки вагона-платформи з несиметрично-розміщеним вантажем відносно рами розглянуті у [8]. Механічна система, що здійснює коливальний процес, включає 12 твердих тіл. Розв'язання системи диференціальних рівнянь здійснено за допомогою методу Адамса–Башфорта.

У розглянутих роботах не приділяється увага дослідженню динаміки вагона-платформи, завантаженої контейнерами.

Дослідження просторових коливань вагона-платформи наводяться у [12]. Вагон-платформа разом з контейнерами розглядався як пружна балка з дискретно розміщеними зосередженими масами, що опирається на візки. При цьому виконувалася оцінка впливу на ходові якості екіпажа ваги контейнерів, що розміщені на вагоні-платформі.

Важливо зазначити, що питання удосконалення несучої конструкції вагона-платформи з метою підвищення ефективності контейнерних перевезень у статті не розглядаються.

Визначення динамічних характеристик комбінованих поїздів виконується у [9]. При цьому увагу зосереджено на дослідженні коливань вагонів-цистерн, що експлуатуються в напрямку «Схід-Захід». В роботі виконується математичне моделювання руху неоднорідного поїзда при різних експлуатаційних режимах.

Дослідженню динаміки вагонів-платформ, як одного з найбільш поширених типів вагонів при комбінованих перевезеннях, в роботі уваги не приділяється.

Дослідження щодо доцільності застосування круглих труб як елементів несучих систем залізничних вагонів-платформ наведені у [22]. На підставі виконаних теоретичних досліджень напружено-деформованого стану несучої конструкції вагона-платформи моделі 13-401 визначені резерви міцності його складових та запропоновано використання як несучих елементів рами труб круглого перерізу [19]. Дослідження динаміки удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи в роботі не виконується.

Дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи при маневровому співударянні наведені у [15]. Отримано величини прискорень, які діють на вагон-платформу та контейнери при відсутності переміщень фітингів відносно фітингових упорів, а також при їх можливих переміщеннях.

Обґрунтування доцільності експлуатації вагонів-платформ для перевезення контейнерів, у тому числі контейнерів-цистерн, побудови заводу «Трансмаш» (Росія) зазначене у [26]. Конструкція вагона-платформи має вантажопідйомність 73 тонни та може здійснювати перевезення контейнерів типорозміру 1СС, 1С, а також 1СХ.

Дослідження міцності несучої конструкції вагона-платформи в зазначених роботах не виконується.

Питання щодо удосконалення несучої конструкції вагона-платформи з метою забезпечення надійності закріплення відносно палуби залізничного порому розглядаються у [6]. Конструкційні особливості несучої конструкції вагона-платформи дозволяють забезпечити стійкість ко-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

нтейнерів при перевезенні на залізничних поромках з урахуванням великих кутів крену.

Особливості розробки швидкісного зчленованого вагона-платформи для перевезення контейнерів наведені у [14]. Прийняті технічні рішення при проектуванні вагона-платформи дозволяють здійснювати одночасне перевезення на ньому двох 40- або 45-футових контейнерів чи чотирьох 20-футових.

Моделювання міцності рами вагона-платформи з урахуванням розміщення на ній автомобільного напівпричепу виконується у [3]. У роботі запропоновано розрахункову схему, яка дозволяє отримати уточнені значення напружень у несучій конструкції вагона-платформи.

В розглянутих роботах не приділяється уваги дослідженню динаміки вагона-платформи при експлуатації відносно рейкових колій.

### Мета

Метою досліджень, які наведені в статті, є удосконалення несучої конструкції вагона-платформи з метою підвищення ефективності контейнерних перевезень. Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання:

1. Виконати дослідження міцності вагона-платформи моделі 13-401 при експлуатаційних режимах навантаження та оптимізувати елементи його несучої конструкції з метою зменшення матеріалоємності.
2. Дослідити динамічні особливості вагона-платформи зчленованого типу при експлуатаційних режимах навантаження.
3. Виконати дослідження міцності удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу.

### Методика

Для підвищення ефективності контейнерних перевезень залізничним транспортом знайшли використання вагони-платформи зчленованого типу, які дозволяють збільшити корисне завантаження вагона контейнерами. В Україні відомий досвід розробки та успішної експлуатації таких вагонів, але їх виробництво вимагає значних капітальних вкладень. Тому пропонується створення конструкції зчленованого вагона-платформи на базі універсального.

З метою створення вагона-платформи зчленованого типу для перевезення контейнерів як прототип обраний вагон-платформа моделі 13-401, виробництва Дніпродзержинського вагонобудівного заводу (рис. 1).

Для визначення резервів міцності основних несучих елементів рами вагона-платформи виконаний розрахунок з використанням методу скінченних елементів в середовищі програмного забезпечення CosmosWorks [1, 20], побудова просторової моделі здійснена в SolidWorks (версія 2015). При цьому враховано, що вагон-платформа завантажений двома контейнерами типорозміру 1СС.

Результати розрахунків дозволили отримати величини максимальних еквівалентних напружень (табл. 1) та визначити оптимальний з точки зору мінімальної матеріалоємності профіль поперечної балки рами – двотавр № 27а. Несуча конструкція вагона-платформи моделі 13-401 з урахуванням заходів щодо удосконалення наведена на рис. 2. При цьому тара несучої конструкції вагона-платформи менша на 12 % порівняно з прототипом.

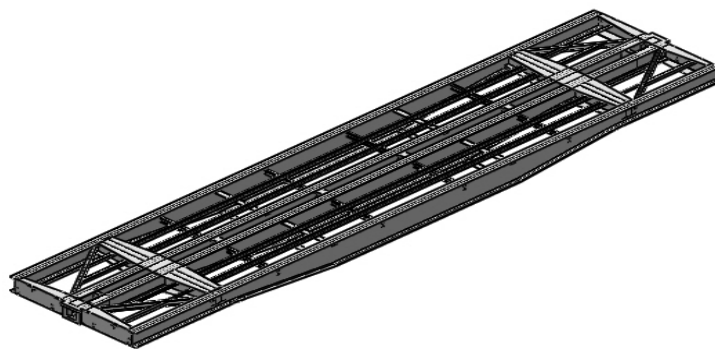


Рис. 1. Просторова модель несучої конструкції вагона-платформи моделі 13-401

Fig. 1. The spatial model of supporting structure of the platform car model 13-401

Таблиця 1

**Показники міцності несучої конструкції вагона-платформи моделі 13-401  
при експлуатаційних режимах навантаження**

Table 1

**Strength indicators of supporting structure of the platform car model 13-401  
under operating conditions of load**

Показник міцності	Режим навантаження				
	I р.р.			III р.р.	
	Удар	Стиснення	Ривок–розтягнення	Удар–стиснення	Ривок–розтягнення
Напруження, МПа	306	282,7	242,8	224,0	230,8
Переміщення в вузлах, мм	7,6	7,6	7,6	78,2	6,8
Деформації	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$5,67 \cdot 10^{-3}$

Для закріплення контейнерів на несучій конструкції вагона-платформи пропонується встановлення на нього відкидних фітінгових упорів.



Рис. 2. Несуча конструкція вагона-платформи моделі 13-401 з урахуванням заходів щодо удосконалення

Fig. 2. The supporting structure of the platform car model 13-401 considering improvement measures

Правильність прийнятих рішень підтверджено теоретичними розрахунками на міцність.

З метою забезпечення втомної міцності при базі випробувань  $10^7$  циклів здійснено підсилення профілю довгобазної балки накладками (рис. 3).

Для підвищення контейнеромісткості удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи пропонується створення на її базі вагона-платформи зчленованого типу (рис. 4).

Для дослідження динамічної навантаженості вагона-платформи зчленованого типу використано математичну модель, наведену у [17], де

виконується визначення прискорень контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі при дії на нього повздовжньої сили від вагона-бойка.

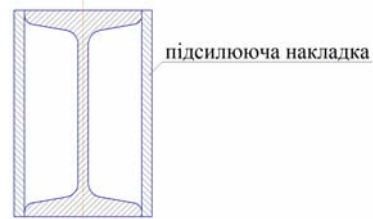


Рис. 3. Переріз основної повздовжньої балки рами вагона-платформи зчленованого типу

Fig. 3. Cut of the main longitudinal beam of the platform car frame of articulated type

При цьому для визначення прискорень несучої конструкції вагона-платформи, як складової її динамічного навантаження, ця модель доопрацьована шляхом урахування переміщень двох секцій вагона-платформи при експлуатаційних режимах навантаження. Також в ній скасовані пружні зв'язки між контейнерами та несучою конструкцією вагона-платформи, що зумовлено меншою довжиною секції, створеної на базі типового вагона-платформи моделі 13-401 порівняно з довгобазним вагоном-платформом, динаміка якого досліджувалася у [17].

Як досліджувана модель контейнера обраний універсальний контейнер типорозміру 1СС. Контейнер розглянутий як прикріплена маса



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

відносно рами вагона-платформи. Тобто, контейнер повністю повторює траєкторію переміщення вагона-платформи. Зв'язок між рамою вагона-платформи та фітингами контейнера імітувався як жорсткий.

Дослідження коливань вагона-платформи з контейнерами здійснювалося у повздовжньо-вертикальній площині. Вагон-платформа з контейнерами розглянутий у вигляді плоскої розрахункової схеми.

При складанні математичної моделі враховано, що кожна секція вагона-платформи має власний ступень вільності, оскільки конструкційні особливості пристрою зчленування дозволяють здійснювати їх переміщення у просторі [4, 11].

Схема дії повздовжньої сили на вагон-платформу зчленованого типу з контейнерами, розміщеними на ньому при відсутності можливих переміщень фітингів відносно фітингових упорів наведена на рис. 5.

$$M'_{\Pi L_1} (\ddot{x}_{\Pi L_1} - \ddot{x}_{\Pi L_2}) + M_{\Pi L_1} h \ddot{\varphi}_{\Pi L_1} = P_n, \quad (1)$$

де  $M'_{\Pi L_1}$  – маса-брутто  $i$ -ої секції вагона-платформи;  $M_{\Pi L_1}$  – маса несучої конструкції  $i$ -ої секції вагона-платформи;  $P_n$  – величина повздовжньої сили, що діє на автозчеп;

$$I_{\Pi L_1} \ddot{\varphi}_{\Pi L_1} + M_{\Pi L_1} h (\ddot{x}_{\Pi L_1} - \ddot{x}_{\Pi L_2}) - g \varphi_{\Pi L_1} M_{\Pi L_1} h = l F_{TP} (\text{sign } \dot{\Delta}_1^{\Pi L_1} - \text{sign } \dot{\Delta}_2^{\Pi L_1}) + l (k_1 \dot{\Delta}_1^{\Pi L_1} - k_2 \dot{\Delta}_2^{\Pi L_1}), \quad (2)$$

де

$$\Delta_1^i = z_{\Pi L_1} - l \cdot \varphi_{\Pi L_1}; \quad \Delta_2^i = z_{\Pi L_1} + l \cdot \varphi_{\Pi L_1},$$

$I_{\Pi L_1}$  – момент інерції  $i$ -ої секції вагона-платформи;  $l$  – половина бази секції вагона-платформи;  $F_{TP}$  – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті;  $k_1, k_2$  – жорсткість пружин ресорних комплектів візків вагона-платформи (візок моделі 18-100);

$$M_{\Pi L_1} \cdot \ddot{z}_{\Pi L_1} = k_1 \cdot \Delta_1^{\Pi L_1} + k_2 \cdot \Delta_2^{\Pi L_1} - F_{TP} (\text{sign } \dot{\Delta}_1^{\Pi L_1} - \text{sign } \dot{\Delta}_2^{\Pi L_1}), \quad (3)$$

$$m_i (\ddot{x}_{\Pi L_1} - \ddot{x}_{\Pi L_2}) + (m_i \cdot z_{ci}) \ddot{\varphi}_{\Pi L_1} = 0, \quad (4)$$

де  $m_i$  – маса контейнера;  $z_{ci}$  – висота центру ваги контейнера;

$$I_i \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi L_1} + (m_i \cdot z_{ci}) \times (\ddot{x}_{\Pi L_1} - \ddot{x}_{\Pi L_2}) - g (m_i \cdot z_{ci}) \varphi_{\Pi L_1} = 0, \quad (5)$$

де  $I_i$  – момент інерції  $i$ -го контейнера;  $x_i, \varphi_i, z_i$  – координати, що визначають переміщення секцій вагона-платформи відносно відповідних осей;

$$m_i \cdot \ddot{z}_{\Pi L_1} = 0 \quad (6)$$

$$M'_{\Pi L_2} (\ddot{x}_{\Pi L_1} - \ddot{x}_{\Pi L_2}) + M_{\Pi L_2} h \ddot{\varphi}_{\Pi L_2} = 0, \quad (7)$$

$$I_{\Pi L_2} \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi L_2} + M_{\Pi L_2} h (\ddot{x}_{\Pi L_1} - \ddot{x}_{\Pi L_2}) - g \varphi_{\Pi L_2} M_{\Pi L_2} h = l \cdot F_{TP} (\text{sign } \dot{\Delta}_1^{\Pi L_2} - \text{sign } \dot{\Delta}_2^{\Pi L_2}) + l (k_1 \cdot \dot{\Delta}_1^{\Pi L_2} - k_2 \cdot \dot{\Delta}_2^{\Pi L_2}), \quad (8)$$

$$M_{\Pi L_2} \cdot \ddot{z}_{\Pi L_2} = k_1 \cdot \Delta_1^{\Pi L_2} + k_2 \cdot \Delta_2^{\Pi L_2} - F_{TP} (\text{sign } \dot{\Delta}_1^{\Pi L_2} - \text{sign } \dot{\Delta}_2^{\Pi L_2}), \quad (9)$$

$$m_i (\ddot{x}_{\Pi L_1} - \ddot{x}_{\Pi L_2}) + (m_i \cdot z_{ci}) \ddot{\varphi}_{\Pi L_2} = 0, \quad (10)$$

$$I_i \cdot \ddot{\varphi}_{\Pi L_2} + (m_i \cdot z_{ci}) \times (\ddot{x}_{\Pi L_1} - \ddot{x}_{\Pi L_2}) - g (m_i \cdot z_{ci}) \varphi_{\Pi L_2} = 0, \quad (11)$$

$$m_i \cdot \ddot{z}_{\Pi L_2} = 0. \quad (12)$$

Величина повздовжньої сили, що діє на несучу конструкцію вагона-платформи, прийнята рівною 2,5 МН [18]. Розв'язання диференціальних рівнянь здійснено за допомогою методу Рунге-Кутта в середовищі програмного забезпечення MathCad [10, 13].

Результати досліджень дозволили зробити висновок, що прискорення, які приходяться на несучу конструкцію першої з боку дії сили секції вагона-платформи складають 36,4 м/с<sup>2</sup>, а другої – близько 37 м/с<sup>2</sup> (рис. 6).

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

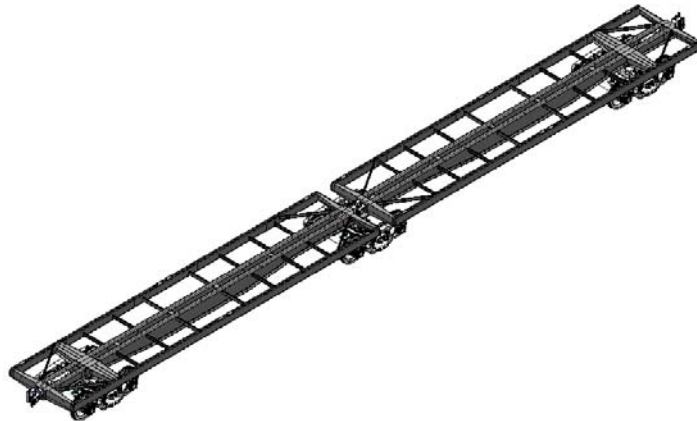


Рис. 4. Вагон-платформа зчленованого типу

Fig. 4. Platform car of articulated type

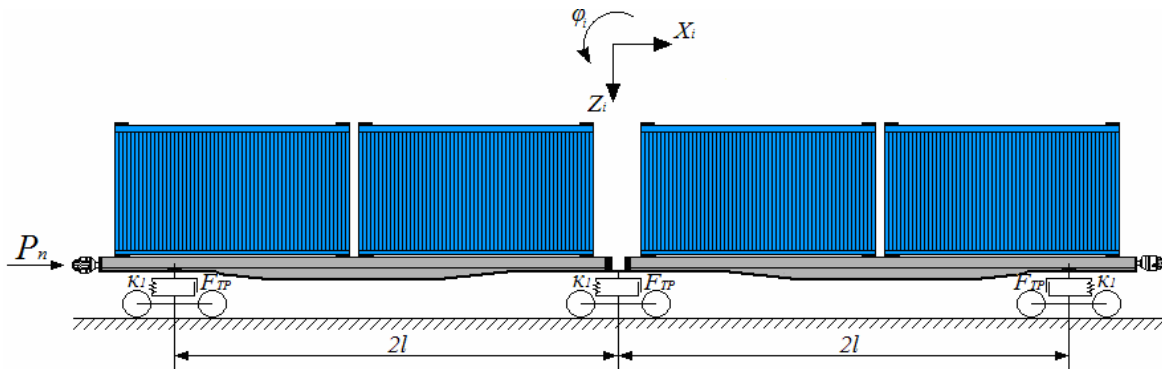


Рис. 5. Схема дії повздовжньої сили на вагон-платформу зчленованого типу з контейнерами, розміщеними на ньому

Fig. 5. Scheme of the longitudinal forces effect on the platform car of articulated type with containers placed on it

Числові значення прискорень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами, розміщеними на ньому при експлуатаційних режимах навантаження використані при дослідженні міцності несучої конструкції, як складові динамічного навантаження, що діють на неї.

Для дослідження міцності вагона-платформи зчленованого типу виконаний розрахунок за методом скінченних елементів. При складанні скінченно-елементної моделі використані просторові ізопараметричні тетраедри, оптимальна кількість яких визначена за допомогою графоаналітичного методу.

При цьому кількість вузлів сітки складала 140551, елементів – 421841. Максимальний розмір елементу дорівнює 203,45 мм, мінімальний

– 40,7 мм. Мінімальна кількість елементів в колі складала 9, співвідношення збільшення розмірів елементів у сітці – 1,7. Максимальне співвідношення боків –  $1,06 \cdot 10^5$ , відсоток елементів зі співвідношенням боків менше ніж 3 – 11,2, більше ніж 10 – 35,2.

Схему навантаження несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу при I розрахунковому режимі (ривок–розтягнення) наведено на рис. 7.

При складанні моделі міцності враховано, що на несучу конструкцію вагона-платформи, крім повздовжньої сили  $P_n$ , діють вертикальні зусилля у зонах обпирання контейнерів на фітингові упори  $P_k$ .

Модель не враховує можливі переміщення

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

фітінгів контейнерів відносно фітінгових упорів вагона-платформи, а також можливі кутові

переміщення секцій вагона-платформи при дії повздовжньої сили.

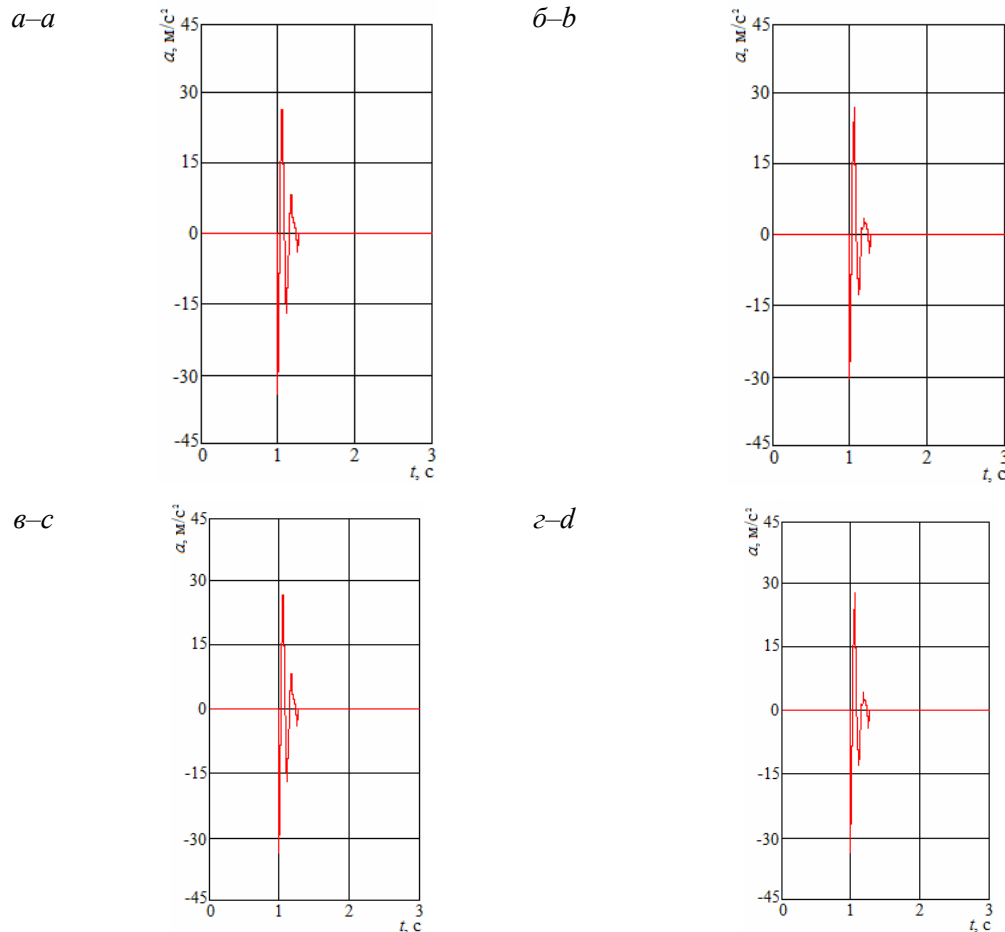


Рис. 6. Прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами, розміщеними на ньому при I розрахунковому режимі (розтягнення–ривок): а – перша з боку дії повздовжньої сили секція вагона-платформи; б – контейнер, розміщений на першій з боку дії повздовжньої сили секції вагона-платформи; в – друга з боку дії повздовжньої сили секція вагона-платформи; г – контейнер, розміщений на другій з боку дії повздовжньої сили секції вагона-платформи

Fig. 6. The acceleration acting on the platform car of articulated type with containers placed on it during design conditions (stretching–jerk):

a – the first platform car from the side of action of the longitudinal force; b) a container placed on the first platform car from the side of longitudinal force action; c) a second platform car from the side of action of the longitudinal force; g) a container placed on the second platform car from the side of longitudinal force action

Закріплення моделі здійснювалося у зонах обпирання рами на візки, а також за задній упор автозчепу (удар–стиснення) або передній (розтягнення–ривок) другого з боку дії повздовжньої сили секції вагона-платформи.

Як матеріал несучої конструкції вагона-платформи використано сталь марки 09Г2С зі

значенням межі міцності  $\sigma_B = 490$  МПа та межі плинності  $\sigma_T = 345$  МПа [18].

Результати розрахунків несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу при I розрахунковому режимі (ривок–розтягнення) наведені на рис. 8–10, а чисельні значення показ-

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ників міцності при основних режимах навантаження у табл. 2.

З табл. 2 видно, що найбільша величина напружень виникає при I розрахунковому режимі (ривок–розтягнення), зосереджена в зоні взаємодії шворневої балки з хребтовою та складає близько 330 МПа (рис. 5), але не перевищує

допустиме значення, максимальні переміщення в конструкції виникають у середній частині основних повздовжніх балок рами та складають 64,5 мм (рис. 6), деформації в конструкції становлять  $2,026 \cdot 10^{-2}$  (рис. 7).

Табл. 2.

**Показники міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу при експлуатаційних режимах навантаження**

Table 2

**Strength indicators of the supporting structure of the platform car of articulated type under operating conditions of load**

Показник міцності	Режим навантаження			
	Стиснення (I р.р.)	Ривок–розтягнення (I р.р.)	Удар–стиснення (III р.р.)	Ривок–розтягнення (III р.р.)
Напруження, МПа	310,5	329,8	302,5	312,8
Переміщення в вузлах, мм	66,1	64,5	64,2	64,5
Деформації	$2,015 \cdot 10^{-2}$	$2,026 \cdot 10^{-2}$	$2,012 \cdot 10^{-2}$	$2,024 \cdot 10^{-2}$

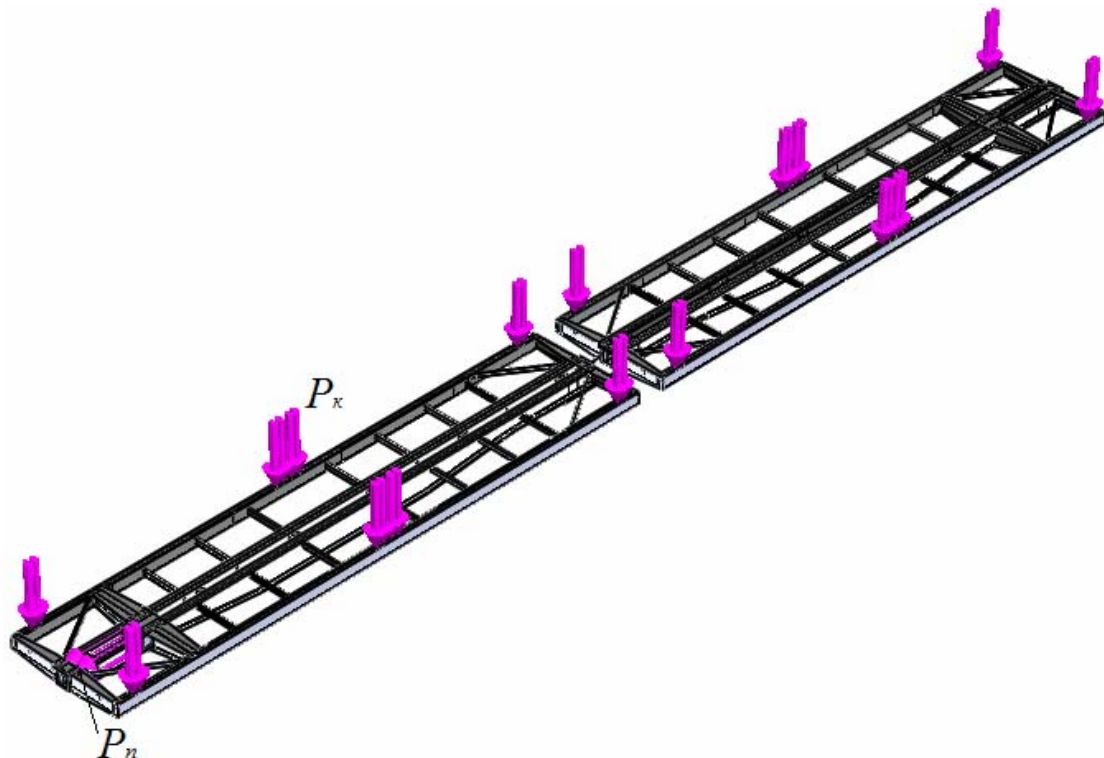


Рис. 7. Схема навантаження несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу при I розрахунковому режимі (ривок–розтягнення)

Fig. 7. Load scheme of the supporting structure of the platform car of articulated type at the I design conditions (jerk-stretching)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

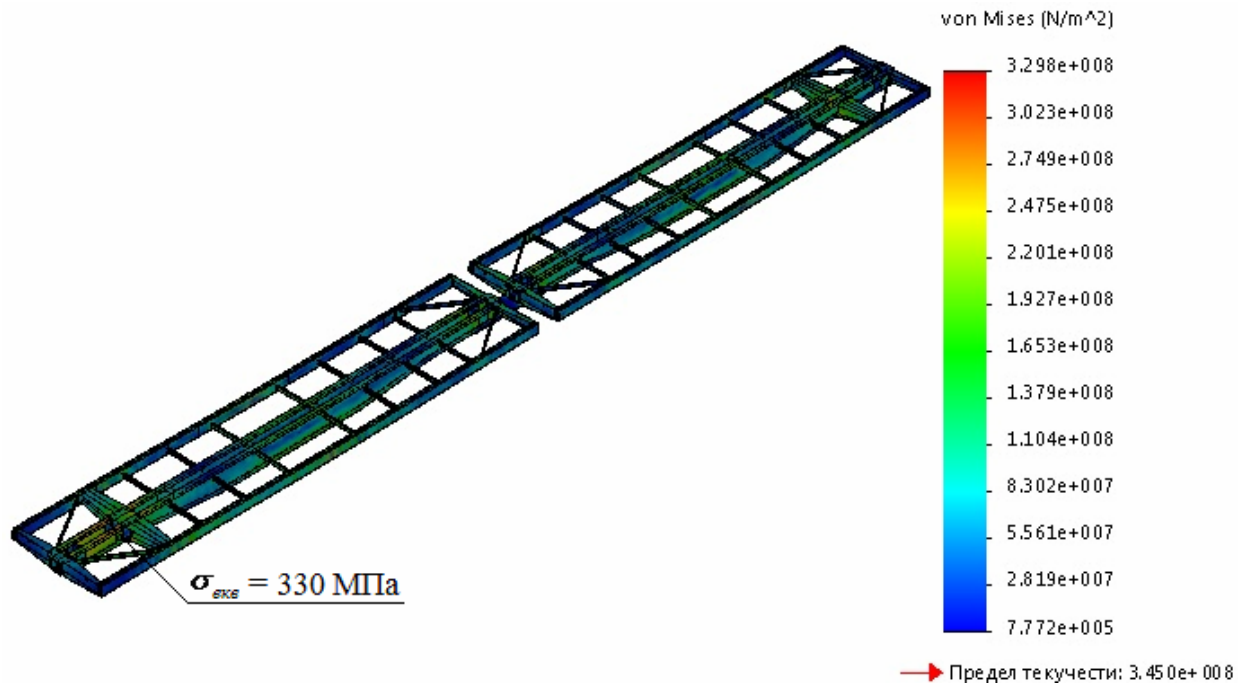


Рис. 8. Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу  
при I розрахунковому режимі (ривок–розтягнення)

Fig. 8. Stress state of supporting structure of the platform car of articulated type at the I design conditions  
(jerk-stretching)

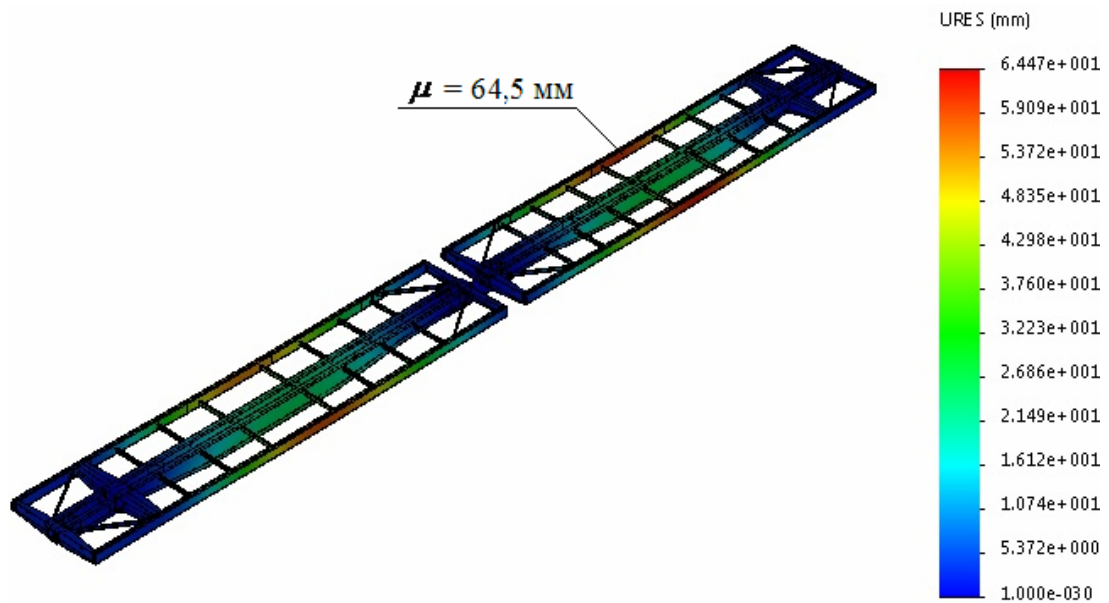


Рис. 9. Переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу  
при I розрахунковому режимі (ривок–розтягнення)

Fig. 9. Displacement in the nodes of supporting structure of the platform car of articulated type at the I design conditions  
(jerk-stretching)

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

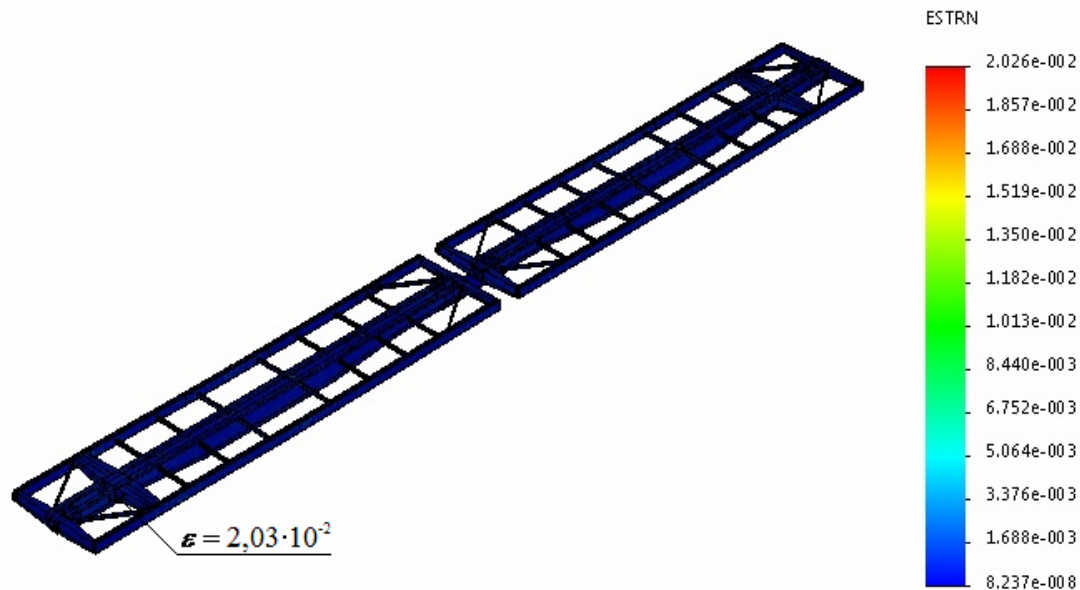


Рис. 10. Деформації в несучій конструкції вагона-платформи зчленованого типу при I розрахунковому режимі (ривок–розтягнення)

Fig. 10. Deformations in the supporting structure of the platform car of articulated type at the I design conditions (jerk-stretching)

### Результати

Розроблено несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу на базі універсального вагона-платформи.

Отримано уточнені величини динамічних навантажень, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами, розміщеними на ньому при експлуатаційних режимах навантаження.

Визначено максимальні еквівалентні напруження несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу при дії експлуатаційних навантажень.

### Наукова новизна та практична значимість

1. Запропоновано математичну модель переміщень вагона-платформи зчленованого типу з контейнерами, розміщеними на ньому при експлуатаційних режимах навантаження.

2. Розроблено модель міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу, створеного на базі універсального вагона-платформи.

Результати проведених досліджень можуть використовуватися при проектуванні вагонів-

платформ зчленованого типу для забезпечення їх міцності при комбінованих перевезеннях.

### Висновки

На підставі виконаних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Виконано дослідження міцності вагона-платформи моделі 13-401 при експлуатаційних режимах навантаження та оптимізовано елементи його несучої конструкції з метою зменшення матеріалоемності. При цьому враховано, що вагон-платформа завантажений двома контейнерами типорозміру 1СС. Виявлено резерви міцності елементів несучої конструкції вагона-платформи та визначено найбільш оптимальні з точки зору мінімальної матеріалоемності профілі їх виконання.

Для підвищення ефективності експлуатації удосконаленої конструкції вагона-платформи пропонується створення на його базі вагона-платформи зчленованого типу.

2. Досліджено динамічні особливості вагона-платформи зчленованого типу при експлуатаційних режимах навантаження. Отримані результати використані при моделюванні міцності несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

3. Виконано дослідження міцності удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи зчленованого типу. При цьому встановлено, що максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції не перевищують допустимі.

Виконані дослідження сприятимуть створенню вагонів-платформ зчленованого типу для перевезення контейнерів та підвищенню ефективності комбінованого транспорту в напрямку міжнародних транспортних коридорів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOSWorks 2006–2007. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК, 2007. – 784 с.
2. Анисимов, П. Модель пространственных колебаний платформы с длинномерным грузом / П. Анисимов // Мир транспорта. – 2013. – № 4. – С. 6–13.
3. Бондарь, А. И. Теоретическая и экспериментальная оценка прочности вагона-платформы для перевозки автомобильных полуприцепов / А. И. Бондарь, А. Ю. Панин // Трансп. Рос. Федерации. – 2014. – № 3. – С. 33–35.
4. Бороненко, Ю. П. Выбор конструктивных решений сочлененных грузовых вагонов для колеи 1520 мм / Ю. П. Бороненко, Т. М. Белгородцева, Н. А. Кукушина // Трансп. Рос. Федерации. – 2013. – № 3 (46). – С. 3–9.
5. Бубнов, В. М. Определение экономической эффективности использования вагонов-платформ секционного типа / В. М. Бубнов, С. В. Мямлин, Н. Л. Гуржи // Мир транспорта. – 2010. – № 32. – С. 246–250.
6. Візник, Р. І. Розширення функціональних особливостей універсальних вагонів-платформ з метою перевезення контейнерів у міжнародному залізнично-водному сполученні / Р. І. Візник, А. О. Ловська // 36. наук. пр. Укр. держ. ун-ту заліз. трансп. – Харків, 2013. – Вип. 139. – С. 157–164.
7. Гуржи, Н. Л. Поліпшення технічних характеристик секційного вагону-платформи шляхом вдосконалення конструкції : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Гуржи Наталія Леонідівна ; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – 20 с.
8. Данович, В. Д. Колебания в горизонтальной плоскости 4-осн. платформы с несимметрично расположенным тяжеловесным грузом / В. Д. Данович, П. С. Анисимов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1989. – № 3. – С. 5–9.
9. Демин, Ю. В. Динамика комбинированных поездов / Ю. В. Демин, Д. В. Дмитриев, О. М. Савчук // Заліз. трансп. України. – 1997. – № 2-3. – С. 31–38.
10. Дьяконов, В. MATHCAD 8/2000 : спец. справ. / В. Дьяконов. – Санкт-Петербург : Питер, 2000. – 592 с.
11. Инновационное решение – 120-футовая платформа сочлененного типа для перевозки трех 40-футовых крупнотоннажных контейнеров / Ю. П. Бороненко, Т. М. Белгородцева, С. Г. Васильев, Н. В. Смирнов // Трансп. Рос. Федерации. – 2009. – № 5 (24). – С. 56–59.
12. Исследование пространственных колебаний длиннобазного вагона-платформы / С. В. Мямлин, А. В. Шатунов, А. В. Сороколет [и др.] // Заліз. трансп. України. – 2009. – № 6. – С. 47–49.
13. Кирьянов, Д. В. Mathcad 13 / Д. В. Кирьянов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. – 608 с.
14. Кожокар, К. В. Особенности разработки скоростного сочлененного вагона-платформы для перевозки контейнеров / К. В. Кожокар // Трансп. Рос. Федерации. – 2013. – № 3. – С. 21–24.
15. Ловська, А. О. Дослідження динамічної навантажності вагона-платформи при маневровому співударянні / А. О. Ловська, А. В. Рибін // Восточно-Европ. журн. передовых технологий. – 2016. – Т. 3, № 7 (81). – С. 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72054.
16. Мямлин, С. В. Подвижной состав для перевозки контейнеров железнодорожным транспортом / С. В. Мямлин, А. В. Шатунов, А. В. Сороколет // Сб. науч. трудов ДонИЖТа. – Донецк, 2010. – Вып. 22. – С. 125–132.
17. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку / Г. И. Богомаз, Д. Д. Мехов, О. П. Пилипченко, Ю. Г. Черномашенцева // Динаміка та керування рухом механічних систем : зб. наук. пр. / АНУ, ін-т техн. механіки. – Київ, 1992. – С. 87–95.
18. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
19. Пат. 112239 Україна, МПК В 61 D 3/00, В 61 F 1/02, В 61 F 1/00, В 61 F 1/08. Залізничний вагон-платформа / Фомін О. В., Ловська А. О. (Україна) ; заявник та патентовласник Укр. держ. ун-т заліз. трансп. – № а 2015 01317 ; заявл. 17.02.2015 ; опубл. 10.08.2016, Бюл. №15. – 4 с.
20. Проектирование подъемных барабанов в SolidWorks Simulation [Електронний ресурс] / К. Заболотный, А. Жупиев, Е. Панченко [и др.]. // Компьютерное проектирование и технический документооборот. –



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

2010. – № 1. – С. 16–21. – Режим доступу: [http://gmi.nmu.org.ua/ru/nauka/Publications/\\_nkmz\\_2.pdf](http://gmi.nmu.org.ua/ru/nauka/Publications/_nkmz_2.pdf). – Назва з екрана. – Перевірено : 23.01.2017.
21. Рудакова, Е. А. Исследование динамических качеств сочлененного вагона-платформы на математических моделях / Е. А. Рудакова, А. М. Орлова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 23. – С. 85–88.
  22. Фомін, О. В. Дослідження доцільності застосування круглих труб в якості елементів несучих систем залізничних вагонів-платформ / О. В. Фомін, А. О. Ловська // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2015. – № 1. – С. 38–45.
  23. Divya Priya, G. Modeling and analysis of twenty tonnes heavy duty trolley / G. Divya Priya, A. Swarnakumari // Intern. J. of Innovative Technology and Research. – 2014. – Vol. 2, No. 6. – P. 1568–1580.
  24. Krason, W. Fe numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards / W. Krason, T. Niezgoda // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. – 2014. – Vol. 62. – Iss. 4. – P. 843–851. doi: 10.2478/bpasts-2014-0093.
  25. Lysikov, N. Stress load and durability analysis of railway vehicles using multibody approach / N. Lysikov, R. Kovalev, G. Mikheev // Transport problems – Problemy Transportu. – 2007. – Т. 2, З. 3. – P. 49–56.
  26. Marinoshenko, S. Switching over to the home platform / S. Marinoshenko // J. for Partners Transmashholding. – 2015. – No. 3. – P. 22–23.
  27. Multi-body Simulations of Railway Wagon Dynamics / K. Wójcik, J. Malachowski, P. Baranowski [et al.] // J. of KONES. Powertrain and Transport. – 2015. – Vol. 19. – Iss. 3. – P. 499–506. doi.org/10.5604/12314005.1138164.
  28. Niezgoda, T. Simulations of motion of prototype railway wagon with rotatable loading floor carried out in MSC Adams software / T. Niezgoda, W. Krasoń, M. Stankiewicz // J. of KONES. Powertrain and Transport. – 2015. – Vol. 19. – Iss. 4. – P. 495–502. doi: 10.5604/12314005.1138622.
  29. Sandu, N. Static and dynamic tests performed on a flat wagon / N. Sandu, N. L. Zaharia // Problemy kolejnictwa. – 2014. – Z. 163 (2014). – P. 67–77.
  30. WBN Waggonbau Niesky GmbH: Developing a flexible platform of freight wagons // Intern. Edition. – 2016. – № 1. – P. 46.

А. А. ЛОВСКАЯ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагоны», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61500, тел. +38 (057) 730 10 35, эл. почта [alyonalovskaya.vagons@gmail.com](mailto:alyonalovskaya.vagons@gmail.com), ORCID 0000-0002-8604-1764

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК

**Цель.** Данное исследование направлено на усовершенствование несущей конструкции вагона-платформы для повышения эффективности контейнерных перевозок. **Методика.** Для достижения поставленной цели проведены исследования прочности универсального вагона-платформы модели 13-401, определены резервы прочности несущих элементов его конструкции и предложены более оптимальные, с точки зрения минимальной материалоемкости, профили выполнения основных продольных балок рамы. Правильность принятых решений подтверждена расчетами несущей конструкции вагона-платформы на прочность (при основных эксплуатационных режимах нагружения) и усталость – с учетом базы испытаний  $10^7$  циклов. Для возможности закрепления контейнеров на раме вагона-платформы предлагается оснащение его откидными фитинговыми упорами, что позволит осуществлять перевозку 20-ти и 40-футовых контейнеров. С целью повышения эффективности контейнерных перевозок в направлении международных транспортных коридоров, которые проходят через территорию Украины, на базе усовершенствованной конструкции вагона-платформы разработан вагон-платформа сочлененного типа. Выполнено математическое моделирование динамической нагруженности вагона-платформы с контейнерами, размещенными на нем (два контейнера типоразмера 1СС) при эксплуатационных режимах нагружения. Определены максимальные ускорения, которые действуют на несущую конструкцию, и учтены их численные значения при компьютерном моделировании прочности вагона-платформы сочлененного типа. **Результаты.** Разработана несущая конструкция вагона-платформы сочлененного типа на базе универсального вагона-платформы. Получены уточненные



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

величины динамических нагрузок, которые действуют на несущую конструкцию вагона-платформы сочлененного типа с контейнерами, размещенными на нем при эксплуатационных режимах нагружения, и определены максимальные эквивалентные напряжения в несущей конструкции вагона-платформы. **Научная новизна.** Предложена математическая модель перемещений вагона-платформы сочлененного типа с контейнерами, размещенными на нем при эксплуатационных режимах нагружения несущей конструкции. Разработана модель прочности несущей конструкции вагона-платформы сочлененного типа, созданного на базе универсального вагона-платформы. **Практическая значимость.** Результаты проведенных исследований могут использоваться при проектировании вагонов-платформ сочлененного типа для обеспечения их прочности при комбинированных перевозках.

**Ключевые слова:** вагон-платформа сочлененного типа; несущая конструкция; оптимизация; динамика; прочность; моделирование; нагруженность конструкции; комбинированные перевозки

A. O. LOVSKA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Cars», Ukrainian State University of Railway Transport, Feierbakh Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

## IMPROVEMENT OF THE SUPPORTING STRUCTURE OF PLATFORM CAR FOR HIGHER EFFICIENCY OF CONTAINER TRANSPORTATIONS

**Purpose.** The article is aimed to improve supporting structures of the platform car to increase the efficiency of container transportations. **Methodology.** In order to achieve the objective, the strength investigations of the universal platform car of the model 13-401 were conducted, strength reserves of the supporting elements were defined, and more optimal profiles of basic longitudinal beams of the frame in terms of the minimum material capacity were proposed. Decision correctness was confirmed by the strength calculation of the platform car supporting structure at basic loading operational modes and fatigue taking into account the research database of  $10^7$  cycles. It has been proposed to equip a platform car with swing fitting stops for fastening containers on the frame, which allows transportation of 20ft and 40ft containers. In order to improve container transportation efficiency along international transport corridors running through Ukraine, a platform car of articulated type has been designed on the base of the improved platform car structure. The mathematical simulation of dynamic loads of the platform car with containers (two ICC containers) at operational loading modes has been carried out, the maximum accelerations influencing the support structure have been defined, and their multiple values have been considered in computer simulation of the strength of the platform car of articulated type. **Findings.** The support structure of the platform car of articulated type on the basis of the standard platform car has been developed. Refined values of dynamic loads influencing supporting structure the platform car of articulated type with containers at operational loading modes have been obtained; the maximum equivalent stresses in the platform car support structure have been defined. **Originality and practical value.** A mathematical model of displacements for a platform car of articulated type with containers at operational loading modes of supporting structure has been proposed. The strength model of the supporting structure for the platform car of articulated type based on the standard platform car has been developed. Results of the research can be used in designing of platform cars of articulated type to provide their strength at mixed transportations.

**Keywords:** a platform car of articulated d type; supporting structure; optimization; dynamics; strength; simulation; structure loading; mixed transportations

## REFERENCES

- 1 Alyamovskiy, A. A. (2007). SolidWorks/COSMOSWorks 2006-2007. *Inzhenernyy analiz metodom konechnykh elementov*. Moscow: DMK.
- 2 Anisimov, P. S. (2013). Model of spatial oscillations of a flat car with long goods. *World of Transport and Transportation*, 4, 6-13.
- 3 Bondarenko, A. I., & Panin, A. Y. (2014). Theoretical and experimental evaluation of strength of platform wagon designed to transport car semi-trailers. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 3, 33-35.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- 4 Boronenko, Y. P., Belgorodtseva, T. M., & Kukushina, N. A. (2013). Choosing coupled freight wagons design solutions for 1520 mm gauge. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 3(46), 3-9.
- 5 Bubnov, V. M., Myamlin, S. V., & Gurzhi, N. L. (2010). Opredeleniye ekonomicheskoy effektivnosti ispol-zovaniya vagonov-platform sektionnogo tipa. *World of Transport and Transportation*, 32, 246-250.
- 6 Viznyak, R. I., & Lovska, A. O. (2013). The expansion of functional peculiarities of versatile flat cars for the purpose of transporting containers in international railway communication. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*, 139, 157-164.
- 7 Gurzhi, N. L. (2010). *Improvement of technical descriptions of sectional carriage-platform by perfection of construction*. (PhD thesis). Available from Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.
- 8 Danovich, V. D., & Anisimov, P. S. (1989). Kolebaniya v gorizontalnoy ploskosti 4-osn. platformy s nesim-metrichno raspolozhennym tyazhelovesnym грузом. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 3, 5-9.
- 9 Demin, Y. V., Dmitriev, D. V., & Savchuk, O. M. (1997). Dinamika kombinirovannykh poyezdov. *Zal-iznychnyi transport Ukrainy*, 2-3, 31-38.
- 10 Dyakonov, V. (2000). *MATHCAD 8/2000: Spetsialnyy spravochnik*. Saint Petersburg: Piter.
- 11 Boronenko, Y. P., Belgorodtseva, T. M., Vasilev, S. G., & Smirnov, N. V. (2009). Innovatsionnoye resheniye – 120-futovaya platforma sochlenennogo tipa dlya perevozki trekh 40-futovykh krupnotonnazhnykh kon-teynerov. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 5(24), 56-59.
- 12 Myamlin, S. V., Shatunov, A. V., Sorokolet, A. V., Kovtun, Y. N., & Markova, O. M. (2009). Issledovaniye prostranstvennykh kolebaniy dlinnobaznogo vagona-platformy. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, 6, 47-49.
- 13 Kiryanov, D. V. (2006). *Mathcad 13*. Saint Petersburg: BHV–Peterburg.
- 14 Kozhokar, K. V. (2013). Peculiarities of designing a high-speed coupled flat wagon for container transporta-tion. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 3, 21-24.
- 15 Lovskaya, A. O., & Ryibin, A. V. (2016). The study of dynamic load on a wagon–platform at a shunting colli-sion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 7(81), 4-8. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72054
- 16 Myamlin, S. V., Shatunov, A. V., & Sorokolet, A. V. (2010). Podvizhnoy sostav dlya perevozki konteynerov zheleznodorozhnyim transportom. *Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, 22, 125-132.
- 17 Bogomaz, G. I., Mehov, D. D., Pilipchenko, O. P., & Chernomashentseva, Y. G. (1992). Nagruzhenost kon-teynerov-tsistern, raspolozhennykh na zheleznodorozhnoy platforme, pri udarakh v avtostsepku. In *Dynamika ta keruvannya rukhom mekhanichnykh system* (pp. 87-95). Kyiv: Institute of Technical Mechanics.
- 18 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.
- 19 Fomin, O. V., & Lovska, A. O. (2016). *UA Patent No. 112239*. Ukrpatent. Retrieved from <http://www.uipv.org/>
- 20 Zabolotnyy, K., Zhupiev, A., Panchenko, Y., Protynyak, I., Kolyuzhnyy, S., & Ovchinnikov, Y. (2010). Proyektirovaniye podemnykh barabanov v SolidWorks Simulation. *KPD, Kompyuternoye proektirovaniye i tekhnicheskiiy dokumentooborot*, 1, 16-21. Retrieved from [http://gmi.nmu.org.ua/ru/nauka/Publications/\\_nkmz\\_2.pdf](http://gmi.nmu.org.ua/ru/nauka/Publications/_nkmz_2.pdf)
- 21 Rudakova, E. O., & Orlova, A. M. (2008). The study of the dynamic properties of the articulated flat-car on mathematical models. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 23, 85-88.
- 22 Fomin, O. V., & Lovskaya, A. O. (2015). Research of expedience application of round pipes in quality ele-ments bearings systems of railway carriages-platforms. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 1(218), 38-45.
- 23 Divya Priya, G., & Swarnakumari, A. (2014). Modeling and analysis of twenty tonnes heavy duty trolley. *In-ternational Journal of Innovative Technology and Research*, 2(6), 1568-1580.
- 24 Krason, W., & Niezgoda, T. (2014). Fe numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 62(4), 843-851. doi: 10.2478/bpasts-2014-0093
- 25 Lysikov, N., Kovalev, R., & Mikheev, G. (2007). Stress load and durability analysis of railway vehicles using multibody approach. *Transport Problems*, 2(3), 49-56.
- 26 Marinoshenko, S. (2015). Switching over to the home platform. *Journal for Partners Transmashholding*, 3, 22-23.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- 27 Wójcik, K., Malachowski, J., Baranowski, P., Mazurkiewicz, L., Damaziak, K., & Krason, W. (2015). Multi-body simulations of railway wagon dynamics. *Journal of KONES: Powertrain and Transport*, 19(3), 499-506. doi: 10.5604/12314005.1138164
- 28 Niezgoda, T., Krason, W., & Stankiewicz, M. (2015). Simulations of motion of prototype railway wagon with rotatable loading floor carried out in MSC Adams software. *Journal of KONES: Powertrain and Transport*, 19(4), 495-502. doi: 10.5604/12314005.1138622
- 29 Sandu, N., & Zaharia, N. L. (2014). Static and Dynamic Tests Performed on a Flat Wagon. *Problemy kolejnictwa*, 163, 67-77.
- 30 WBN Waggonbau Niesky GmbH. (2016). *Developing a flexible platform of freight wagons*. Niesky: WBN Waggonbau Niesky GmbH.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. Е. Мартиновим (Україна); д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна)

Надійшла до редколегії: 01.09.2016

Прийнята до друку: 30.12.2016

## UDC 629.463.027.23

O. A. SHYKUNOV<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Cars and Cars Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail tri\_s@ua.fm, ORCID 0000-0002-8256-2634

## THREE-ELEMENT BOGIE SIDE FRAME STRENGTH

**Purpose.** To evaluate the effect of different loads on the stress-strain state of the freight car bogie side frame, as well as to evaluate the distribution of the stress fields in the design of the freight car bogie side frame supported through the horizontal surface and through the horizontal and inclined surfaces of the pedestal opening. **Methodology.** A volumetric finite element model of the side frame of ZK-1 bogie of the freight car was designed. The forces under the current regulatory documentation for theoretical research were applied to the model, the stress arising in the model elements were determined. The static tests of ZK-1 bogie side frame were conducted; they allowed determining the stresses in the key points of the frame under the action of forces in accordance with the existing procedure of static tests of the freight car bogie side frame. To check the quality of the finite element model we determined the stress in the model under the action of forces corresponding to the static requirements. The corresponding coefficients were determined to match the stress obtained through theoretical studies and static tests. The results of theoretical and experimental studies of stress for dangerous sections of the side frame design were compared. **Findings.** The regulatory documentation for carrying out experimental research of the side frame strength does not fully take into account the load acting on the frame during its operation and that provided while assessing the side frame strength theoretically. The strength evaluation of the side frame by the results of field tests only does not give a complete picture of the distribution of stress fields, as the provided sensor installation points do not cover most of the design elements with possible stress concentration. **Originality.** The loads applied to the side frame during theoretical and experimental studies were compared to the loads acting during operation. The impact of use of inclined surfaces in the pedestal box opening was evaluated. **Practical value.** The obtained results allow the more accurate assessment of the three-piece bogie side frame strength, as well as allow you to choose the more preferred method of side frame support in the axle box.

**Keywords:** side frame; three-piece bogie; strength; test; calculation; support

## Introduction

The strength of new and upgraded designs of car elements is assessed using the experimental and theoretical studies. Each car element must pass these two stages, and for each of them there are developed regulations governing the load to be applied to the object during theoretical and experimental studies [3, 7, 8, 10].

For freight car three-piece bogie side frame such documents are «Regulations for calculation and design of cars of 1520mm gauge railways of Ministry of Railways (non-self-propelled)» [8] for theoretical studies and «Bolsters and cast side frames of four-wheel bogie of freight cars for 1520 mm track. Methods of static strength tests» [7] for the experimental ones.

However, the loads under which the stress-strain state of the side frame is studied during theoretical and experimental studies differ in both value and place of application. And if the difference

between the values of the existing loads can be compensated by appropriate co-coefficients, it is much more complicated to compensate the difference in places of load application, which leads to difficulties in comparing the results of experimental and theoretical studies.

Development of Ukrzaliznytsia rolling stock and that of the CIS countries in recent years is aimed at increasing the efficiency of cars, not only due to speeding up [6], but also due to their higher carrying capacity by increasing the axle load from 23.5 ton/axle to 25 tons/axle [4, 5, 13, 18].

Increased weight of transported cargo results in the need to strengthen the construction of the car body and undercarriage [1]. At the same time, the increase in car gross mass, along with the constant influence of static load, constantly acting on the bogie from the side of body and cargo, results in increased dynamic component, which occurs during car movement on the main tracks. That leads to the need for additional structural reinforcement of

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

the bogie and its side frame as one of the elements [11].

An alternative to increased strength of bogie components is reduced dynamic effects on the bogie during movement. This effect is achieved in various ways, such as: the use of a bilinear spring suspension at the central core stage, the improvement of friction pairs in the friction wedge-type shock absorber, installation of additional connections between the bogie side frames, etc. [2, 12, 15, 16, 17].

One of the ways to reduce the dynamic component of the load acting on the side frame is to install the second suspension stage between bogie side frame and the wheelset axle box. This assembly is set with an elastic spring element, polyurethane, rubber or rubber-metal gasket. This element can receive and transmit further both exclusively vertical forces and vertical and horizontal forces.

If to take up the first ones, the horizontal support surfaces in the pedestal opening of the bogie side frame are enough, then to transmit the horizontal forces, it is necessary to provide for the presence of the elastic element between the vertical support surfaces. Realizing such a support way it is necessary to prevent from elastic element falling out of the space between the vertical support surfaces, by means of its additional fastening, which leads to complicated construction in the place of interaction of side frame and axle box. An alternative is to set the elastic elements on inclined surfaces for taking up the vertical and horizontal loads by one and the same elastic element. For this purpose, it is necessary to provide for appropriate support surfaces both of the axle box housing and in the pedestal opening or to use adapters. The second way is not effective, although it leads to increased side frame unification, but the presence of additional elements results in reduced work space in the pedestal opening and sizes of the elastic gasket.

The transition from boxes to the cassette type bearings and the axle box adapters allows abandoning the unified box housing and applying axle box adapters with different surfaces for side frame supporting.

The need for inclined support surfaces in the pedestal opening also involves changes in the bogie side frame, and transfer of the horizontal loads or most of them through the upper member of the pedestal opening leads to the redistribution of

stresses in the side frame and the need of strengthening in the places not critical for frames with separate load transfer.

### Purpose

The purpose of the work is to evaluate the effect of different loads on the stress-strain state of the freight car bogie side frame, as well as to evaluate the distribution of the stress fields in the design of the freight car bogie side frame supported through the horizontal surface and through the horizontal and inclined surfaces of the pedestal opening.

### Methodology

The study was conducted for the side frame of the three-piece bogie of ZK-1 model made in China.

ZK-1 bogie side frame has the construction typical for three-piece bogie side frames – it consists of upper, lower, diagonal members and 2 columns. Support on wheelsets is through pedestal openings, the upper surface of which is 2-pitch with a horizontal platform in the middle. The central opening of the side frame houses a set of 9 2-row suspension springs. The friction shock absorber plates are mounted on the inner surface.

To evaluate the stress-strain state of the side frame the finite element model is developed. There are applied solid 10-unit elements with a characteristic edge size of 10 mm. Dimensions of the elements vary in model volume and decrease in the places of openings, radius transitions and other potential stress raisers. The element size is chosen so that its further change would have no effect on the calculation results. The modelling process first created the three-dimensional geometrical model (Fig. 1), which was automatically divided into three-dimensional finite elements (Fig. 2). The resulting finite element model of the bogie has 664,705 elements, 1,789,864 units and 5,369,592 degrees of freedom.

For model material, the following values of the elastic constants of the material are assumed: Young's modulus  $E = 210$  GPa, Poisson's ratio  $\nu = 0.27$ .

The calculation was performed in accordance with the «Regulations...» [8], which state that the bogie side frame is subjected to the combination of vertical, side and longitudinal loads.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ



Fig. 1. Geometric model of ZK-1 bogie side frame



Fig. 2. Detail of the finite element model of ZK-1 bogie side frame

Vertical loads are as follows:

- Vertical static load,
- Vertical dynamic load,
- Vertical contribution of longitudinal inertia force of the car,
- Vertical contribution of braking force,
- Vertical contribution of forces of inertia in the curve and wind pressure strength.

Side loads are as follows:

- Wind pressure forces and centrifugal force during the passage curved track sections,
- Transverse component of longitudinal quasi-static force,
- Frame force.

Longitudinal loads are as follows:

- Bogie mass inertia force,
- Brake force,
- Thrust force of friction wedges.

These loads are grouped in six variants of loading that correspond to:

- a) the forces acting on the car during its collision with the train when breaking-up from a hump;
- b) the forces acting on the car in the middle of the train with braked front cars and not braked, approaching from the rear cars;

c) the forces acting on the last car moving with the design speed in the train during adjusting braking at the beginning of the curved section;

d) the forces acting on the last car moving with the design speed in the train during adjusting braking at the straight track section;

e) the forces acting on the car moving with the design speed in the train during adjusting braking in a curve, with braked front cars and not braked, approaching from the rear cars;

f) the forces acting on the car moving with the design speed in the train during adjusting braking in a curve.

The I design mode corresponds to the variants of loading *a* and *b*, III – *c ... f*.

Table 1 shows the values and points of origin of the maximum stress in the bogie side frame.

Table 1

**The maximum stresses in the bogie side frame, MPa**

Variant of loading	Point of origin	Limit values	Calculated value
a	Lower angles of the central spring opening	250	240
b	Vertical support surface of the pedestal opening	250	235
c	Lower angles of the central spring opening	140	132
d	Vertical support surface of the pedestal opening	140	137
e	Vertical support surface of the pedestal opening	140	139
f	Lower angles of the central spring opening	140	131

This side frame also underwent the complex of static strength tests according to [7]. Tests were carried out on the territory of Qiqihar Railway Rolling Stock Co. Ltd. (PRC) on the testing machine ZDM 200Pu.

During the tests, the stresses occurring at the control points of the side frame due to five loading

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

schemes were registered. For the side frames of the cars with 245 kN axle load there are the following values of the test loads and the places of their application:

1 – vertical load of 490 kN uniformly applied to support places of the central group springs;

2 – horizontal load of 147 kN applied on the outer side of the frame to one of the columns of the central spring opening;

3 – horizontal loads of 73.5 kN each applied on the outer side of the frame to both columns of the central spring opening;

4 – horizontal loads of 122 kN each applied to the friction plates of the central spring opening;

5 – horizontal loads of 66 kN each applied to the vertical surfaces of the pedestal opening.

To check the adequacy of the finite element model of the real side frame, the calculations were conducted, in which the finite element model was subjected to the loads similar to the experimental ones, and the calculation resulting stresses were compared with those obtained during the tests [14]. Figure 3 shows the control sections and the sensor installation location during the test.

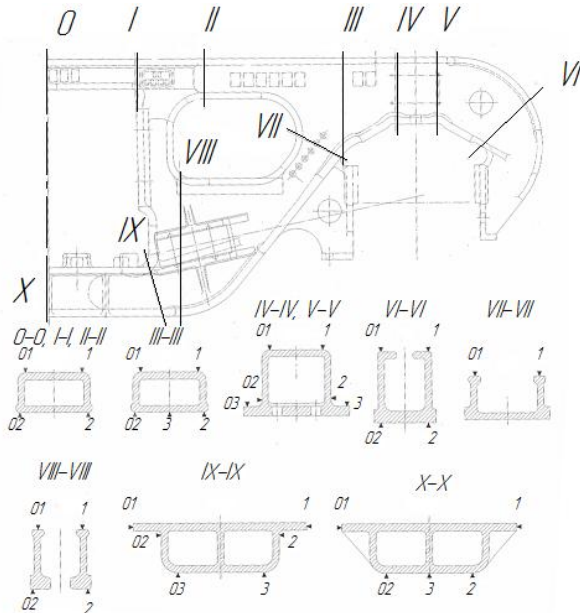


Fig. 3. Layout of strain sensors for static tests

Comparison of calculation and test results for some check points is given in Table 2.

As can be seen from Table 2 the results of theoretical studies are in good agreement with the test results, indicating the adequacy of the finite element model and the real side frame.

To compare the results of theoretical studies according to the «Regulations...» [8] and the experiment according to the method [7], there were calculated the correlation coefficients of the loads applied during testing and load combinations that act on the side frame according to the «Regulations...». These coefficients are presented in Table 3.

Table 2

**Stresses in check points during testing  
and theoretical modelling**

Section-point	Stresses during loading by scheme, MPa	
	1	2
0-2	-54.23	-42.73
	-47.73	-44.46
0-02	-48.10	44.83
	-49.80	40.66
I-2	-81.83	-99.67
	-86.59	-125.93
I'-2	-73.80	-43.03
	-97.82	-59.88
III-2	94.23	-0.57
	108.34	23.34
III'-2	68.43	-15.47
	109.69	16.40
III'-02	93.00	8.23
	115.24	-16.99
VIII'-1	-72.30	-10.70
	-70.25	-14.47
IX-1	31.50	-164.40
	44.59	-112.94
IX-01	22.23	103.60
	67.82	165.31
X-02	100.10	17.87
	105.53	15.69

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

End of table 2

Section-point	Stresses during loading by scheme, MPa		
	3	4	5
0-2	-41.13	-22.17	-0.30
	-26.13	-21.26	-0.60
0-02	38.7	21.83	-0.70
	23.82	19.79	-0.53
I-2	-57.50	24.83	-3.23
	-53.00	30.29	-2.61
I'-2	-67.77	21.90	0.60
	-61.66	35.38	0.74
III-2	-8.50	-3.37	23.40
	11.85	-4.50	24.81
III'-2	-11.43	-2.47	0.07
	11.94	-4.63	0.01
III'-02	3.73	-3.23	0.10
	-12.52	-4.46	0.01
VIII'-1	-20.67	-30.00	0.03
	-18.41	-29.97	0.06
IX-1	-132.20	9.23	-0.73
	-54.39	11.05	-0.87
IX-01	84.83	11.53	-0.97
	84.93	11.07	-1.00
X-02	17.10	-0.70	-0.13
	9.42	-1.33	0.14

Note: The numerator shows the values obtained from the tests, the denominator – those from theoretical studies.

The use of the coefficients shown in Table 3 allows converting the stresses obtained during the static test to compare them with the results of theoretical studies by the formula:

$$\sigma_i = \sum k_{ij} \sigma_j,$$

where  $\sigma_i$  – stresses obtained during the static tests by the  $j$ -th loading scheme, MPa;  $k_{ij}$  – coefficient taking into account the ratio of the forces applied by the  $j$ -th loading scheme of the static tests and the  $i$ -th variant of loading of the theoretical studies;  $i$  – variant of loading during theoretical studies,  $i=1, 2, \dots, 6$ ;  $j$  – loading scheme for static tests,  $j=1, 3, 4, 5$ .

Table 4 shows the stresses obtained at the check points during the theoretical study of stress-strain state of the side frame according to the «Regulations...» (denominator) and the ones resulting from conversion of the test results, taking into account the coefficients of Table 3 (numerator).

Table 3

Load ratio during theoretical and experimental studies of the side frame

Variant of loading	Total force			
	Vertical stress on lower member	Transverse force on columns	Thrust force of wedges	Longitudinal stress
a	0.91	0	0.36	1.24
b	0.46	1.44	0.21	0.89
c	0.89	0.23	0.35	0.35
d	0.77	0.81	0.31	0.74
e	0.80	0.81	0.32	0.74
f	0.80	0.81	0.32	0

Table 4

Stresses in check points during theoretical modelling and test result conversion

Section-point	Stresses during loading by scheme, MPa		
	a	b	c
1	2	3	4
0-2	-42.00	-80.01	-50.19
	-31.04	-53.26	-40.06
0-02	-37.02	37.47	-26.49
	-33.53	20.26	-30.40
I-2	-69.88	-118.44	-78.66
	-69.82	-114.42	-80.50
I'-2	-58.84	-126.75	-73.56
	-62.40	-120.37	-86.33
III-2	113.84	51.46	89.01
	59.87	18.25	83.99
III'-2	61.67	14.80	57.41
	96.42	42.74	95.40
III'-02	83.87	47.91	82.54
	101.50	60.87	102.22



## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Continuation table 4

Section-point	Stresses during loading by scheme, MPa		
	a	b	c
1	2	3	4
VIII'-1	-76.62	-69.63	-79.56
	-65.16	-57.51	-68.07
IX-1	31.13	-174.64	0.33
	45.69	-78.17	-33.83
IX-01	23.18	134.16	43.12
	68.29	161.82	85.80
X-02	55.45	10.85	51.24
	90.45	30.18	86.21

End of table 4

Section-point	Stresses during loading by scheme, MPa		
	d	e	f
1	5	6	7
0-2	-68.25	-69.66	-69.43
	-49.19	-50.80	-53.78
0-02	0.73	-0.63	-0.11
	-9.32	-11.05	-13.98
I-2	-104.01	-106.25	-103.85
	-103.14	-106.17	-105.69
I'-2	-104.24	-106.24	-106.68
	-108.12	-111.52	-120.42
III-2	81.60	84.65	67.29
	57.22	61.55	84.53
III'-2	42.44	44.66	44.61
	79.68	84.08	85.56
III'-02	73.32	76.31	76.24
	90.36	94.96	96.52
VIII'-1	-81.34	-84.05	-84.08
	-68.11	-71.04	-73.77
IX-1	-80.70	-79.30	-78.76
	-42.58	-42.47	-41.59
IX-01	88.60	89.31	90.03
	127.45	130.21	129.57
X-02	36.77	38.78	38.76
	67.41	71.53	71.88

Note: The numerator shows the values obtained from conversion of the test results, the denominator – the results of theoretical studies.

As can be seen from Table 4 between the results of theoretical studies and the converted results of the experiment there is the large enough, sometimes more than 100%, discrepancy. For example, at III-2 section for the variants of loading *a* and *b* the experimental-converted stresses exceed the theoretical ones by 1.9 and 2.8 times, while for the variant of loading *c* they are almost equal. For the section III'-2, located symmetrically in relation to the vertical transverse plane, under the same variants of loading the experimental-converted stresses are 1.5 and 2.9 times below the theoretical ones. At the same time there are no significant differences between the sections under the action of individual components of the test load (see Table 2). This is due to the fact that the variants of loading *a* and *b* correspond to the I-calculation mode and the longitudinal load, taken into account in theoretical studies, is high enough for these variants. Simulation of action of bogie mass inertia force and brake force is not provided by the tests. When these forces are applied to one of the friction plate surfaces, the side frame thrusts against one pedestal opening with its inner vertical surface, while with its external surface in the other opening [9]. This causes not symmetrical loading of the side frame and leads to redistribution of stresses in the structure. It is not correct to replace the action of these forces with the test results when subjected to thrust loads in the central and the pedestal opening, since during such loadings the side frame section between the column and the pedestal opening practically does not work because there is no tensile or compressive load on it.

Also, the stress field distribution analysis revealed that the sensor location points on the bogie side frame given in [7] even though located in the most loaded sections, however, they often do not provide a complete picture of the maximum stress values arising in these sections. The stresses occurring in the check section or near it may exceed two or more times the value at the sensor location point (Fig. 4).

To compare the stress distribution in the side frames with different support in axle box openings, we modelled also the side frame supported in axle box only through the horizontal surfaces similar to the bogie 18-100.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

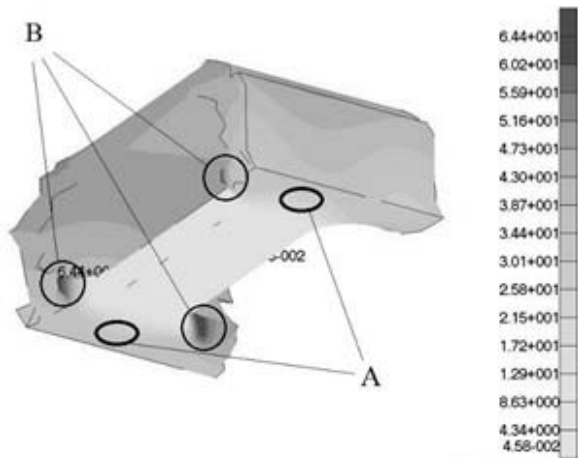


Fig. 4. Stress distribution in the cross section 0 on the side frame upper member:  
 A – sensor installation location (~34.4 MPa);  
 B – areas with high stress (64.4 MPa)

Besides, the volume model was created for this side frame; it is shown in Figure 4, as well as the finite element model (Fig. 5). The solid 10-unit elements with a characteristic edge size of 10 mm were used. The resulting finite element model of the bogie has 812,400 elements 1,290,310 units and 3,870,930 degrees of freedom.



Fig. 5. Geometrical model of the bogie side frame with horizontal support surfaces



Fig. 6. Detail of finite element model of the bogie side frame with support surfaces

Comparison of stress distribution in the side frames was carried out under the action of vertical load only, which corresponded to the first variant of loading during the test – 490 kN load, applied evenly to the spring support places of the central spring group, as this load contributes the major component into the stress-strain state of the side frame.

Comparison of stresses in the side frames is shown in Table 5.

Table 5

**Stresses in the side frame elements during the action of vertical load of 490 kN**

Section	Stresses in side frame, MPa	
	ZK-1	analogue 18-100
Interior angle of pedestal opening	121	173
Process window	139	156
Lower angle of central spring opening	245	225
Lower member	139	191

The presence of ramps in the section of transition from the inclined member to the upper member of the pedestal opening increased the cross-sectional area near the interior angle of the axle box opening, thus reducing the stress on this section. Also, it reduced stress in the area of process window and lower member, but increased their value in the lower angle of the central spring opening.

### Findings

The strength evaluation of the three-piece bogie side frame when modelling loads during the field tests according to [7] does not consider in full the total load acting on the frame during its operation and provided for theoretical evaluation of the side frame strength [8].

The strength evaluation of the side frame by the results of field tests only does not give a complete picture of the distribution of stress fields, as the provided sensor installation points according to [7] do not cover most of the design elements with possible stress concentration.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Application of the inclined support surfaces in axle box opening reduces stress in its interior angle.

### Originality and practical value

The loads applied to the side frame during theoretical and experimental studies were compared to the loads acting during operation.

For the first time the impact of use of inclined surfaces in the pedestal box opening was evaluated.

The obtained results allow the more accurate assessment of the three-piece bogie side frame strength, as well as allow you to choose the more preferred method of side frame support in the axle box.

### Conclusions

The documentation regulating the loads, which must be withstood by the side frames of freight car bogies, does not fully take into account the loads occurring during the car operation.

It is necessary to define more precisely the forces, acting in accordance with applicable regulatory documents, applied to the three-piece bogie side frame during the strength tests.

The strength evaluation of the side frame by the results of field tests only does not give a complete picture of the distribution of stress fields in the structure.

Inclined surfaces in axle box opening in the area of interior angle are more preferable than the horizontal ones.

### LIST OF REFERENCE LINKS

1. Богатов, А. А. О повышении служебных характеристик боковой рамы тележки грузового вагона / А. А. Богатов, Р. А. Ильиных // Вестн. ВНИИЖТа. – 2010. – № 6. – С. 42–44.
2. Бороненко, Ю. П. Обобщение накопленного опыта проектирования тележек грузовых вагонов для создания их типоразмерного ряда / Ю. П. Бороненко, А. М. Орлова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип. 5. – С. 25–29.
3. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. – Введ. 2015.11.01. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 87 с.
4. Динамические качества грузовых вагонов, имеющих тележки с диагональными связями / Е. П. Блохин, К. Т. Алпысбаев, Р. Б. Грановский [и др.] // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. Володимира Даля. – 2012. – № 5, ч. 1. – С. 12–16.
5. Захаров, С. М. Развитие тяжеловесного движения в мире / С. М. Захаров, К. П. Шенфельд // Вестн. ВНИИЖТа. – 2013. – № 4. – С. 9–18.
6. Мямлін, С. В. Прогнозування розвитку конструкції двовісного візка вантажного вагона / С. В. Мямлін, А. С. Мацюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 27. – С. 24–29.
7. Надрессорные балки и боковые рамы литых двухосных тележек грузовых вагонов колеи 1520 мм. Методика статических испытаний на прочность. – Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1992.
8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) (с изменениями и дополнениями № 1 (с 01.02.2000 г.) и № 2 (с 01.03.2002 г.)). – Москва : ГосНИИВ : ВНИИЖТ, 1996. – 352 с.
9. Определение параметров пространственного нагружения литых деталей тележки 18-9855 при проведении стендовых испытаний / Д. В. Шевченко, Т. С. Куклин, А. М. Орлова [и др.] / Техника железных дорог. – 2016. – № 1 (33). – С. 68–74.
10. ОСТ 32.183-2001. Тележки двухосные грузовых вагонов колеи 1520 мм. Детали литые. Рама боковая и балка надрессорная. Технические условия. – Введ. 2002.05.01. – Москва : МПС России, 2001. – 22 с.
11. Рейдемейстер, А. Г. Способы увеличения прочности боковых рам трехэлементных тележек / А. Г. Рейдемейстер, А. А. Шикунов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 5 (59). – С. 141–149. doi: 10.15802/stp2015/55351.
12. Ушкалов, В. Ф. Модернизация тележек грузовых вагонов как вариант обновления ходовых частей грузового подвижного состава / В. Ф. Ушкалов, А. Д. Лашко, Т. Ф. Мокрий // Вестн. ВНИИЖТа. – 2013. – № 5. – С. 8–15.
13. Харыбин, И. А. Совершенствовать ходовую часть грузовых вагонов / И. А. Харыбин, А. М. Орлова, А. В. Додонов // Вагоны и вагонное хоз-во. – 2009. – № 1 (17). – С. 26–29.
14. Bubnov, V. Theoretical and experimental investigations of strength properties of cast parts for freight cars bogie with axle load of 245 kn / V. Bubnov, S. Myamlin, N. Mankevych // TRANSBALICA 2013 : Thesis of

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- the 8th Intern. Conf. (09.05–10.05.2013) / Vilnius Gediminas Technchal University. – Vilnius, 2013. – P. 9–13.
15. Kure, G. The evolution of railway axlebox technology [Electronic resource] / G. Kure // Evolution. – 2010. – 7 December. – Available at: <http://evolution.skf.com/the-evolution-of-railway-axlebox-technology/>. – Title from the screen. – Accessed : 03.05.2016.
  16. Kure, G. The evolution of railway axlebox technology – Part two: Present and future [Electronic resource] / G. Kure // Evolution. – 2011. – 9 March. – Available at: <http://evolution.skf.com/the-evolution-of-railway-axlebox-technology-%E2%80%93-part-two-present-and-future/>. – Title from the screen. – Accessed : 03.05.2016.
  17. Myamlin, S. V. Experimental research of dynamic qualities of freight cars with bogies of different designs / S. V. Myamlin, O. O. Ten, L. O. Neduzha // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 3 (51). – С. 136–145. doi: 10.15802/stp2014/25921.
  18. Rizvi, D. R. Optimisation of Bogie Springs for Higher Axle Load Wagons / D. R. Rizvi, P. K. Bharti // Intern. J. of Engineering Research & Technology. – 2015. – Vol. 4. – Iss. 05. – P. 56–60. doi: 10.17577/ijertv4is050162.

О. А. ШИКУНОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровській національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта [tri\\_s@ua.fm](mailto:tri_s@ua.fm), ORCID 0000-0002-8256-2634

## МІЦНІСТЬ БІЧНОЇ РАМИ ТРЬОХЕЛЕМЕНТНОГО ВІЗКА

**Мета.** У науковій роботі передбачається оцінити вплив різних навантажень на напружено-деформований стан бічної рами візка вантажного вагона, а також розподіл полів напружень у конструкції бічної рами візка вантажного вагона, що спирається через горизонтальні поверхні, та через горизонтальні й похилі поверхні щелепного отвору. **Методика.** Розроблена об'ємна скінченно-елементна модель бічної рами візка ЗК-1 вантажного вагона. До моделі прикладені сили відповідно до чинної нормативної документації на теоретичні дослідження, визначені напруження, що виникають в елементах моделі. Проведено статичні випробування бічної рами візка моделі ЗК-1, при яких визначені напруження, що виникають у ключових точках рами при дії сил згідно з існуючою методикою статичних випробувань бічних рам візків вантажних вагонів. Для перевірки якості скінченно-елементної моделі визначена напруга в ній при дії сил, відповідних статичним випробуванням. Для узгодження напружень, отриманих при теоретичних дослідженнях, і статичних випробувань визначені відповідні коефіцієнти. Проведено порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень напружень у конструкції бічної рами для її небезпечних перетинів. **Результати.** Нормативна документація на проведення експериментальних досліджень міцності бічних рам не враховує повною мірою навантаження, що діють на раму під час її експлуатації, та передбачену теоретичним шляхом міцність бічних рам. Оцінка міцності бічних рам за результатами тільки натурних випробувань не дає повної картини розподілу полів напружень, бо передбачені місця встановлення датчиків не охоплюють більшості елементів конструкції, де можлива концентрація напружень. **Наукова новизна.** Автором проведено порівняння навантажень, що прикладаються до бічної рами при теоретичних та експериментальних дослідженнях, із навантаженнями, що діють в експлуатації. Визначена оцінка впливу застосування похилих поверхонь у буксових отворах. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють більш точно оцінювати міцність бічної рами трьохелементного візка, а також вибрати кращий спосіб спирання бічної рами в буксових вузлах.

**Ключові слова:** бічна рама; трьохелементний візок; міцність; випробування; розрахунок; спирання

А. А. ШИКУНОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Вагони и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта [tri\\_s@ua.fm](mailto:tri_s@ua.fm), ORCID 0000-0002-8256-2634

## ПРОЧНОСТЬ БОКОВОЙ РАМЫ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ ТЕЛЕЖКИ

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

**Цель.** В научной работе предполагается оценить влияние различных нагрузок на напряженно-деформированное состояние боковой рамы тележки грузового вагона, а также распределение полей напряжений в конструкции боковой рамы тележки грузового вагона с опиранием через горизонтальные поверхности, и через горизонтальные и наклонные поверхности челюстного проема. **Методика.** Разработана объемная конечно-элементная модель боковой рамы тележки ЗК-1 грузового вагона. К модели приложены силы согласно действующей нормативной документации на теоретические исследования, определены напряжения, возникающие в элементах модели. Проведены статические испытания боковой рамы тележки модели ЗК-1, при которых определены напряжения, возникающие в ключевых точках рамы при действии сил согласно существующей методике статических испытаний боковых рам тележек грузового вагона. Для проверки качества конечно-элементной модели определены напряжения в ней при действии сил, соответствующих статическим испытаниям. Для согласования напряжений, полученных при теоретических исследованиях и статических испытаниях, определены соответствующие коэффициенты. Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований напряжений в конструкции боковой рамы для ее опасных сечений. **Результаты.** Нормативная документация на проведение экспериментальных исследований прочности боковых рам не учитывает в полной мере загрузки, действующие на раму во время ее эксплуатации, и предусмотренную теоретическим путем прочность боковой рамы. Оценка прочности боковой рамы по результатам только натурных испытаний не дает полной картины распределения полей напряжений, так как предусмотренные места установки датчиков не охватывают большинства элементов конструкции с возможной концентрацией напряжений. **Научная новизна.** Автором проведено сравнение нагрузок, прикладываемых к боковой раме при теоретических и экспериментальных исследованиях, с нагрузками, действующими в эксплуатации. Дана оценка влияния применения наклонных поверхностей в буксовом проеме. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют более точно оценивать прочность боковой рамы трехэлементной тележки, а также возможность выбрать более предпочтительный способ опирания боковой рамы в буксовом узле.

**Ключевые слова:** боковая рама; трехэлементная тележка; прочность; испытания; расчет; опирание

## REFERENCES

1. Bogatov, A. A., & Ilinykh, R. A. (2010). O povyshenii sluzhebnykh kharakteristik bokovoy ramy telezhki gruzovogo vagona. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 6, 42-44.
2. Boronenko, Y. P., & Orlova, A. M. (2004). Generalisation of learned lessons in design of freight cars trucks for the creation of their standard series. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 5, 25-29.
3. Vagony gruzovyye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam, GOST 33211-2014 (2015).
4. Blokhin, Y. P., Alpysbaev, K. T., Granovskiy, R. B., Dzichkovskiy, Y. M., Krivchikov, A. Y., & Fedorov, Y. F. (2012). Dinamicheskiye kachestva gruzovykh vagonov, imeyushchikh telezhki s diagonalnymi svyazami. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 5(1), 12-16.
5. Zakharov, S. M., & Shenfeld, K. P. (2013). Global development of heavy-haul railway traffic. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 4, 9-18.
6. Myamlin, S. V., & Matsiuk, A. S. (2009). The prediction of the two-axles development of freight car truck. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 27, 24-29.
7. GosNIIV, & VNIIZhT. (1992). Nadressornyye balki i bokovyye ramy litykh dvukhosnykh telezhok gruzovykh vagonov kolei 1520 mm. Metodika staticheskikh ispytaniy na prochnost. Moscow: GosNIIV, VNIIZhT.
8. GosNIIV, & VNIIZhT (2002). Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznnykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh), Moscow: GosNIIV, VNIIZhT.
9. Shevchenko, D. V., Kuklin, T. S., Orlova, A. M., Savushkin, R. A., Dmitriev, S. V., & Belyankin, A. V. (2016). Defining the parameters of the spatial loading carts cast parts 18-9855 during the bench tests. *Tekhnika zheleznnykh dorog*, 1(33), 68-74.
10. Telezhki dvukhosnyye gruzovykh vagonov kolei 1520 mm. Detali lityye. Rama bokovaya i balka nadressornaya. Tekhnicheskkiye usloviya, OST 32.183-2001 (2001).
11. Reydemeyster, O. H., & Shykunov, O. A. (2015). Strength increase methods of the side frame of the bogie in three-piece trucks. *Science and Transport Progress*, 5(59), 141-149. doi: 10.15802/stp2015/55351
12. Ushkalov, V. F., Lashko, A. D., & Mokriy, T. F. (2013). Upgrading Freight Car Bogies as Possible Option of Freight Rolling Stock Running Gear Renovation. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 5, 8-15.
13. Kharybin, I. A., Orlova, A. M., & Dodonov, A. V. (2009). Sovershenstvovat khodovuyu chast gruzovykh vagonov. *Vagony i vagonnoye khozyaystvo*, 1(17), 26-29.

## РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

14. Bubnov, V., Myamlin, S., & Mankevych, N. (2013). Theoretical and experimental investigations of strength properties of cast parts for freight cars bogie with axle load of 245 kn. *Thesis of the 8<sup>th</sup> International Conference TRANSBALICA 2013, May 09-10, 2013, Vilnius*, 9–13.
15. Kure, G. (2010). The evolution of railway axlebox technology. *Evolution*. Retrieved from <http://evolution.skf.com/the-evolution-of-railway-axlebox-technology/>
16. Kure, G. (2011). The evolution of railway axlebox technology – Part two: Present and future. *Evolution*. Retrieved from <http://evolution.skf.com/the-evolution-of-railway-axlebox-technology-%E2%80%93-part-two-present-and-future/>
17. Myamlin, S. V., Ten, O. O., & Neduzha, L. O. (2014). Experimental research of dynamic qualities of freight cars with bogies of different designs. *Science and Transport Progress*, 3(51), 136-145. doi: 10.15802/stp2014/25921
18. Rizvi, D. R., & Bharti, P. K. (2015). Optimisation of Bogie Springs for Higher Axle Load Wagons. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(05), 56-60. doi: 10.17577/ijertv4is050162.

*Prof. I. E. Martynov, D. Sc. (Tech.), (Ukraine); Prof. S. V. Myamlin, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published*

Accessed: Oct. 12, 2016

Received: Jan. 04, 2017

## ЗМІСТ

### **АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ**

**О. О. ГОЛОЛОБОВА, В. І. ГАВРИЛЮК**

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є І ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ  
ДЛЯ ДЕШИФРАЦІЇ КОДУ АЛСН ..... 7

### **ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ**

**М. М. БІЛЯЄВ, М. О. ОЛАДПО**

РОЗРАХУНОК ДИНАМІКИ ЗАБРУДНЕННЯ ПРИМАГІСТРАЛЬНОЇ  
ТЕРИТОРІЇ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГІЛЛЯ ..... 18

### **ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ**

**В. В. ЖЕЛЕЗНЯК**

ЕКОНОМІКО-ПРАВОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІНВЕСТИЦІЙ У РОЗВИТОК  
ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ..... 27

**Р. ПІТТМАН**

РЕФОРМУВАННЯ ТА РЕСТРУКТУРИЗАЦІЯ УКРЗАЛІЗНИЦІ:  
КЛЮЧОВЕ ЗАВДАННЯ ДЛЯ УКРАЇНСЬКИХ РЕФОРМАТОРІВ ..... 34

**О. М. ПІШІНЬКО, В. О. ГАБРИНЕЦЬ, В. Г. КУЗНЄЦОВ**

ЗАСТОСУВАННЯ РЕГІОНАЛЬНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ БІОРЕСУРСІВ  
ДЛЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ..... 51

**І. В. ТРІФОНОВ, І. А. КОРХІНА**

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ПРОЕКТНОМУ МЕНЕДЖМЕНТІ ..... 63

### **ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

**О. М. ГОРОБЧЕНКО, А. О. АНТОНОВИЧ**

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРА НАПРУЖЕНОСТІ ДІЯЛЬНОСТІ МАШИНІСТА  
ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВІ ЕРГОНОМІЧНОЇ МОДЕЛІ ..... 70

**Л. А. МУРАДЯН, Д. О. ПОДОСЬОНОВ**

ПІДВИЩЕННЯ МІЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСУ ВІЗКІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ.  
МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРІЇ ЗНОСУ ПІДП'ЯТНИКА ..... 79

**О. В. ПОНОМАРЕНКО**

ПЕРСПЕКТИВИ ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАГОННОГО  
ПАРКУ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ УКРАЇНИ ..... 88

### **ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ**

**Г. К. ГЕТЬМАН, С. Л. МАРІКУЦА**

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ..... 96

**А. Е. ДРУБЕЦКИЙ**

АПРОКСИМАЦІЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ МАГНІТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ..... 106

### **ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ**

**М. Б. КУРГАН, Д. М. КУРГАН**

ПРОГНОЗУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ  
ВИСОКОШВИДКІСНОГО РУХУ ПОЇЗДІВ ..... 117

### **ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**В. І. ШИНКАРЕНКО, О. С. КУРОП'ЯТНИК**

ПРОБЛЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ПЛАГІАТУ ТА АНАЛІЗ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО  
ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ЇХ ВИРІШЕННЯ ..... 131

## **НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ**

**В. М. БОГОМАЗ, М. В. БОРЕНКО, І. В. НЕЧАЙ, О. П. СЕВЕРИН**

ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ПРИВОДУ  
СТРІЧКОВОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО-ПОХИЛОГО КОНВЕЄРА  
ВІД ЙОГО ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ .....

143

**В. В. СУГЛОБОВ, К. В. ТКАЧУК**

ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНИХ  
СТРІЛОВИХ СИСТЕМ ПОРТАЛЬНИХ КРАНІВ .....

156

## **РУХОМИЙ СКЛАД**

**А. О. ЛОВСЬКА**

УДОСКОНАЛЕННЯ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ .....

167

**О. А. ШИКУНОВ**

МІЦНІСТЬ БІЧНОЇ РАМИ ТРЬОХЕЛЕМЕНТНОГО ВІЗКА .....

183



## СОДЕРЖАНИЕ

### **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

**О. А. ГОЛОЛОБОВА, В. И. ГАВРИЛЮК**

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ И ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ДЛЯ ДЕШИФРАЦИИ КОДА АЛСН ..... 7

### **ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

**Н. Н. БЕЛЯЕВ, М. О. ОЛАДИПО**

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИМАГИСТРАЛЬНОЙ  
ТЕРРИТОРИИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ УГЛЯ ..... 18

### **ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**В. В. ЖЕЛЕЗНЯК**

ЭКОНОМИКО-ПРАВОВОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИНВЕСТИЦИЙ  
В РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ..... 27

**Р. ПИТТМАН**

РЕФОРМИРОВАНИЕ И РЕСТРУКТУРИЗАЦИЯ УКРАИНЫ: КЛЮЧЕВОЕ  
ЗАДАНИЕ ДЛЯ УКРАИНСКИХ РЕФОРМАТОРОВ ..... 34

**А. Н. ПШИНЬКО, В. А. ГАБРИНЕЦ, В. Г. КУЗНЕЦОВ**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ БИОРЕСУРСОВ  
ДЛЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ..... 51

**И. В. ТРИФОНОВ, И. А. КОРХИНА**

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
В ПРОЕКТНОМ МЕНЕДЖМЕНТЕ ..... 63

### **ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА**

**А. Н. ГОРОБЧЕНКО, А. О. АНТОНОВИЧ**

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРА НАПРЯЖЕННОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТА  
ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВЕ ЭРГОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ..... 70

**Л. А. МУРАДЯН, Д. А. ПОДОСЕЛОВ**

ПОВЫШЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСА ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ  
ВАГОНОВ. МОДЕЛЬ ГЕОМЕТРИИ ИЗНОСА ПОДПЯТНИКА ..... 79

**Е. В. ПОНОМАРЕНКО**

ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВАГОННОГО  
ПАРКА НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ ..... 88

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

**Г. К. ГЕТЬМАН, С. Л. МАРИКУЦА**

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОВОЗОВ ..... 96

**А. Е. ДРУБЕЦКИЙ**

АППРОКСИМАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ..... 106

### **ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ**

**Н. Б. КУРГАН, Д. Н. КУРГАН**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ПРИ ВНЕДРЕНИИ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ..... 117

### **ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**В. И. ШИНКАРЕНКО, Е. С. КУРОПЯТНИК**

ПРОБЛЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЛАГИАТА И АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИХ РЕШЕНИЯ ..... 131

## **НЕТРАДИЦИОННЫЕ ВИДЫ ТРАНСПОРТА. МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ**

**В. Н. БОГОМАЗ, Н. В. БОРЕНКО, И. В. НЕЧАЙ, А. П. СЕВЕРИН**

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО  
ГОРИЗОНТАЛЬНО-НАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА ОТ ЕГО ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ..... 143

**В. В. СУГЛОБОВ, Е. В. ТКАЧУК**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННЫХ  
СТРЕЛОВЫХ СИСТЕМ ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ..... 156

## **ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И ТЯГА ПОЕЗДОВ**

**А. А. ЛОВСКАЯ**

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК ..... 167

**О. А. ШИКУНОВ**

ПРОЧНОСТЬ БОКОВОЙ РАМЫ ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ ТЕЛЕЖКИ..... 183

# CONTENTS

## ***TRANSPORT AUTOMATED CONTROL SYSTEMS***

**O. O. HOLOBOVA, V. I. HAVRYLIUK**

APPLICATION OF FOURIER TRANSFORM AND WAVELET DECOMPOSITION FOR  
DECODING THE CONTINUOUS AUTOMATIC LOCOMOTIVE SIGNALING CODE.....7

## ***TRANSPORT ECOLOGY***

**M. M. BILIAIEV, M. O. OLADIPO**

CALCULATION OF POLLUTION DYNAMICS NEAR RAILWAY TERRITORY  
DURING COAL TRANSPORTATION .....18

## ***ECONOMICS AND MANAGEMENT***

**V. V. ZHELEZNIAK**

ECONOMIC AND LEGAL GROUNDS FOR INVESTMENT  
IN DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE .....27

**R. PITTMAN**

REFORMING AND RESTRUCTURING UKRAINE: A CRUCIAL  
TASK FOR UKRAINIAN REFORMERS.....34

**O. M. PSHINKO, V. O. GABRINET, V. H. KUZNETSOV**

USING REGIONAL RENEWABLE ENERGY RESOURCES  
FOR HEATING SUPPLY SYSTEMS .....51

**I. V. TRIFONOV, I. A. KORKHINA**

ANALYSIS ON THE USAGE OF DECISION-MAKING METHODS IN PROJECT MANAGEMENT .....63

## ***OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS***

**O. M. HOROBCHENKO, A. O. ANTONOVYCH**

FORMALIZATION OF LOCOMOTIVE DRIVER ACTIVITY TENSION  
INDICATOR BASED ON THE ERGONOMIC MODEL.....70

**L. A. MURADIAN, D. O. PODOSONOV**

IMPROVING TBO OF FREIGHT CAR BOGIES. GEOMETRY MODEL OF CENTER PAD WEAR .....79

**O. V. PONOMARENKO**

THE PROSPECTS FOR IMPROVING THE TECHNICAL STATE  
OF ROLLING STOCK ON THE RAILWAYS OF UKRAINE .....88

## ***ELECTRIC TRANSPORT***

**H. K. HETMAN, S. L. MARIKUTSA**

SELECTION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE NOMINAL  
MODE OF ELECTRIC LOCOMOTIVES.....96

**A. YU. DRUBETSKYI**

APPROXIMATION OF UNIVERSAL MAGNETIC CHARACTERISTIC  
FOR MODELLING ELECTRIC TRACTION MACHINES .....106

## ***RAILWAY TRACK***

**M. B. KURHAN, D. M. KURHAN**

FORECASTING OF PASSENGER TRAFFIC UPON IMPLEMENTATION  
OF HIGH-SPEED RUNNING .....117

## ***INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING***

**V. I. SHYNKARENKO, O. S. KUROIATNYK**

PLAGIARISM DETECTION PROBLEMS AND ANALYSIS SOFTWARE TOOLS FOR ITS SOLVE .....131

## ***NON-TRADITIONAL TRANSPORT MODES. MACHINES AND MECHANISMS***

**V. M. BOHOMAZ, M. V. BORENKO, I. V. NECHAY, O. P. SEVERYN**

QUALITATIVE ANALYSIS OF DEPENDENCE OF DRIVE POWER HORIZONTAL-INCLINED

BELT CONVEYOR ON ITS INITIAL PARAMETERS..... 143

**V. V. SUGLOBOV, K. V. TKACHUK**

DETERMINATION OF DESIGN PARAMETERS OF ARTICULATED

JIB SYSTEMS OF PORTAL CRANE..... 156

## ***ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION***

**A. O. LOVSKA**

IMPROVEMENT OF THE SUPPORTING STRUCTURE OF PLATFORM CAR

FOR HIGHER EFFICIENCY OF CONTAINER TRANSPORTATIONS..... 167

**O. A. SHYKUNOV**

THREE-ELEMENT BOGIE SIDE FRAME STRENGTH..... 183

## 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 або більш ранній версії – файли \*.doc (файли \*.docx, \*.docm не приймаються). Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

### **Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:**

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

### **Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:**

- 1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;
- 2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;
- 3) 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 двома мовами – українською 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/>

## ОГОЛОШЕННЯ

**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

Наукове видання

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

№ 1 (67) 2017

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – А. І. Миргородська

Комп'ютерне верстання – Л. А. Кобулія

Літературна обробка – О. М. Врублевська

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ум. друк. арк. 23,48. 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

*Адреса дільниці оперативної поліграфії:*

вул. Лазаряна, 2, кім. 1201, м. Дніпро, 49010, Україна

*Тел.:* +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Научное издание

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

**(НАУКА И ПРОГРЕСС ТРАНСПОРТА. ВЕСТНИК ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА)**

№ 1 (67) 2017

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – А. И. Миргородская

Компьютерная верстка – Л. А. Кобулия

Литературная обработка – О. М. Врублевская

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Ус. печат. лист. 23,48. Тираж 300 экз. Зак. №

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна**

*Адрес редакции, издателя:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днепро, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 371-51-05

*E-mail:* lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

*Адрес участка оперативной полиграфии:*

ул. Лазаряна, 2, ком. 1201, г. Днепро, 49010, Украина

*Тел.:* +38 (056) 47-19-66, факс: +38 (056) 47-19-83



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU. VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO  
UNİVERSİTETU ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

**(SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS. BULLETIN OF DNIPROPETROVSK NATIONAL  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN)**

No. 1 (67) 2017

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – А. І. Myrhorodska

Desktop publishing – Л. А. Kobuliya

Redaction – О. М. Vrublevska

Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Conventional printed sheet 23,48. 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

*Address of small offset printing office*

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipro, 49010, Ukraine

*Tel.:* +38 (056) 47-19-66, *Fax:* +38 (056) 47-19-83





СУЧАСНІ ЗАКЛАДИ ОСВІТИ - 2017  
ВОСЬМЕ МІЖНАРОДНЄ ВІСТАНКЄ

# CERTIFICATE

якості наукових публікацій  
УДОСТОЄНИЙ

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Міністерство освіти і науки України

Міністр

Д. Гриневич



Національна академія  
педагогічних наук України

Президент

В. Кремень



Асоціація користувачів  
Української науково-освітньої  
телекомунікаційної мережі «Уран»

Голова Ради

Ю. Якименко





9 772307 348000



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

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2017. 1(67). 1-201