



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



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№3(93)

.. 2021 ..

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 3 (93) 2021

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

Автоматизовані та телематичні системи на транспорті
Екологія та промислова безпека
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси
Залізнична колія та автомобільні дороги
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Машинобудування
Рухомий склад і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2021

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

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пішінко О. М., доктор технічних наук
Пічуров С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., ДНУЗТ (Україна); Богдєвичус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головкова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський держаний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнецов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Мацюк В. І., Державний університет інфраструктури та технологій (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., ДНУЗТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., ДНУЗТ (Україна); Шинкаренко В. І., ДНУЗТ (Україна).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р. Видання внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (технічні науки). Журнал зареєстровано в міжнародних наукових системах: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова та ін. Друкується за рішенням вченої ради університету від 17.06.2021 р., протокол № 12

Видавець Дніпровський 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: kolesnykova@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»

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

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACÌONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 3 (93) 2021

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

Automated and Telematic Systems on Transport
Ecology and Industrial Safety
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport, Power Systems and Complexes
Railroad and Roadway Network
Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling
Material Science
Mechanical Engineering
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro

2021

Founder:

DNIPRO 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
Pichugov S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

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

Journal was registered by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine.
Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012
Edition is included in category B «List of scientific specialized publications of Ukraine» by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine no. 409 from 17.03.2020 (technical sciences).
Journal is registered in the International Catalogue of periodicals: Ulrichsweb™ Global Serials Directory, Crossref, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), OCLC WorldCat, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, Україніка наукова, etc.
Published according to the Academic Council decision of the University from 17.06.2021, Protocol no. 12

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

Address of Founder Lazaryana St., 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: kolesnykova@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»

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

UDC 629.46.027.1

V. V. BURCHENKOV^{1*}

^{1*}Dep. «Cars», Belarusian State University of Transport, Kirova St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653,
tel. +37(529) 53 03 784, e-mail lenadva@tut.by, ORCID 0000-0002-3664-4655

Influence Assessment of the Information Concerning the Bearing Type of Axle Box of Cars on the Automatic Classification Accuracy of Heated Boxes

Purpose. The main purpose of the work is to determine and classify the heated cars' boxes based on the probability of appearance of roller and cassette type boxes in the classes of heated and overheated boxes, as well as the laws of probability density distribution of the recognition signs of normally heated and overheated roller and cassette type boxes. **Methodology.** The operation features of freight cars with cassette type axle boxes with increased operating heating have been investigated. The methodology of assessing the probability of recognition errors was proposed, which takes into account the fact that sets of normally heated and overheated boxes consist of subsets of boxes with different types of bearings. A system of equations is obtained, the roots of which represent epy values that minimize the recognition probability of the errors of the heated boxes. **Findings.** It was found out that with some methods of determining the bearing type, for example, by the average value of the ranges of thermal image for each car, the probability of erroneous selection may depend on the probability density distribution of the sign for bearings of different types and the threshold value of this sign. The optimal thresholds for detecting the overheated roller boxes in comparison with the optimal thresholds for detecting overheated cassette boxes were determined. It has been established that the pass of an overheated cassette bearing, provided that the type of bearing is determined correctly, is less likely to lead to an accident than if the cassette box is classified as a roller box. The rejection criteria of axle boxes according to their heating temperature difference on one of the wheel set axis for three variants of settings of the alarm system according to an arrangement of multipurpose complexes of technical means (CTM) were formulated. The practical implementation of this method of adjusting the CTM settings for the Minsk branch of the Belarusian Railways was demonstrated. **Originality.** A system of equations is obtained, which allows finding the optimal values of temperature thresholds for the detection of overheated roller and cassette boxes under the assumption that the error probabilities in the selection of boxes by their types are known and constant. **Practical value.** The developed method of adjusting the alarm settings of CTM makes it possible to significantly reduce unjustified train delays and the number of car uncouplings.

Keywords: freight cars; cassette and roller boxes; overheating of boxes; heating boxes classification; threshold temperature criteria

Introduction

When the new generation of cars with cassette boxes and conical bearings was put into operation, unreasonable delays of trains with loaded and empty cars occurred, with increased operating heating of bodies and axle box covers.

The operation peculiarity of cassette boxes with conical bearings is determined by their design and

is associated with relatively higher (approximately 1.5–2 times) normal operating temperatures of bearing heating, compared to the heating temperatures of serial axle boxes with standard cylindrical bearings [1, 3].

Increased heating of such bearings is manifested at low external air temperatures ($T_{e.a.}$) from November to March, when the average value of the levels of thermal signals, expressed in quanta, and the relative temperatures of the axle box bodies in-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

crease in 1.5–1, 7 times in comparison with summer values [1]. The annual graph of the average value of the thermal signals and temperature levels is shown in Fig. 1.

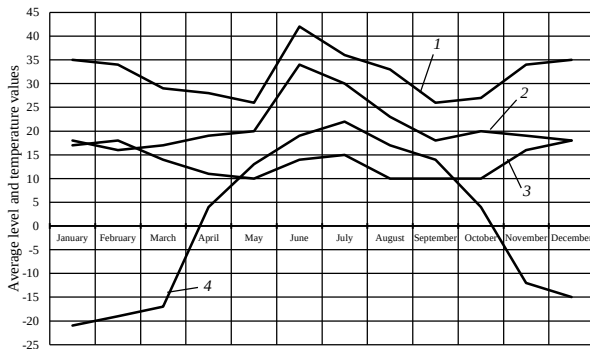


Fig. 1. Annual graph of the average values of the thermal signals and temperature levels:
1 – average level values; 2 – maximal level values;
3 – maximal values of temperature difference;
4 – external air temperature

The criterion of the overheated boxes was formed, taking into account the ratio of the heating level of the controlled box to the average value of the temperature levels of the remaining boxes on one side of the car. This was the thing that resulted in unreasonable delays of trains with operating heating of conical bearings.

Until now, the informativity of automatic control equipment for boxes according various recognition signs of heated boxes has been investigated as a whole without taking into account the type of bearing of the controlled axle boxes. The experience of operating the equipment for detecting overheated boxes shows that this leads to additional losses in the information capacity of the equipment, which are expressed in an increase in the probability of errors in recognizing heating boxes and, as a result, in unreasonable train stops (due to false readings of the equipment) and passing emergency heating axle boxes. This is because the permissible heating of cassette boxes with conical bearings is 1.5–1.8 times higher than the permissible heating of the roller boxes, and when setting the equipment for detecting overheated roller boxes, some of the functional cassette boxes with increased heating can be attributed to the class of the overheated boxes during automatic recognition.

Purpose

Taking into account the constantly growing number of cars with cassette boxes, as well as the emergence of automatic recognition (selection) devices of the boxes by bearing type [2, 17, 18], the author envisages assessing the influence of these devices on the probability of making an erroneous decision about the technical condition of the axle box, as well as on the choice of the threshold temperature value of the classification signs.

Methodology

According to the temperature criterion of the box bodies, their classification as normally heated (N) and overheated (O) axle boxes is possible. If the a priori probability of the appearance of a normally heated box (N class) is denoted $P(N)$, the probability of an overheated box (O class) is $P(O)$, the probability of correct classification of normally heated boxes as normally heated class $P(N/N)$ and the overheated boxes as overheated class $P(O/O)$, then the probability of correct box classification will be as follows:

$$P_{\text{CBC}} = P(N)P(N/N) + P(O)P(O/O). \quad (1)$$

However, in the practice of the box temperature control, the informativeness of a sign is usually characterized by the error probability in the box classification. If one assumes that the probabilities of correct and incorrect classification of normally heated (overheated) boxes to the class of normally heated (overheated) ones form a complete set of events, then the error probability in automatic recognition of heating boxes will be:

$$P_{\text{er}} = P(N)[1 - P(N/N)] + P(O)[1 - P(O/O)]. \quad (2)$$

The probability $[1 - P(N/N)]$ is usually called the «false alarm» probability P_{FA} , i.e. the probability of erroneous classification of a normally heated box as the overheated class, and the probability $[1 - P(O/O)]$ – the probability of passing an overheated box P_{pas} , or the probability of erroneous classification of an overheated box as a class of normally heated boxes [8]. In this case

$$P_{\text{er}} = P(N)P_{\text{FA}} + P(O)P_{\text{pas}}. \quad (3)$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

According to this criterion, if the separable function has a threshold value of X_{i0} , then the probability of making an erroneous decision when recognizing the heated boxes on the basis of X_i sign is determined by the expression (3). But this expression does not take into account the varieties of types of controlled boxes, and taking them into account, each of the designated classes is divided into two subsets: roller and cassette boxes.

The continuous law of the probability density distribution of the sign of normally heated boxes in this case will take the form [12]:

$$W_{11}(X_i) = P(N_r)W_{11r}(X_i) + P(N_c)W_{11c}(X_i), \quad (4)$$

where $\left. \begin{matrix} P(N_r), \\ P(N_c) \end{matrix} \right\}$ – the appearance probabilities of the roller and cassette boxes in the class of normally heated boxes; $\left. \begin{matrix} W_{11r}(X_i), \\ W_{11c}(X_i) \end{matrix} \right\}$ – the probability den-

$$P_{er}(X_i) = P(N) \left[P(N_r) \int_{X_{i0}}^{\infty} W_{11p}(X_i) dX_i + P(N_c) \int_{X_{i0}}^{\infty} W_{11c}(X_i) dX_i \right] + P(O) \left[P(O_c) \int_{-\infty}^{X_{i0}} W_{12c}(X_i) dX_i + P(O_r) \int_{-\infty}^{X_{i0}} W_{12r}(X_i) dX_i \right]. \quad (6)$$

By taking a derivative of the resulting expression and equating it to zero, we have an equation:

$$P(N) [P(N_r)W_{11r}(X_i) + P(N_c)W_{11c}(X_i)] - P(O) [P(O_c)W_{12c}(X_i) + P(O_r)W_{12r}(X_i)] = 0, \quad (7)$$

the root of which is the threshold value of X_{i0} sign, which minimizes the error probability, provided that the bearing type of the axle box is not recognized [13].

Let us consider how their selection by bearing type will affect the recognition error of the overheated boxes. Let us suppose that there is a device determining the axle box bearing type [4, 5, 17]. In general, such recognition can occur with some error, and the error may depend on the axle box state, for example, in the case of recognition of the box type by its thermal signals.

Let us designate: P_{ncr} is the probability that a normally heated roller box is classified as a cassette box; P_{nrc} – the probability that a normally

sity distribution laws of the recognition sign (X_i) of normally heated roller and cassette boxes.

Accordingly, the continuous law of the probability density distribution of the recognition sign of overheated boxes will be as follows:

$$W_{12}(X_i) = P(O_r)W_{12r}(X_i) + P(O_c)W_{12c}(X_i), \quad (5)$$

where $\left. \begin{matrix} P(O_r), \\ P(O_c) \end{matrix} \right\}$ – the appearance probabilities of the roller and cassette boxes in the class of overheated boxes; $\left. \begin{matrix} W_{12r}(X_i), \\ W_{12c}(X_i) \end{matrix} \right\}$ – the probability density

distribution laws of the recognition sign (X_i) of overheated roller and cassette boxes.

Substituting expressions (4) and (5) into formula (3), we obtain the recognition errors probabilities, taking into account the fact that the sets of normally heated and overheated boxes consist of a subset of boxes with different types of bearings:

heated cassette box is classified as a roller one; P_{orc} – the probability that the overheated cassette box is classified as a roller one; P_{ocr} – the probability that the overheated roller box is classified as a cassette one.

Suppose that for each type of boxes, the threshold value of the sign is set: X_{i01} – for roller boxes and X_{i02} – for cassette ones. In this case, the probability of a «false alarm» for roller boxes P_{far} and cassette P_{fac} :

$$P_{far}(X_{i1}, X_{i2}) = P_{ocr} \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{11r}(X_i) dX_i + \int_{X_{i02}}^{\infty} W_{11r}(X_i) dX_i; \quad (8)$$

$$P_{fac}(X_{i1}, X_{i2}) = (1 - P_{nrc}) \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{11c}(X_i) dX_i + \int_{X_{i02}}^{\infty} W_{11c}(X_i) dX_i, \quad (9)$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

and the probability of pass of the overheated roller P_{or} and a cassette box P_{orc} :

$$P_{or}(X_{i1}, X_{i2}) = \int_{-\infty}^{X_{i01}} W_{12r}(X_i) dX_i + P_{or} \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{12r}(X_i) dX_i; \quad (10)$$

$$P_{orc}(X_{i1}, X_{i2}) = \int_{-\infty}^{X_{i01}} W_{12c}(X_i) dX_i + (1 - P_{orc}) \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{12c}(X_i) dX_i. \quad (11)$$

Let us find the general probability of erroneous decision:

$$P_{er}(X_{i1}, X_{i2}) = P_r P(H_r) P_{far}(X_{i1}, X_{i2}) + P_c P(H_c) P_{fac}(X_{i1}, X_{i2}) + P_c P(\Pi_c) P_{orc}(X_{i1}, X_{i2}) + P_r P(\Pi_r) P_{ocr}(X_{i1}, X_{i2}). \quad (12)$$

Substituting (8) and (11) into (12) and taking from the resulting expression the partial derivatives X_{i1} , X_{i2} , we obtain a system of equations, the roots of which represent the values X_{i01} and X_{i02} , minimizing the probability of error in recognition of the heating boxes:

$$\left. \begin{aligned} &P_r P(N_r) P_{ncr} W_{11r}(X_{i01}) + P_c P(H_c) (1 - P_{orc}) W_{11c}(X_{i01}) - \\ &- P_c P(O_c) (1 - P_{orc}) W_{12c}(X_{i01}) - P_r P(\Pi_r) P_{ocr} W_{12r}(X_{i01}); \\ &P_r P(N_r) (1 - P_{ncr}) W_{11r}(X_{i02}) + P_c P(H_c) P_{orc} W_{11c}(X_{i02}) - \\ &- P_c P(O_c) P_{orc} W_{12c}(X_{i02}) - P_r P(O_r) (1 - P_{ocr}) W_{12r}(X_{i02}) = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

The resulting equations system makes it possible to find the optimal thresholds for detecting overheated roller X_{i01} and cassette boxes X_{i02} under the assumption that the error probabilities in the selection of boxes by their types are known and constant.

However, with some methods for determining the type of bearing, for example, by the average value of thermal signal ranges for each car, the probability of erroneous selection may depend on the probability density distribution of a sign for bearings of different types and the threshold value of this sign X_{j03} .

In this case, the error probabilities in the selection of boxes by their types are as follows:

$$\left. \begin{aligned} P_{ncr} &= \int_{X_{j03}}^{\infty} W_{nr}(X_j) dX_j; \quad P_{nrc} = \int_{-\infty}^{X_{j03}} W_{nc}(X_j) dX_j; \\ P_{orc} &= \int_{-\infty}^{X_{j03}} W_{oc}(X_j) dX_j; \quad P_{ocr} = \int_{X_{j03}}^{\infty} W_{or}(X_j) dX_j, \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

where $\left. \begin{aligned} &W_{nr}(X_j), \\ &W_{or}(X_j) \end{aligned} \right\}$ – are the probability density distributions of the selection sign of the bearing type

for normally heated and overheated roller boxes,

respectively; $\left. \begin{aligned} &W_{nc}(X_j), \\ &W_{oc}(X_j) \end{aligned} \right\}$ – are the probability den-

sity distributions of the selection sign of the bearing type for normally heated and overheated cassette boxes, respectively.

Moreover, the criterion according to which it is assumed that the losses do not depend on the error type, in some cases cannot be considered satisfactory.

Findings

The pass of the overheated cassette box, provided that the bearing type is determined correctly, is less likely to result in an accident than if the cassette box is classified as the roller one [14]. The losses caused by the errors of each type can be repelled by the weight coefficients (K_1 – K_8). Without dwelling on the method of determining the weight coefficients and repeating the substitution sequence, taking into account equations (8) – (14), we obtain the expression of the total recognition error, provided that the selection of the bearing type is performed by the probabilistic method according to the X_j sign:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$\begin{aligned}
P_{er}(X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}) = & P_r P(N_r) \left[K_1 \int_{X_{j03}}^{\infty} W_{nr}(X_j) dX_j \times \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{11r}(X_i) dX_i + K_2 \int_{X_{i02}}^{\infty} W_{11r}(X_i) dX_i \right] + \\
& + P_c P(N_c) \left[K_3 \int_{X_{j03}}^{\infty} W_{nc}(X_j) dX_j \times \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{nc}(X_i) dX_i + K_4 \int_{X_{i02}}^{\infty} W_{11c}(X_i) dX_i \right] + \\
& + P_c P(O_c) \left\{ K_5 \int_{\infty}^{X_{i03}} W_{12c}(X_i) dX_i + K_6 \left[1 - \int_{X_{j03}}^{\infty} W_{oc}(X_j) dX_j \right] \times \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{12c}(X_i) dX_i \right\} + \\
& + P_r P(O_r) \left\{ K_7 \int_{\infty}^{X_{i01}} W_{12r}(X_i) dX_i + K_8 \left[1 - \int_{X_{j03}}^{\infty} W_{or}(X_j) dX_j \right] \times \int_{X_{i01}}^{X_{i02}} W_{12r}(X_i) dX_i \right\}. \quad (15)
\end{aligned}$$

Thus, we obtained an equation that makes it possible to find the optimal threshold values of sing simultaneously when detecting the overheated boxes and their selection by the bearing type.

Fig. 2 shows the dynamics of the optimal detection threshold for the overheated boxes calculated by formula (15) with an increase in the number of cassette boxes in trains and the absence of their recognition by type (curve 1). One can see how, with the increase in the probability of appearance of the cassette box, the optimal recognition threshold shifts from the optimal detection threshold of the overheated roller boxes (curve 2) to the optimal detection threshold of the overheated cassette boxes (curve 3), which do not depend on the change in the ratio of cassette and roller boxes in trains. Let us trace how the probability of the total recognition error of the heated axle boxes changes in this case.

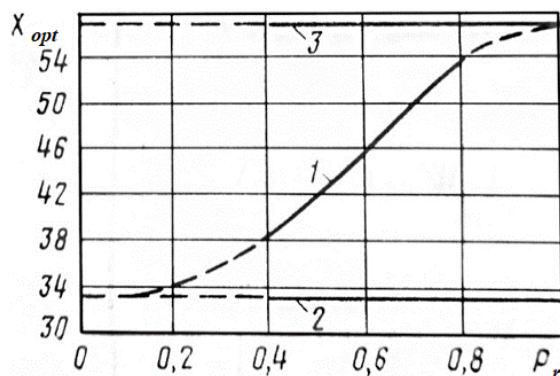


Fig. 2. Influence of the appearance probability of a cassette box on the detection threshold of the overheated boxes in the absence of information about the bearing type (1), the optimal detection threshold of the roller (2) and cassette boxes (3)

Fig. 3 shows the dependence curves $P_{er} = f(P_r)$ calculated by formula (15). The calculations are performed for three cases: box selection by the types of bearings is not carried out (curve 1); box selection is carried out faultlessly (curve 2); box selection is carried out with some error (curve 3).

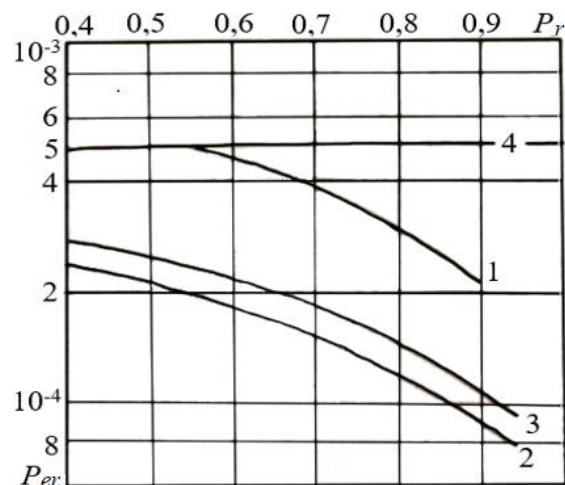


Fig. 3. Dependence of the error probability when detecting overheated boxes on the appearance probability of a roller box

In the latter case, the average temperature of the axle box bodies of one car was a sign for determining the bearing type [4]. The probability density distributions of this sign for boxes of various types are subject to logarithmic-normal laws with the parameters:

$$\begin{aligned}
a_{rn} = 0.77; \quad a_{cn} = 3.2; \quad a_{ro} = 1.51; \quad a_{co} = 3.3; \\
\sigma_{rn} = 1.02; \quad \sigma_{cn} = 0.53; \quad \sigma_{ro} = 0.99; \quad \sigma_{co} = 0.51.
\end{aligned}$$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

The weight coefficients K_1 – K_8 in the calculations are taken to be equal to one, i.e. it is assumed that the recognition is carried out in two classes.

The analysis of the curves shows that although with an increase in the percentage of cassette boxes in the rolling stock, the error in detecting the overheated boxes decreases, nevertheless, the introduction of error-free selection of boxes by type makes it possible to further reduce the probability of making an erroneous decision by an average of 2.2 times. Determining the type of bearing by the parameters of thermal pulses increases the probability of error in recognizing the heated boxes in comparison with their error-free selection by 10–15% [15, 16]. Changing the ratio of the weight coefficients, it is possible to significantly (more than an order of magnitude) reduce this error component with a certain (5–10%) increase in the total error in detecting the overheated boxes [7]. The last assumption is illustrated by the family of curves in Fig. 4. The coefficient K_6 in expression (15) was changed within one order.

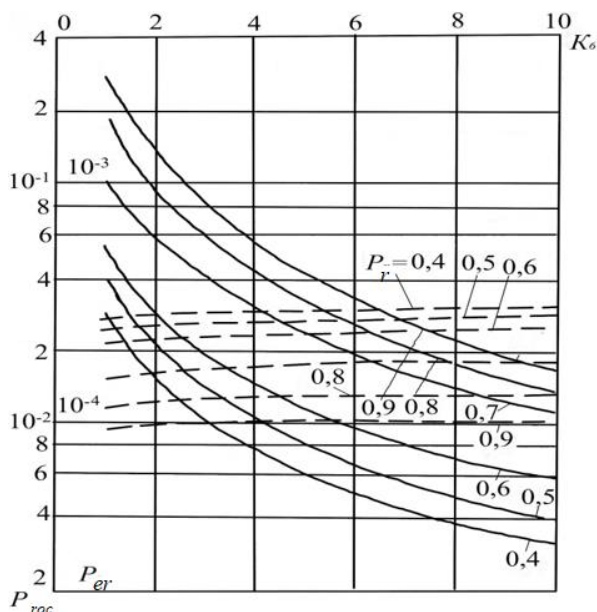


Fig. 4. Influence of the K_6 weight coefficient on the recognition error probability in the boxes by types (contour lines) and the detection of the overheated boxes (dashed)

Thus, the research results allow concluding that during automatic detection of the overheated boxes it is advisable to select them by the bearing type, since the accounting of information on the box type reduces the error probability when detecting

the overheated boxes almost by 2 times. At the same time, one should note the low reliability of the existing systems for determining the box type in rolling stock under control. A more adequate assessment of the state of different types of bearings and axle boxes is possible with the combined use of rejection temperatures, in particular, used in the innovative promising complex CTM-03 [2, 6, 18].

In the software version 2.0.9.6 dated 02/18/2020 for the CTM-01D and CTM-02 operated on the Belarusian Railways, automatic correction of alarm thresholds is used [10]. Algorithms for the box rejection according to the new assessment criterion made it possible to abandon the insufficiently reliable method of car classification by the bearing type with an increase in correction of alarm thresholds for operating heating of the conical bearings in the cassette type axle boxes. Due to this solution complex, correction algorithms of alarm thresholds were excluded in the 2.0.9.6 software version.

Automatic correction of the settings dependence on the external air temperature and the location of the peripheral control devices significantly reduces the number of indications for the operating heating of the cassette boxes in winter and the risk of untimely detection of faulty boxes at high external air temperatures. With the degree software version CTM-02, the temperature difference between the lower sectors of the box bodies on one axle of the wheelset practically does not depend on the external air temperature and is not affected by the solar radiation [1, 14].

The new rejection criterion of axle boxes by the difference in their heating temperature on one axle of the wheelset is less susceptible to the influence of low temperatures of the external air, but its numerical value in CTM-01D increases in summer due to the influence of solar radiation. The difference between the temperature of the most heated box and the average temperature of the rest of the boxes on the controlled car side is a more advanced analogue of the «Alarm 0 {O}» criterion.

At low external air temperatures, when the levels of the thermal signals and the relative temperature of the box bodies increase in comparison with summer readings, the control of the CTM-01D equipment deteriorates. This is also influenced by the increase in the fleet of cars with cassette boxes.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Therefore, new rejection criteria of axle boxes based on the difference in their heating levels on one axle of the wheelset in CTM-01D, similar to the CTM-02 algorithms, made it possible to significantly reduce unreasonable train delays.

The software provides several options for alarm settings in accordance with the considered criteria

and the territorial location of the CTM. Practical implementation of this methodology for correcting the settings of the CTM equipment for the Minsk Branch of the Belarusian Railways is shown in Fig. 5.

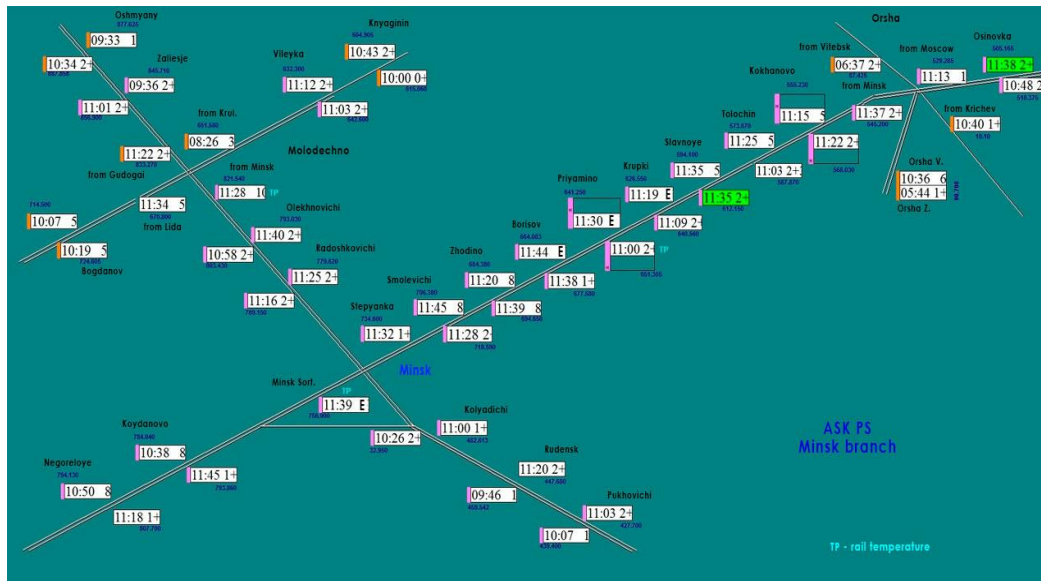


Fig. 5. CTM location on railway lines of the Minsk Branch of the Belarusian Railways

In front of the junctions with check stations CS (Minsk, Molodechno, Orsha), CTM-02 with the «CS» setting are installed. On the approaches to large intermediate stations with a constant watch of car inspectors (Borisov, Negoreloye, Osinovka, Pukhovichi), CTM-02 was installed with «Intermediate, lowered» setting with a decrease in the thresholds by 3°C. Here the car inspectors check the condition of the axle boxes more thoroughly [11]. The rest of the line stations are equipped with the CTM-02 and CTM-01D with «Intermediate, increased» setting with an increase in thresholds by 4°C. The CTM settings in front of the «CS» junctions differ from the «Intermediate» settings only by a lower (by 10°C) threshold «Alarm 0.» In this case, the temperature thresholds «Alarm 1» and «Alarm 2» remain the same.

Practical value

The developed methodology for correction of the alarm settings of the CTM can significantly reduce unreasonable train delays and the number of car uncoupling.

Conclusions

The proposed differentiation of settings ensures non-stop passage of transit trains, and faulty boxes with a relatively high temperature are detected in the conditions of a check station. This correction significantly reduces the number of CTM-01D readings for the operating heating of conical bearings of cassette boxes in winter and the risk of untimely detection of faulty boxes at high temperatures of the external air. As a result of the transfer of the CTM-02 to the degree version, the number of train delays monitored according to the indications at the intermediate stations has decreased. The number of freight cars uncouplings as a result of the axle box overheating decreased. Uncouplings have become more grounded. This indicator was also influenced by the improvement in the quality of inspection and repair of axle boxes in the «CS» and depots.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Бурченко В. В. *Автоматизация технического контроля и диагностики подвижного состава железных дорог* : монография. Гомель : БелГУТ, 2020. 254 с.
2. Гондоров В. А. Новый этап развития аппаратуры КТСМ. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2016. № 1. С. 30–31.
3. Иванова Т. В., Налабордин Д. Г. Оценка предотказных состояний буксового узла грузового вагона. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2017. № 1 (49). С. 46–47.
4. Криворудченко В. Ф., Ахмеджанов Р. А. *Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава*. Москва : Маршрут. 2005. 436 с.
5. Лозинский С. Н., Алексеев А. Г., Карпенко П. Н. Аппаратура автоматического обнаружения перегретых букс в поездах. Москва : Транспорт, 1978. 160 с.
6. Миронов А. А., Митюшев В. С., Салтыков Д. Н. Актуальные проблемы теплового контроля буксовых узлов вагонов. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2018. № 2 (54). С. 24–26.
7. Миронов А. А. Перспективные направления совершенствования средств контроля КТСМ-02 и АСКПС. *Автоматика, связь, информатика*. 2009. № 1. С. 38–41.
8. Панкратов Л. В., Чистяков С. Н. Мониторинг нагрева букс. *Автоматика, телемеханика, связь*. 2008. № 6. С. 19–21.
9. Петухов В. М. Разработка структуры диагностического определения и диагностической модели буксовых узлов современных вагонов. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 5/3 (25). С. 26–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51923>
10. Поборцев П. Н., Стаховская З. А. *Порядок пользования автоматизированной системой контроля подвижного состава (АСК ПС) от устройств ДИСК, КТСМ Белорусской железной дороги*. Минск, 2008. 76 с.
11. *СТП БЧ 19.314–2015. Средства теплового контроля технического состояния подвижного состава на ходу поезда. Размещение, установка и эксплуатация*. Минск, 2015. 37 с.
12. Трестман Е. Е., Лозинский С. Н., Образцов В. Л. *Автоматизация контроля буксовых узлов в поездах*. Москва : Транспорт, 1983. 352 с.
13. Трестман Е. Е., Шмерман Х. Б., Глазкова Н. И., Лозинский С. Н. О возможности распознавания типа букс по тепловым сигналам. *Труды ВНИИЖТ*. 1979. Вып. 609. С. 58–66.
14. Шобель А. Н. Дистанционный мониторинг технического состояния подвижного состава. *Железные дороги мира*. 2013. № 6. С. 54–59.
15. Burchenkov V. V. Improving the methodology of placing peripheral devices for monitoring the technical condition of rolling stock. *Science and Transport Progress*. 2021. № 1 (85). С. 25–36. DOI : <https://doi.org/10.15802/stp2021/230220>
16. Burchenkov V. V. Decision making base d on the results of automatic diagnostics of parts and assemblies of rolling stock. *World of Transport and Transportation*. 2019. Vol. 17. Iss. 4. P. 232–243. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-232-243>
17. Tarawneh C., Hernandez V. V., Aranda J. A., Ramiez C. J. An analysis of the efficacy of Waydide Hot-Box detector data. *Joint Rail Conference* (Pittsburgh, April 18–20 2018). Pittsburgh, 2018. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2018-6218>
18. Toullier T., Dumoulin J., Mevel L. Study of complementary multi-sensors data influence on infrared thermography measurements for in-situ long-term monitoring. *Multimodal Sensing : Technologies and Applications*. 2019. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2526229>

В. В. БУРЧЕНКОВ^{1*}

^{1*}Каф. «Вагоны», Білоруський державний університет транспорту, вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +37 (529) 530 37 84, ел. пошта lenadva@tut.by, ORCID 0000-0002-3664-4655

Оцінка впливу інформації про тип підшипника буксового вузла вагонів на точність автоматичної класифікації букс, що гріються

Мета. Основною метою цієї роботи є визначення та класифікація букс вагонів, які гріються, на основі ймовірності появи роликів і касетних букс у класах букс, які гріються, і перегрітих, а також законів розподілу щільності ймовірності ознак розпізнавання роликів і касетних букс, які нормально гріються, та перегрітих. **Методика.** Досліджено особливості експлуатації вантажних вагонів із буксовими вузлами касетного типу, що мають підвищений робочий нагрів. Запропоновано методику оцінки ймовірності помилок розпізнавання з урахуванням того, що множини букс, які нормально гріються, та перегрітих складаються з підмножин букс із різного типу підшипниками. Отримано систему рівнянь, корені якої подають значення, що мінімізують ймовірність помилки розпізнавання букс, які гріються. **Результати.** З'ясовано, що за деяких способів визначення типу підшипника, наприклад, за середнім значенням амплітуд теплових сигналів для кожного вагона, ймовірність помилкової селекції може залежати від розподілу щільності ймовірності ознаки для підшипників різних типів і порогового значення цієї ознаки. Визначені оптимальні пороги виявлення перегрітих роликів букс порівняно з оптимальними порогоми виявлення перегрітих касетних букс. Установлено, що пропуск перегрітої касетної букси за умови, що тип підшипника визначено правильно, з меншою ймовірністю призведе до аварії, ніж за умови віднесення касетної букси до роликів. Сформульовано критерії бракування буксових вузлів за різниці температур їх нагрівання на одній осі колісної пари для трьох варіантів налаштувань тривожної сигналізації відповідно до розташування багатофункціональних комплексів технічних засобів КТСМ. Показано практичну реалізацію цієї методики коригування налаштувань апаратури КТСМ для Мінського відділення Білоруської залізниці. **Наукова новизна.** Отримано систему рівнянь, яка дозволяє знаходити оптимальні значення температурних порогів для виявлення перегрітих роликів і касетних букс у припущенні, що ймовірності помилок у селекції букс за їх типом відомі і постійні. **Практична значимість.** Розроблена методика коригування налаштувань тривожної сигналізації комплексів КТСМ дозволяє суттєво знизити необґрунтовані затримки поїздів і кількість відцеплень вагонів.

Ключові слова: вантажні вагони; касетні та роликові букси; перегрівання букс; класифікація букс, які гріються; порогові температурні критерії

REFERENCES

1. Burchenkov, V. V. (2020). *Avtomatizatsiya tekhnicheskogo kontrolya i diagnostiki podvizhnogo sostava zheleznikh dorog: monografiya*. Gomel: BelGUT. (in Russian)
2. Gondorov, V. A. (2016). *Novyy etap razvitiya apparatury KТСМ. Vagony ivagonnoe khozyaystvo*, 1, 30-31. (in Russian)
3. Ivanova, T. V., & Nalabordin, D. G. (2017). *Otsenka predotkaznykh sostoyaniy buksovogo uzla gruzovogo vagona. Vagony i vagonnoe khozyaystvo*, 1(49), 46-47. (in Russian)
4. Krivorudchenko, V. F., & Akhmedzhanov, R. A. (2005). *Sovremennyye metody tekhnicheskoy diagnostiki i nerazrushayushchego kontrolya detaley i uzlov podvizhnogo sostava*. Moscow: Marshrut. (in Russian)
5. Lozinskiy, S. N., Alekseev, A. G., & Karpenko, P. N. (1978). *Apparatura avtomaticheskogo obnaruzheniya peregretykh buks v poezdakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
6. Mironov, A. A., Mityushev, V. S., & Saltykov, D. N. (2018). Aktualnye problemy teplovogo kontrolya buksovykh uzlov vagonov. *Vagony i vagonnoe khozyaystvo*, 2(54), 24-26. (in Russian)
7. Mironov, A. A. (2009). Perspektivnye napravleniya sovershenstvovaniya sredstv kontrolya KТСМ-02 i ASK PS. *Automation, communication and informatics*, 1, 38-41. (in Russian)
8. Pankratov, L. V., & Chistyakov, S. N. (2008). Monitoring nagraeva buks. *Avtomatika, telemekhanika, svyaz*, 6, 19-21. (in Russian)
9. Petukhov, V. M. (2015). Structure development of diagnostic providing and diagnostic model of axle boxes in modern railroad cars. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(3(25)), 26-29. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51923> (in Russian)
10. Pobortsev, P. N., & Stakhovskaya, Z. A. (2008). *Poryadok polzovaniya avtomatizirovannoy sistemoy kontrolya podvizhnogo sostava (ASK PS) ot ustroystv DISK, KТСМ Belorusskoy zheleznoy dorogi*. Minsk. (in Russian)
11. STP BCh 19.314–2015. *Sredstva teplovogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava na khodu poezda. Razmeshchenie, ustanovka i ekspluatatsiya*. (2015). Minsk. (in Russian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

12. Trestman, Ye. Ye., Lozinskiy, S. N., & Obratsov, V. L. (1983). *Avtomatizatsiya kontrolya buksovykh uzlov v poezdakh*. Moscow: Transport. (in Russian)
13. Trestman, E. E., Shmerman, H. B., Glazkova, N. I., & Lozinskii, S. N. (1979). O vozmozhnosti raspoznavaniya tipa buks po teplovyim signalam. *VNIIZHT Scientific Journal*, 609, 58-66. (in Russian)
14. Shobel, A. N. (2013). Distantionnyy monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya podvizhnogo sostava. *Zheleznye dorogi mira*, 6, 54-59. (in Russian)
15. Burchenkov, V. V. (2021). Improving the Methodology of Placing Peripheral Devices for Monitoring the Technical Condition of Rolling Stock. *Science and Transport Progress*, 1(85), 25-36. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/230220> (in English)
16. Burchenkov, V. V. (2020). Decision making based on the results of automatic diagnostics of parts and assemblies of rolling stock. *World of Transport and Transportation*, 17(4), 232-243. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-232-243> (in Russian and English)
17. Tarawneh, C., Hernandez, V. V., Aranda, J. A., & Ramiez, C. J. (2018). An analysis of the efficacy of Waydide Hot-Box detector data. *Joint Rail Conference* (pp. 1-8). DOI: <https://doi.org/10.1115/JRC2018-6218> (in English)
18. Toullier, T., Dumoulin, J., & Mevel, L. (2019). Study of complementary multi-sensors data influence on infrared thermography measurements for in-situ long-term monitoring. *Multimodal Sensing: Technologies and Applications*, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2526229> (in English)

Received: February 10, 2021

Accepted: June 09, 2021

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 625.14:629.4.027.11

О. М. ПАТЛАСОВ¹, Є. М. ФЕДОРЕНКО^{2*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{2*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 868 53 59, ел. пошта rapunzeeelliza@gmail.com, ORCID 0000-0002-7518-9106

Допустимі значення динамічної дії рухомого складу на залізничну колію в разі підвищення осьового навантаження

Мета. Дослідження спрямоване на визначення експериментально-розрахунковим шляхом значень параметрів, що характеризують динамічну дію рухомого складу на залізничну колію, обґрунтування максимально допустимих (граничних) величин. **Методика.** Для досліджень взаємодії колії та рухомого складу на дослідній ділянці були встановлені прилади, які фіксують різні фізичні процеси. Прилади встановлені у 8 сіденнях по зовнішній рейковій нитці. Для визначення фактичного стану колії були проведені натурні вимірювання відповідно до Програми та методики проведення досліджень. **Результати.** За результатами експериментальних випробувань дії на колію виявлено, що середні вертикальні навантаження та, відповідно, середні вертикальні деформації від вагонів з осьовим навантаженням до 25 тс/вісь більші, ніж від вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь на 8 відсотків. Максимальні вертикальні навантаження від вагонів з осьовим навантаженням 25 тс/вісь перевищували середні навантаження на 10,0 тс, а від вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь – на 12,8 тс. Під час випробувань не виявлено вагонів, у яких вертикальна динамічна сила перевищує 20 тс, а горизонтальна – 10 тс. Тому норми допустимого динамічного впливу можуть бути прийняті відповідно до Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України. **Наукова новизна.** Проведено дослідження динамічних характеристик взаємодії колії й рухомого складу зокрема: напружень у кромках підшви рейок, вертикальних і горизонтальних сил від коліс рухомого складу. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можна оцінити допустимі значення динамічної дії рухомого складу на залізничну колію для обґрунтування необхідності зміни нормативів витрат матеріалів верхньої будови колії та робочої сили. В свою чергу, це дозволить планувати ремонтно-колійні терміни більш економічно доцільно та за фактичними показниками стану верхньої будови колії.

Ключові слова: залізнична колія; осьове навантаження; напруження; вертикальні сили; горизонтальні сили

Вступ

Залізничному транспорту України належить провідна роль у здійсненні перевізного процесу.

Реструктуризація залізничного транспорту, яка зараз проходить в Україні, повинна створити умови для досягнення рівня європейських і світових стандартів, що дасть змогу пришвидшити темпи євроінтеграції та максимально реалізувати транспортний потенціал країни.

Одним зі способів збільшення перевізної здатності залізниць є підвищення осьового навантаження вантажних вагонів. Проведені дослідження свідчать про значні обсяги перевезення вантажів, незважаючи на деякий спад в останні роки. При цьому залізничний транспорт дещо поступається в динаміці росту автотранспорту й не повною мірою використовує свій транзитний потенціал. Тому слід задіяти ці резерви якомога повніше [2].

Мета

Тому метою нашої роботи є визначення допустимих значень динамічної дії рухомого складу на залізничну колію в разі підвищення осевого навантаження та інтенсивності розладу колії для подальшого обґрунтування зміни нормативів витрат матеріалів верхньої будови колії та робочої сили.

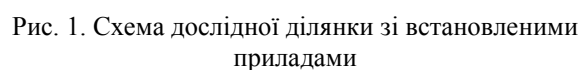
Робота виконана співробітниками кафедри «Транспортна інфраструктура» та Колієвипробувальної галузевої науково-дослідної лабораторії Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Експериментальні дослідження проведено на парній колії перегону Пришиб – Бурчацьк. (км 1174-ий, ПК 3). Ділянка розташована у прямій. На ділянці укладено залізобетонні шпали з кріпленням КБ.

Взаємодію колії та рухомого складу на дослідній ділянці фіксували прилади, встановлені у 8 січеннях по зовнішній рейковій нитці, – інформаційно-вимірювальна апаратура «ПОНІЛ-Ц». Схема дослідної ділянки зі встановленими приладами наведена на рис. 1, фото дослідної ділянки – на рис. 2.

Схема дослідного поїзда наведена на рис. 3. Поїзд рухався зі швидкістю близько 75 км/год зі сторони ст. Пришиб у напрямку ст. Бурцацьк.

Приклад записів датчиків під час руху дослідного поїзда наведено на рис. 4.



© О. М. Патласов, Е. М. Федоренко, 2021

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ



Рис. 2. Фото дослідної ділянки

Fig. 2. Photo of the experimental section



Рис. 3. Зразок записів датчиків під час руху локомотива 2ТЕ116

Fig. 3. Sample of sensor recordings during the movement of the 2TE116 locomotive

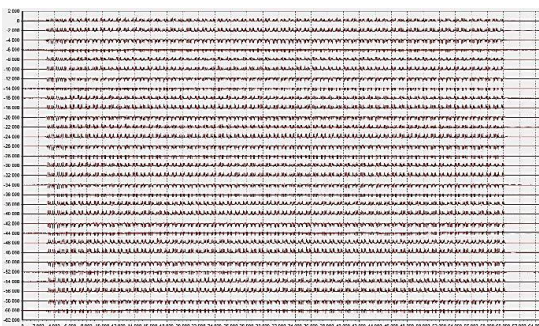


Рис. 4. Зразок записів датчиків під час руху дослідженого поїзда

Fig. 4. Sample of sensor recordings during the movement of the train under study

Результати

Напруження в кромках підшви рейок є одним з основних показників впливу на колію рухомого складу, головним критерієм міцності колії, а отже, і безпеки руху по колії з різною конструкцією верхньої будови. Нормована величина цих напружень (240 МПа) визначає допустимі швидкості руху.

Перерізи, у яких вимірювали напруження у кромках підшви рейок, показані на схемі встановлення вимірювальних приладів (див. рис. 1). Вимірювання проводили за допомогою тензорезисторів, наклеєних на підшви рейки поблизу зовнішньої та внутрішньої кромок.

У результаті статистичної обробки експериментальних даних були отримані середні ($\bar{\sigma}$), максимальні ймовірні ($\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$) і максимальні спостережені ($\sigma_{\max}^{\text{спос}}$) значення напружень в кромках підшви рейки. Результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Середні ($\bar{\sigma}$), максимальні ймовірні ($\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$) і максимальні спостережені ($\sigma_{\max}^{\text{спос}}$) значення напружень у кромках підшви рейки, МПа

Table 1

Average ($\bar{\sigma}$), maximum probable

($\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$) and maximum observed ($\sigma_{\max}^{\text{спос}}$) values of stresses at the edges of the rail base, MPa

Рухомий склад	$\bar{\sigma}$	$\sigma_{\max}^{\text{ймов}}$	$\sigma_{\max}^{\text{спос}}$
Локомотив (ВЛ11)	48,75	73,14	95,19
Піввагони (до 25 тс/вісь)	57,74	90,78	97,02
Піввагони (до 23,5 тс/вісь)	53,68	88,50	118,65

Аналіз даних табл. 1 показав, що найбільші середні значення напружень виникають від вагонів із навантаженням до 25 тс/вісь, а максимальні – від вагонів із осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь. У всіх випадках напруження в кромках підшви рейок не перевищували допустимі 240 МПа [6].

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Вимірювання вертикальних сил, що передаються від коліс рухомого складу на рейки, також проводили в перерізах, які показано на рис. 1.

Тарування приладів виконували на основі стандартної методики: визначали співвідношення середнього значення ординат запису навантажень від усіх коліс екіпажів за швидкості 5 км/год й середнього значення статичного навантаження на колесо.

Після статистичної обробки експериментальних даних отримали середні ($\bar{P}$), максимальні ймовірні ($P_{\max}^{\text{ймов}}$) та максимальні спостережені ($P_{\max}^{\text{спос}}$) значення вертикальних сил, що передаються на рейки від коліс екіпажів під час руху з різними швидкостями. Результати наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Середні ($\bar{P}$), максимальні ймовірні ($P_{\max}^{\text{ймов}}$) і максимальні спостережені ($P_{\max}^{\text{спос}}$) значення вертикальних сил, кН

Table 2

Average ($\bar{P}$), maximum probable ($P_{\max}^{\text{ймов}}$) and maximum observed ($P_{\max}^{\text{спос}}$) values of vertical forces, kN

Рухомий склад	$\bar{P}$	$P_{\max}^{\text{ймов}}$	$P_{\max}^{\text{спос}}$
Локомотив (ВЛ11)	121,95	151,91	143,58
Піввагони (до 25 тс/вісь)	121,17	158,94	171,57
Піввагони (до 23,5 тс/вісь)	112,15	147,61	176,69

Із табл. 2 видно, що, як і кромкові напруження, найбільші середні значення вертикальних сил виникають від вагонів із навантаженням до 25 тс/вісь, а максимальні – від вагонів із осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь. У всіх випадках динамічні вертикальні сили не перевищували допустимі 210 кН [6].

Для визначення величин горизонтальних поперечних (бокових) сил використовують триточковий метод, розроблений О. П. Єршковим [1]. За цим методом значення бокових сил визнача-

ють на основі експериментально отриманих величин напружень у кромках підшви та в зовнішній грані головки рейки:

$$H = B \cdot \sigma_H^n, \quad (1)$$

де H – бокові сили, які діють на колію, у [1] вони наведені в кГс; B – коефіцієнт для визначення бокових сил, у [1] він поданий у см²; σ_H^n – напруження, що виникають у зовнішній кромці підшви рейок від дії бокових сил, у [1] вони наведені в кГс/см².

Коефіцієнт B визначають за формулою:

$$B = 4 \cdot W_z^n \cdot k_y^T, \quad (2)$$

де W_z^n – момент опору поперечного перерізу рейки відносно осі z , см³; k_y^T – коефіцієнт відносно жорсткості рейки та підрейкової основи з урахуванням тертя в горизонтальній площині, см⁻¹.

Момент опору поперечного перерізу рейки відносно осі z становитиме:

$$W_z^n = \frac{2 \cdot I_z}{b_n}, \quad (3)$$

де I_z – момент інерції поперечного перерізу рейки відносно осі z , см⁴; b_n – ширина підшви рейки, см.

Для рейок типу Р65 ($I_z = 569$ см⁴; $b_n = 15$ см) $W_z^n = 75,87$ см³.

Коефіцієнт відносно жорсткості рейки і підрейкової основи визначають за формулою [8]:

$$k_y^T = \sqrt[4]{\frac{U_y^T}{4 \cdot E \cdot I_z}}, \quad (4)$$

де U_y^T – модуль пружності колії в горизонтальній площині з урахуванням тертя; E – модуль пружності рейкової сталі, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Модуль пружності U_y^T дорівнює [1]:

$$U_y^T = \frac{1}{\sqrt[3]{64 \cdot E \cdot I_z}} (\lambda \cdot \beta^n)^{\frac{4}{3}}, \quad (5)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

де β_y^n – згинальна жорсткість рейки по підшві в горизонтальній площині, отримана з урахуванням тертя; λ – коефіцієнт, що враховує кручення рейки, для рейок Р65 $\lambda = 1$.

Підставивши значення модуля пружності U_y^T у формулу (4), отримаємо вираз (6):

$$k_y^T = \sqrt[4]{\frac{(\lambda \cdot \beta_y^n)^{\frac{4}{3}}}{(64 \cdot E \cdot I_z)^{\frac{1}{3}} \cdot 4 \cdot E \cdot I_z}} = 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{(\lambda \cdot \beta_y^n)^{\frac{4}{3}}}{(64 \cdot E \cdot I_z)^{\frac{4}{3}}}} = \sqrt[3]{\frac{\lambda \cdot \beta_y^n}{8 \cdot E \cdot I_z}}. \quad (6)$$

Згинальну жорсткість рейки по підшві в горизонтальній площині можна виразити через згинальну жорсткість по голівці таким чином:

$$\beta_y^n = \varepsilon \cdot \beta_y^r, \quad (7)$$

де ε – коефіцієнт, що дорівнює відношенню експериментальних значень середніх віджимань по підшві до середніх віджимань головки в горизонтальній площині, узятому в одному перерізі колії за мінімальної швидкості ($V = 5$ км/год):

$$\varepsilon = \frac{y_{cp}^n}{y_{cp}^r}, \quad (8)$$

де, y_{cp}^n , y_{cp}^r – середні віджимання підшви та головки рейки в одному перерізі.

Тоді $\beta_y^n = 0,217\beta_y^r$.

Підставивши це значення у формулу (7), отримаємо кінцеву формулу:

$$B = 0,086 \cdot \sqrt[3]{\beta_y^r}. \quad (9)$$

Оскільки у формулу (1) всі значення ми підставляємо в одиницях виміру системи СІ, то необхідно це взяти до уваги в розрахунках за допомогою таких коефіцієнтів:

а) напруження в рейках вимірюються не в кГс/см², а в МПа, при цьому 1 МПа = 10 кГс/см², тому вводимо перевідний коефіцієнт 10;

б) бічні сили в системі СІ вимірюють у кН, а не в кГс, при цьому 1 кН = 100 кГс, тому вводимо в праву частину формули перевідний коефіцієнт 0,01;

в) коефіцієнт B вимірюють у кН/МПа, замість см². При цьому експериментально виміряну жорсткість у формулу (9) підставляємо в кН/мм замість кГс/см, це враховуємо за допомогою коефіцієнта 10³, тому що 1 кН/мм = 10³ кГс/см.

Оскільки (9) входить як співмножник у формулу (1), то всі коефіцієнти можемо підставити в (9). Тоді формула (9) набуде вигляду:

$$B = 0,086 \cdot 10 \cdot 0,01 \cdot \sqrt[3]{\beta_y^r \cdot 10^3} = 0,086 \cdot \sqrt[3]{\beta_y^r}, \quad (10)$$

Напруження, що виникають у кромці підшви рейок від дії бокових сил, визначають так [1]:

$$\sigma_H^n = \frac{h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{b_n}{b_r} \cdot \frac{z_1}{z_2} \cdot \sigma_p^n + \frac{h_1}{h_1 + h_2} \cdot \sigma_H^{ysl} + \frac{h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{b_n}{b_r} \cdot \sigma_{зов}^r, \quad (11)$$

де σ_p^n – напруження, що виникають у кромці підшви рейки від дії вертикальних сил; σ_H^{ysl} – різниця напружень, що виникають у внутрішній і зовнішній кромках підшви рейки від дії бокових сил; Тоді: h_1 , h_2 , z_1 , z_2 , b_n , b_r – геометричні характеристики рейки, які вказані на рис. 5.

$$\sigma_p^n = \frac{\sigma_{зов}^n + \sigma_{вн}^n}{2}; \quad (12)$$

$$\sigma_H^{ysl} = \frac{\sigma_{зов}^n - \sigma_{вн}^n}{2}, \quad (13)$$

де $\sigma_{зов}^n$, $\sigma_{вн}^n$, $\sigma_{зов}^r$ – експериментальні напруження в зовнішній і внутрішній кромці підшви та зовнішній грані головки рейки, МПа;

Зазначені вище формули отримані за умови рівноваги всіх сил, прикладених до рейки.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

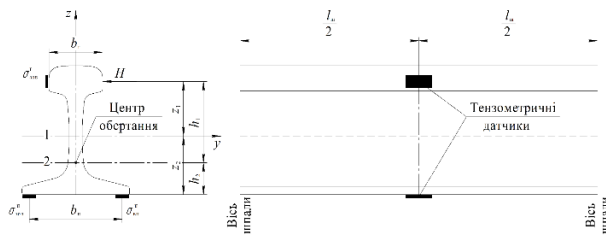


Рис. 5. Схема вимірювання напружень у кромках підшви і зовнішній кромці головки рейки:

1 – нейтральна вісь; 2 – горизонтальна вісь, що проходить через центр обертання

Fig. 5. Scheme of measuring stresses in the edges of the rail base and the outer edge of the rail head:

1 – neutral axis; 2 – horizontal axis passing through the rotation center

Для зручності розрахунків вираз (11) зведений до вигляду [1]:

$$\sigma_H^{\Pi} = A_1 \cdot \sigma_{\text{зов}}^{\Pi} + A_2 \cdot s_{\text{вн}}^{\Pi} + A_3 \cdot \sigma_{\text{зов}}^{\Gamma}, \quad (13)$$

$$A_2 = \frac{h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{b_{\Pi}}{b_{\Gamma}} \cdot \frac{z_1}{2 \cdot z_2} - \frac{h_1}{2 \cdot (h_1 + h_2)}; \quad (14)$$

$$A_2 = \frac{h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{b_{\Pi}}{b_{\Gamma}} \cdot \frac{z_1}{2 \cdot z_2} - \frac{h_1}{2 \cdot (h_1 + h_2)}; \quad (15)$$

$$A_3 = \frac{h_2}{h_1 + h_2} \cdot \frac{b_{\Pi}}{b_{\Gamma}}. \quad (16)$$

Після проведення статистичної обробки експериментальних даних отримані середні ($\bar{H}$), максимальні ймовірні ($H_{\text{макс}}^{\text{ймов}}$) та максимальні спостережені ($H_{\text{макс}}^{\text{спос}}$) значення горизонтальних поперечних (бокових) сил, що передаються на рейки від коліс екіпажів під час руху з різними швидкостями. Результати наведені в табл. 3.

Дані табл. 3 свідчать, що, як і кромкові напруження, найбільші середні значення горизонтальних сил виникають від вагонів із навантаженням до 25 тс/вісь, а максимальні – від вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь. У всіх випадках бокові сили не перевищували допустимі 120 кН [6].

Таблиця 3

Середні ($\bar{H}$), максимальні ймовірні ($H_{\text{макс}}^{\text{ймов}}$) та максимальні спостережені ($H_{\text{макс}}^{\text{спос}}$) значення бокових сил від осей, які набігають на рейки, кН

Table 3

Average ($\bar{H}$), maximum probable ($H_{\text{макс}}^{\text{ймов}}$) and maximum observed ($H_{\text{макс}}^{\text{спос}}$) values of lateral forces from the axes climbing on the rails, kN

Рухомий склад	$\bar{H}$	$H_{\text{макс}}^{\text{ймов}}$	$H_{\text{макс}}^{\text{спос}}$
Локомотив (ВЛ11)	34,28	53,90	61,58
Піввагони (до 25 тс)	29,92	46,83	46,99
Піввагони (до 23,5 тс/вісь)	28,60	46,12	51,70

Наукова новизна та практична значимість

У роботі проведено дослідження динамічних характеристик взаємодії колії та рухомого складу зокрема: напружень у кромках підшви рейок, вертикальних і горизонтальних сил від коліс рухомого складу. На основі отриманих результатів можна оцінити допустимі значення динамічної дії рухомого складу на залізничну колію для обґрунтування необхідності зміни нормативів витрат матеріалів верхньої будови колії та робочої сили. В свою чергу, це дозволить планувати ремонтно-колійні терміни більш економічно доцільно та за фактичними показниками стану верхньої будови колії.

Висновки

За результатами експериментальних випробувань виявлено:

- середні вертикальні навантаження та, відповідно середні вертикальні деформації від вагонів з осьовим навантаженням до 25 тс/вісь більші ніж від вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь на 8 відсотків;
- максимальні вертикальні навантаження від вагонів з осьовим навантаженням 25 тс/вісь перевищували середні навантаження на 10,0 тс, а від вагонів з осьовим навантаженням до

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

23,5 тс/вісь – на 12,8 тс. За абсолютним значенням максимальні вертикальні навантаження спостерігалися від вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь та досягали 35,2 тс/вісь;

– середні горизонтальні сили, що діють на рейки від коліс вагонів з осьовим навантаженням до 25 тс/вісь, дорівнювали 2,99 тс, а від коліс вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь – 2,86 тс;

– максимальні горизонтальні сили дії на колію від коліс вагонів з осьовим навантаженням до 25 тс/вісь дорівнювали 4,7 тс, а від коліс вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь – 5,2 тс;

– максимальні вертикальні навантаження від вагонів з осьовим навантаженням 25 тс/вісь перевищували середні навантаження на 10,0 тс,

а від вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь – на 12,8 тс. За абсолютним значенням максимальні вертикальні навантаження спостерігалися від вагонів з осьовим навантаженням до 23,5 тс/вісь та досягали 35,2 тс/вісь.

Наявність повзунів (у межах допусків до 1 мм) призводить до зростання динамічних сил на 10–15 %. Під час випробувань не виявлено вагонів, у яких вертикальна динамічна сила перевищує 20 тс, а горизонтальна – 10 тс. Тому норми допустимого динамічного впливу можуть бути прийняті відповідно до Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України [7].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ершков О. П. Исследование жесткости железнодорожного пути и её влияние на работу рельсов в кривых участках. *Вестник ВШИЖТ*. 1963. Вып. 264. С. 39–98.
2. Інноваційні вантажні вагони та впровадження рухомого складу з навантаженням 25 т/вісь в залізничних адміністраціях країн СНД. *Rail Cargo Spring 2019*. URL: <https://logist.academy/ulb/2019/05/27/tsytatamyamlin/>
3. Климов В. И., Цыганенко В. В. Экспериментальное определение боковых сил в кривой при рекуперативном торможении поездов. *Сб. науч. тр. ДИИТа*. 1969. Вып. 99. С. 16–19.
4. Курган Д. М., Губар О. В., Гаврилов М. О. Методика інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейку. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 3 (87). С. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208202>
5. Курган М. Б., Курган Д. М., Байдак С. Ю., Хмелевська Н. П. Дослідження впливу стану залізничної колії в плані на плавність і безпеку руху поїздів. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2017. № 14. С. 94–101. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2017/137797>
6. *Норми допустимих швидкостей руху рухомого складу по залізничних коліях державної адміністрації залізничного транспорту України шириною 1520 мм : ЦП – 0235*. Київ : НВП Поліграфсервіс, 2011. 72 с.
7. *Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України : ЦП–0287* : затв. наказом Укрзалізниці від 03.11.2014 № 470-ЦЗ. Київ, 2015. 45 с.
8. *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість : ЦП – 0117*. Київ : Транспорт України, 2005. 119 с.
9. Сидорова Е. А. Исследование влияния геометрических параметров железнодорожного пути в плане, представленных в виде геометрических моделей, на показатели динамического взаимодействия пути и подвижного состава. *Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2017. № 4. С. 243–248. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-4-243-248>
10. Kuka N., Ariaudo C., Verardi R., Pombo J. Impact of rail infrastructure maintenance conditions on the vehicle-track interaction loads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. Vol. 235. Iss. 16. P. 2952–2967. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406220962144>
11. Sadeghi J, Khajehdezfuly A, Heydari H, Askarinejad H. Development of Railway Ride Comfort Prediction Model : Incorporating Track Geometry and Rolling Stock Conditions. *Journal of Transportation Engineering, Part A : Systems*. 2020. Vol. 146. Iss. 3. P. 04020006.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

12. Shvets A. O., Bolotov O. M., Percevoj A. K., Ghlukhov V. V., Bolotov O. O., Saparova L. S. Research of Dynamic Indicators and Influence of Different Types of Rolling Stock on Railway Track. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering* (Dnipro, 27–29 May 2020). Dnipro, 2020. Vol. 985. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012010>
13. Ye Y., Shi D., Poveda-Reyes S., Hecht M. Quantification of the influence of rolling stock failures on track deterioration. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 2020. Vol. 21. Iss. 10. P. 783–798. DOI: <https://doi.org/10.1631/jzus.a2000033>

O. M. PATLASOV¹, Y. M. FEDORENKO^{2*}

¹ Dep. «Transport Infrastructure», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail am_patlasov@ukr.net, ORCID 0000-0003-2081-5648

^{2*} Dep. «Transport Infrastructure», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 868 53 59, e-mail rapunzeeelliza@gmail.com, ORCID 0000-0002-7518-9106

Permissible Values of the Dynamic Impact of the Rolling Stock on the Railway Track in the Case of Axle Load Increase

Purpose. The study is aimed at determining experimentally the values of the parameters characterizing the dynamic effect of rolling stock on the railway track, substantiating the maximum permissible (limiting) values. **Methodology.** To investigate the interaction between the track and the rolling stock, the devices to record various physical processes were installed on the experimental sections. The devices were installed in 8 sections along the outer railway line. To establish the actual state of the track, field measurements were carried out in accordance with the Program and research methodology. **Findings.** According to the results of experimental tests of the impact on the track, it was revealed that the average vertical loads, and, accordingly, the average vertical deformations, under the cars with an axle load of up to 25 tf/axle are higher than that under the cars with an axle load of up to 23.5 tf/axle by 8 percent. The maximum vertical loads under the cars with an axle load of 25 tf/axle exceeded the average loads by 10.0 tf, and under the cars with an axle load of up to 23.5 tf/axle exceeded the average values by 12.8 tf. During the tests, no cars were found in which the vertical dynamic force exceeds 20 tf, and the horizontal force exceeds 10 tf. Therefore, the norms of permissible dynamic impact can be taken in accordance with the Regulations on Preventive Maintenance and Repair Track Work on the Railways of Ukraine. **Originality.** The authors conducted a study to assess the dynamic characteristics of the interaction of track and rolling stock, in particular the stresses in the edges of the rail base, vertical and horizontal forces from the wheels of rolling stock. **Practical value.** On the basis of the results obtained, it is possible to estimate the permissible values of the dynamic effect of the rolling stock on the railway track to substantiate the need to change the standards for the material consumption of the track superstructure and labor. In turn, this will make it possible to plan the repair and track periods more economically and according to the actual indicators of the state of the track superstructure.

Keywords: railway track; axial load; stress; vertical forces; horizontal forces

REFERENCES

1. Yershkov, O. P. (1963). Issledovanie zhestkosti zheleznodorozhnogo puti i ee vliyanie na rabotu relsov v krivyykh uchastkakh. *Vestnik VShIZhT*, 264, 39-98. (in Russian)
2. Innovacijni vantazhni vaghony ta vprovadzhenja rukhomogho skladu z navantazhennjam 25 t/visj v zaliznychnykh administracijakh krajn SND. *Rail Cargo Spring 2019*. Retrieved from <https://logist.academy/ulb/2019/05/27/tsytata-myamlin/> (in Ukrainian)
3. Klimov, V. I., & Tsyganenko, V. V. (1969). Eksperimentalnoe opredelenie bokovykh sil v krivoy pri rekuperativnom tormozhenii poezdov. *Sbornik nauchnykh trudov DIITA*, 99, 16-19. (in Russian)
4. Kurhan, D. M., Hubar, O. V., & Havrilov, M. O. (2020). Methodology for engineering calculation of stability coefficient against wheel climbing on the rail. *Science and Transport Progress*, 3(87), 71-80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208202> (in Ukrainian)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

5. Kurhan, M. B., Kurhan, D., Baidak, S., & Khmelevska, N. (2017). Investigation of the influence of the state of the railway track in terms of softness and safety of trains. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 14, 94-101. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecstr2017/137797> (in Ukrainian)
6. Normy dopustymykh shvydkostej rukhu rukhomogho skladu po zaliznychnykh kolijakh derzhavnoji administraciji zaliznychnogho transportu Ukrajiny shyrynoju 1520 mm. (2011). Kyiv: NVP Polighrafservis. (in Ukrainian)
7. Polozhennja pro provedennja planovo-zapobizhnykh remontno-kolijnykh robit na zaliznycjakh Ukrajiny. (2015). CP-0287: nakaz Ukrzaliznytsi No 53-Ts. Kyiv. (in Ukrainian)
8. Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoji koliji na micnistj i stijkistj: CP-0117. (2005). Kyiv: Transport Ukrajiny. (in Ukrainian)
9. Sidorova, E. A. (2017). Research of geometry effects on the railway track in the alignment, represented in the form of geometric models, on the indicators of the dynamic interaction of the track and rolling stock. *Vestnik of the Railway Research Institute*, 76(4), 243-248. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-4-243-248> (in Russian)
10. Kuka, N., Ariaudo, C., Verardi, R., & Pombo, J. (2020). Impact of rail infrastructure maintenance conditions on the vehicle-track interaction loads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(16), 2952-2967. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406220962144> (in English)
11. Sadeghi, J., Khajehdezfuly, A., Heydari, H., & Askarinejad, H. (2020). Development of Railway Ride Comfort Prediction Model: Incorporating Track Geometry and Rolling Stock Conditions. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 146(3), 04020006. (in English)
12. Shvets, A. O., Bolotov, O. M., Percevoj, A. K., Ghlukhov, V. V., Bolotov, O. O., & Saporova, L. S. (2020). Research of dynamic indicators and influence of different types of rolling stock on railway track. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 985, pp. 1-10). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/985/1/012010> (in English)
13. Ye, Y., Shi, D., Poveda-Reyes, S., & Hecht, M. (2020). Quantification of the influence of rolling stock failures on track deterioration. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 21(10), 783-798. DOI: <https://doi.org/10.1631/jzus.a2000033> (in English)

Надійшла до редколегії: 12.02.2021

Прийнята до друку: 11.06.2021

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

UDC 004.4(048.8)

O. O. ZHEVAHO^{1*}

^{1*}Dep. «Computer and Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail marakonec@gmail.com, ORCID 0000-0003-0019-8320

An Overview of Tools for Collecting Data on Software Development and Debugging Processes from Integrated Development Environments

Purpose. This paper presents the findings of a review of the literature published in the twenty-first century in order to identify and analyze the current state of tools that track developer interactions with integrated development environments, as well as to recommend future research directions based on the actual state. **Methodology.** By systematically searching in five digital libraries we conducted a systematic review of the literature on data collection tools from integrated development environments published in the twenty-first century. Fifty-five papers were selected as primary studies. **Findings.** 55 articles were analyzed and the findings show that using an integrated development environment to collect usage data provides more insight into developer activities than it was previously possible. Usage data allows us to analyze how developers spend their time. With usage data, you can learn more about how developers create mental models, investigate code, conduct mini-experiments through trial and error, and what can help everyone improve performance. The research community continues to be highly active in developing tools to track developer activity. The findings indicate that more research is needed in this area to better understand and measure programmer behavior. **Originality.** For the first time, systematization and analysis of tools for tracking programmer's behavior in an integrated development environment have been carried out. **Practical value.** Our study contributes to a better understanding of the current state of research on programmer behavior in integrated development environments. An analysis of the study can help define a research agenda as a starting point for the creation of a novel practical tool.

Keywords: software development process; debugging; integrated development environment; literature review

Introduction

Traditionally, improving software development productivity has been an important challenge in software engineering. Given the vast differences in developer productivity, there is significant potential to improve support for the programming process by better understanding how developers approach software development and the individual challenges they face.

A software developer's productivity can be measured by observing and collecting certain types of events related to the use of the integrated development environment.

To assist developers in their daily work, you need to understand developers' activities, especially how they develop source code. Ideally, this can be done by observing developers in their actual work environment.

The majority of developers nowadays work in an integrated development environment (IDE). The usage of an IDE simplifies the development process. IDEs are popular among software engineers because they assist them with day-to-day tasks such as development and maintenance. Instead of using the version system repository as a data source, an alternative is to monitor the programmer's activities invisibly from the IDE he is using.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

By getting information directly from the IDE, you can record much more detailed events. Researchers can learn about developer behavior in such IDEs, which can help them support (or refute) conclusions on developer behavior in various software engineering tasks and the use of related tools.

Data on how developers use their IDEs provide extra information into how they produce software. The IDE's usage of data collection technologies allows for a more complete understanding of how developers work than was previously possible. The most obvious application of usage data is to examine how developers spend their time in the IDE by identifying usage log events and tracking the time between them. We can acquire a better understanding of the developer's time allocation and uncover ways to save time by analyzing usage data. When we monitor a programmer's interactions with an IDE, we can look for patterns in the flow of interactions that indicate that help is needed and provide it immediately.

Purpose

In this paper, we examine published research from the twenty-first century to investigate tools that track developer interactions with integrated development environments, based on the findings of a thorough literature review. The purpose of this research is to determine whatever tools have been

developed in the research community and how they might be used. We identified research gaps and proposed future research directions based on our findings.

Methodology

The recommendations suggested by Kitchenham [25], which are among the most widely accepted in software engineering, were adopted to conduct a systematic literature review.

We used a well-defined procedure in our review, which included the following steps:

1. Identifying the research questions.
2. Conducting a database search.
3. Study selection.
4. Filtering studies by assessing their relevance.
5. Extraction of data.
6. A summary of the findings.
7. Writing a review report.

Research questions. We established the following research questions to determine the study's scope:

1. How many tools for tracking developer activities with integrated development environments have been developed in the twenty-first century?
2. How have researchers used these tools to collect and analyze developer behavior?

The process we use to select relevant articles is shown in Figure 1.

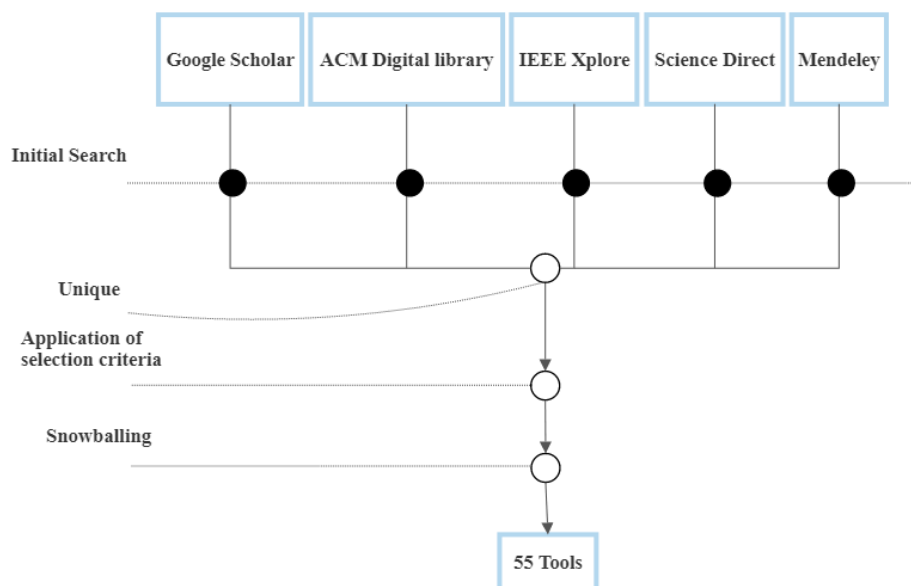


Fig. 1. Papers selection methodology

Initial search. We searched five well-known digital libraries, such as Google Scholar, ACM, IEEE Xplore, ScienceDirect, and Mendeley. We chose these databases because they are very large, which makes this review exhaustive.

Unique. We merged the results from each database into a single set and removed duplicates.

Application of selection criteria. This stage allows us to determine whether the articles we receive are relevant to our topics. The abstract and main text of each article is evaluated to ensure that they fit the inclusion criteria.

The inclusion criteria are:

1. Twenty-first-century research that is relevant to our research questions and has been published in journals or conferences.

2. The article is written in English, Russian, or Ukrainian, and the full text of the article is available.

Snowballing. To decide whether to include a paper in the study, we looked at the list of all references and read the whole text of the article. To prevent overlooking potentially relevant studies, we employed the «snowballing» method, analyzing references for each selected study. The snowballing process was carried out in both directions (backward and forward).

For each chosen paper, data was collected and analyzed.

Findings

Now we can answer our research questions.

RQ 1. *How many tools for tracking developer activities with IDEs have been developed in the twenty-first century?*

Overall, we found 55 relevant papers, presented in Table 1.

These papers are all about a tool that keeps track of a developer's interactions with an integrated development environment.

The names of journals and conferences are listed in Table 1, along with the total number of papers from each source.

The year-by-year distribution of tools invented in the twenty-first century is depicted in Figure 2.

RQ 2. *How have researchers used these tools to collect and analyze developer behavior?*

We divided the selected tools into three groups that track: coding behavior, debugging behavior, and collaborative interaction.

Coding behavior. We have identified 44 tools to help you understand coding behavior [1–4, 7–12, 14–16, 21–24, 26–28, 30–40, 42–44, 46–48, 50–56].

These are IDE plugins that track and classify developer activity by listening for events related to developer behavior. Researchers used these plugins to determine how much time programmers spent writing code in the IDE. They were designed to track developer activity in the IDE by recording a range of code editing events, keystrokes, and keyboard shortcuts when building software. They allow you to replay a programming session using fine-grained typing logs and have a timeline.

One of the reasons for observing the development of algorithms and program texts is to control independent work.

These tools can also detect manual refactoring, which is reworking performed by the developer without the use of an IDE. BeneFactor [14] identifies developers' manual refactoring and provides them with reminders to employ automatic refactoring.

As a result, researchers are investigating new methods for collecting and analyzing data that might be used to characterize the coding workflow.

According to studies, code completion is one of the most commonly utilized features in IDEs [35].

These tools are used to evaluate the behavior of novice programmers in introductory programming classes [37]. Recorded transaction history contains not only information about edits, which shows how each source file was changed, but also the developer's interaction with the IDE (i.e., tool usage). The data also includes timestamps, which can be used to estimate how much time was spent on a specific task. The cornerstone for boosting hands-on learning and lowering time wasted in the software development process is monitoring development style approaches.

These tools make it possible to create systems that automatically monitor and evaluate the coding process, as well as provide adaptive feedback and programming skill assessments.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

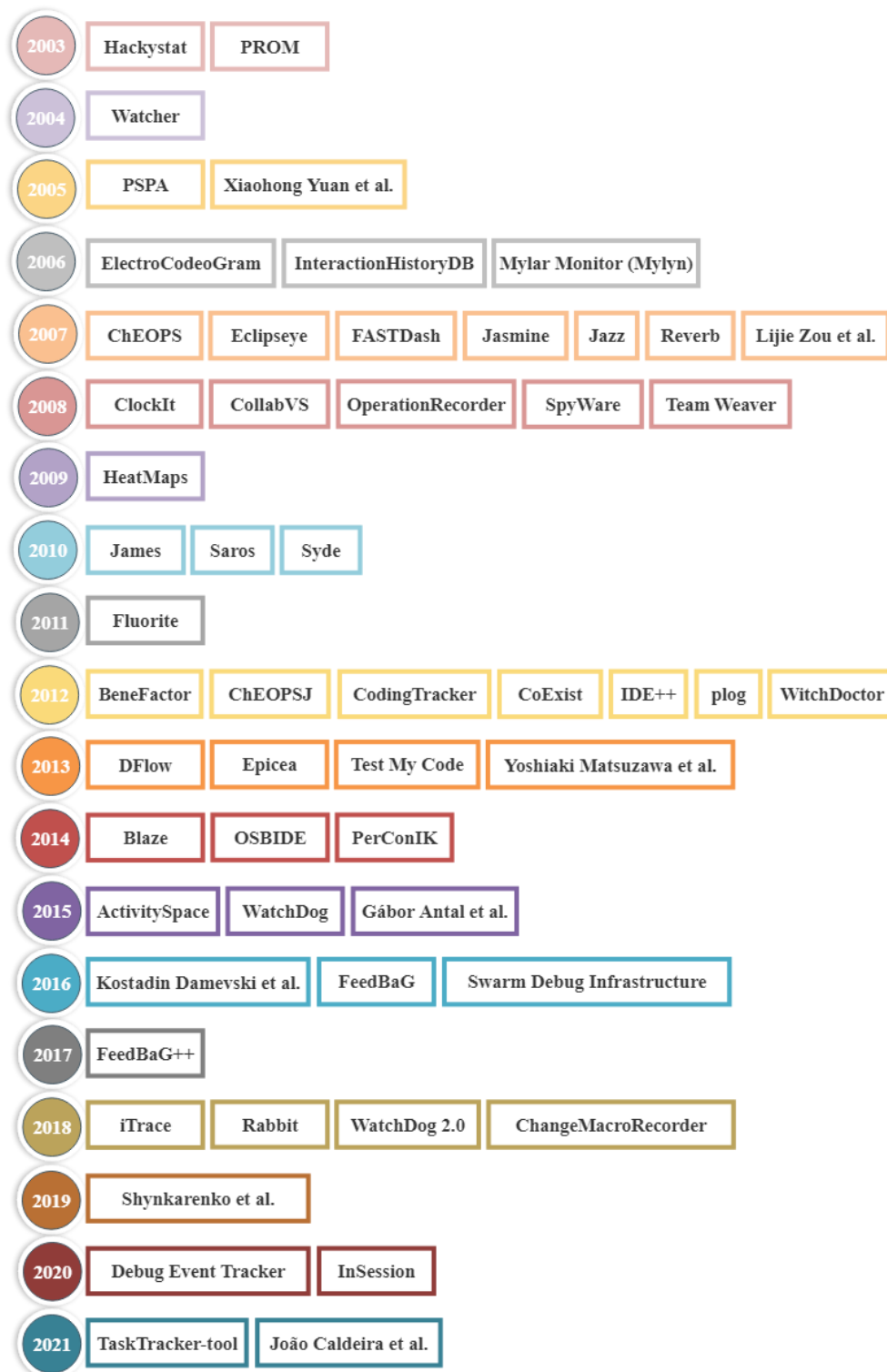


Fig. 2. Tools developed in twenty-first century per year

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Table 1

Journals and conferences of the selected papers

Source	Venue	Total	Referred papers
Program Comprehension	Conference	4	[1, 27, 40, 44]
Applied Informatics	Conference	1	[2]
Automated Software Engineering	Conference	3	[3, 19, 32]
Foundations of Software Engineering	Conference	1	[4]
Software Engineering	Conference	9	[5, 12, 14, 18, 24, 38, 43, 45, 52]
Human Factors in Computing Systems	Conference	1	[6]
Current Trends in Theory and Practice of Informatics	Conference	1	[7]
arXiv	Journal	1	[8]
IEEE Transactions on Software Engineering	Journal	1	[9]
Smalltalk Technologies	Conference	1	[10]
Dynamic languages	Conference	1	[11]
IEEE Software	Journal	3	[13, 22, 35]
Systems, Programming, and Applications: Software for Humanity	Conference	2	[15, 20]
Eye Tracking Research and Applications	Conference	1	[16]
Software Maintenance	Conference	1	[17]
Advanced Information Systems Engineering	Conference	1	[21]
Ethnographies of Code	Conference	1	[23]
Recommendation Systems for Software Engineering	Conference	1	[26]
Computer Science Education	Conference	1	[28]
Practical Aspects of Knowledge Management	Conference	1	[29]
Software Analysis, Evolution and Reengineering	Conference	2	[30, 42]
Innovation and Technology in Computer Science Education	Conference	1	[31]
Eclipse Technology Exchange	Conference	1	[33]
Visualizing Software for Understanding and Analysis	Conference	1	[34]
Object-Oriented Programming	Conference	1	[36]
Special Interest Group on Computer Science Education	Conference	2	[37, 54]
International Journal of Technology Enhanced Learning	Journal	1	[39]
Software Quality, Reliability and Security	Conference	1	[41]
University of Lugano	Thesis	1	[46]
Software Process	Conference	1	[47]

Continuation of Table 1

Journals and conferences of the selected papers

Source	Venue	Total	Referred papers
Computer Sciences and Information Technologies	Conference	2	[48, 49]
Instrumentation Technology Conference	Conference	1	[50]
Asia-Pacific Software Engineering Conference	Conference	1	[51]
Software Maintenance and Reengineering	Conference	1	[53]
Evaluation and Usability of Programming Languages and Tools	Conference	1	[55]
Software Engineering Research and Practice	Journal	1	[56]

Debugging behavior. We have identified 5 tools to help you understand debugging behavior [5, 9, 35, 41, 49].

Debugging is an unavoidable aspect of almost all software development projects, and it is usually more difficult and time-consuming than expected. These tools collect information on debugging in the IDE debugging infrastructure, how programmers debug, and what debugging tools and approaches are available. They help researchers collect and share data on interactive debugging attempts by developers [41]. Using their previous debugging sessions' knowledge, developers can go through call method sequences and find appropriate breakpoints.

Researchers can use such tools to uncover use patterns and smells that help them better understand how usable development environments are for debugging.

Breakpoints and step-by-step code examination are the most often used debugging functions, while sophisticated debugging options in IDEs are underutilized [5]. Developers often avoid complex debugger functions such as breakpoints, and prefer simpler debugging techniques such as «printf debugging». Even when more efficient commands are available, users tend to utilize only a few debugging commands [9].

Programmers spend the majority of their time reading and interpreting source code, according to the research. They believe that running the application with a debugger numerous times is the most effective way to comprehend the code. This supports the hypothesis that debugging is used to both understand the source code and find bugs.

By examining how developers use IDEs, it is possible to uncover patterns of programmer behavior during debugging and identify the issues they face.

Collaborative interaction. We have identified 8 tools to help you understand collaborative interaction [6, 13, 17–20, 29, 45].

These tools make it easier for team members to keep track of each other's work and give them fast access to important information for group communication. They provide details about the files that other members of the team are working on and changing. Such information includes which code files are being modified, who is modifying them, and how they are being used.

The developer can use such a tool to see which team members are looking at which files, methods, and classes are now being changed.

These tools integrate collaboration features like text and VoIP chat to the programming environment. It displays which people are online as well as whether or not they are editing or debugging.

These tools are extensible, which means that they can be enhanced and integrated into other systems.

The key challenge these technologies confront is finding a balance between giving essential information about team members' actions while not overburdening developers with useless data.

Recommendations. The majority of research have created their own artifacts for designing and performing experiments that are not publicly available. As a result, they cannot be used to reproduce investigations or run new experiments. As a result, researchers should make their data available to other researchers who want to replicate their find-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ings, while accurately disclosing the criteria and elements they used to design and execute the investigations.

Usage data can be useful, but developers may have some concerns about the privacy of the data being collected and to whom the data is shared. These worries emerge mostly because the information gathered could disclose specific developers or portions of the source code that organizations are developing.

Steps such as encryption of critical pieces of information can be implemented to reduce worries about the confidentiality of obtained data. Developer names, window headers, file names, and source code identifiers, for example, might be hashed to obfuscate the data and limit the danger of acquiring information identifying the developer or the projects and code they are working on.

Originality and practical value

The tools for tracking programmer activity in an integrated development environment were systematized and studied for the first time.

This systematic literature review complements existing research on tools that track developer interactions with the integrated development environment in three ways:

1. An examination and demonstration of all twenty-first-century tools.
2. A summary of tool development issues that have been resolved.
3. Making recommendations for future research.

We believe that conducting this systematic literature review at this time is crucial because it brings together all of the past research and can help researchers avoid misusing IDE use tracking technology in software engineering research.

As a result, it can serve as a starting point for future research into programmer behavior in an integrated development environment.

Conclusions

We conducted a systematic literature review to determine the current state of tools that track developer interactions with integrated development environments. We found 55 papers that were related to the creation of a tool for tracking developer engagement in IDEs. We also provided advice to the software development community and a list of ideas for academics interested in developing a tool to track developer activity.

Our findings contribute to a better understanding of where programming behavior research in integrated development environments stands right now. An examination of the research findings can assist in the development of a research agenda, which can subsequently be used to create a new practical tool.

The research community continues to be highly active in developing methods to track developer activity. Further research in this area is needed to better understand and evaluate programmer behavior, according to the findings.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Amann S., Proksch S., Nadi S. FeedBaG : An interaction tracker for Visual Studio. *2016 IEEE 24th International Conference on Program Comprehension (ICPC)* (Austin, 16–17 May 2016). Austin, 2016. P. 1–3. DOI: <http://doi.org/10.1109/icpc.2016.7503741>
2. Antal G., Végh Á. Z., Bilicki V. A methodology for measuring software development productivity using Eclipse IDE. *Proceedings of the 9th International Conference on Applied Informatics* (Eger, Jan. 29–Feb. 1 2014). Eger, 2014. Vol. 2. P. 255–262. DOI: <http://doi.org/10.14794/icaei.9.2014.2.255>
3. Bao L., Ye D., Xing Z., Xia X., Wang X. ActivitySpace : A Remembrance Framework to Support Interapplication Information Needs. *2015 30th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)* (Lincoln, 9–13 Nov. 2015). Lincoln, 2015. P. 864–869. DOI: <http://doi.org/10.1109/ase.2015.90>
4. Beller M., Gousios G., Panichella A., Zaidman A. When, how, and why developers (do not) test in their IDEs. *Proceedings of the 2015 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering* (August 2015). 2015. P. 179–190. DOI: <http://doi.org/10.1145/2786805.2786843>
5. Beller M., Spruit N., Spinellis D., Zaidman A. On the dichotomy of debugging behavior among programmers. *Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering* (May 2018). 2018. P. 572–583. DOI: <http://doi.org/10.1145/3180155.3180175>

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

6. Biehl J. T., Czerwinski M., Smith G. Robertson G. G. FASTDash : a visual dashboard for fostering awareness in software teams. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (April 2007). 2007. P. 1313–1322. DOI: <http://doi.org/10.1145/1240624.1240823>
7. Bielíková M., Polášek I., Barla M., Kuric E., Rástočný K., Tvarožek J., Lacko P. Platform Independent Software Development Monitoring : Design of an Architecture. *SOFSEM 2014 : Theory and Practice of Computer Science*. 2014. Vol. 8327. P. 126–137. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-04298-5_12
8. Caldeira J., Brito e Abreu F., Cardoso J., Ribeiro R., Werner C. Profiling Software Developers with Process Mining and N-Gram Language Models. *Arxiv*. 2021. URL: <http://arxiv.org/abs/2101.06733v1>
9. Damevski K., Shepherd D. C., Schneider J., Pollock L. Mining Sequences of Developer Interactions in Visual Studio for Usage Smells. *IEEE Transactions on Software Engineering* (1 Apr. 2017). 2017. Vol. 43. Iss. 4. P. 359–371. DOI: <http://doi.org/10.1109/tse.2016.2592905>
10. Dias M., Cassou D., Ducasse S. Representing code history with development environment events. *IWST-2013 – 5th International Workshop on Smalltalk Technologies*. 2013. P. 1–7.
11. Ebraert P., Vallejos J., Costanza P., Van Paesschen E., D'Hondt T. Change-oriented software engineering. *Proceedings of the 2007 international conference on Dynamic languages : in conjunction with the 15th International Smalltalk Joint Conference 2007* (August 2007). 2007. P. 3–24. DOI: <http://doi.org/10.1145/1352678.1352680>
12. Foster S. R., Griswold W. G., Lerner S. WitchDoctor : IDE support for real-time auto-completion of refactorings. *2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (Zurich, 2-9 June 2012). Zurich, 2012. P. 222–232. DOI: <http://doi.org/10.1109/icse.2012.6227191>
13. Frost R. Jazz and the Eclipse Way of Collaboration. *IEEE Software* (Nov.-Dec. 2007). 2007. Vol. 24. Iss. 6. P. 114–117. DOI: <http://doi.org/10.1109/ms.2007.170>
14. Ge X., DuBose Q. L., Murphy-Hill E. Reconciling manual and automatic refactoring. *2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (Zurich, 2-9 June 2012). Zurich, 2012. P. 211–221. DOI: <http://doi.org/10.1109/icse.2012.6227192>
15. Gu Z., Schleck D., Barr E. T., Su Z. Capturing and Exploiting IDE Interactions. *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming & Software* (October 2014). 2014. P. 83–94. DOI: <http://doi.org/10.1145/2661136.2661144>
16. Guarnera D. T., Bryant C. A., Mishra A., Maletic J. I., Sharif B. iTrace : Eye tracking infrastructure for development environments. *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications* (June 2018). 2018. № 105. P. 1–3. DOI: <http://doi.org/10.1145/3204493.3208343>
17. Guzzi A., Pinzger M., van Deursen A. Combining micro-blogging and IDE interactions to support developers in their quests. *2010 IEEE International Conference on Software Maintenance* (Timisoara, 12-18 Sept. 2010). Timisoara, 2010. P. 1–5. DOI: <http://doi.org/10.1109/icsm.2010.5609683>
18. Hattori L., Lanza M. Syde : a tool for collaborative software development. *Proceedings of the 32nd ACM/IEEE International Conference on Software Engineering* (May 2010). 2010. Vol. 2. P. 235–238. DOI: <http://doi.org/10.1145/1810295.1810339>
19. Hegde R., Dewan P. Connecting Programming Environments to Support Ad-Hoc Collaboration. *2008 23rd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering* (L'Aquila, 15-19 Sept. 2008). L'Aquila, 2008. P. 178–187. DOI: <http://doi.org/10.1109/ase.2008.28>
20. Hundhausen C. D., Carter A. S. Supporting Social Interactions and Awareness in Educational Programming Environments. *Proceedings of the 5th Workshop on Evaluation and Usability of Programming Languages and Tools* (October 2014). 2014. P. 55–56. DOI: <http://doi.org/10.1145/2688204.2688215>
21. Ioannou C., Burattin A., Weber B. Mining Developers' Workflows from IDE Usage. *Advanced Information Systems Engineering Workshops*. 2018. Vol. 316. P. 167–179. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-92898-2_14
22. Jaspan C., Jorde M., Egelman C., Green C., Holtz B., Smith E., Hodges M., Knight A., Kammer L., Dicker J., Sadowski C., Lin J., Cheng L., Canning M., Murphy-Hill E. Enabling the Study of Software Development Behavior With Cross-Tool Logs. *IEEE Software* (Nov.-Dec. 2020). 2020. Vol. 37. Iss. 6. P. 44–51. DOI: <http://doi.org/10.1109/ms.2020.3014573>
23. Jekutsch S. *ElectroCodeoGram : An Environment for Studying Programming*. URL: <http://www.mi.fu-berlin.de/wiki/pub/SE/ElectroCodeoGram/lancaster.pdf>
24. Johnson P. M., Hongbing K., Agustin J., Chan C., Moore C., Miglani J., Shenyan Zh., Doane W. E. J. Beyond the Personal Software Process : Metrics collection and analysis for the differently disciplined. *25th Interna-*

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- tional Conference on Software Engineering, 2003. *Proceedings* (Portland, 3-10 May 2003). Portland, 2003. P. 641–646. DOI: <http://doi.org/10.1109/icse.2003.1201249>
25. Kitchenham B. A., Charters S. *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. URL: <https://userpages.uni-koblenz.de/~laemmel/esecourse/slides/slr.pdf>
 26. Kobayashi T., Kato N., Agusa K. Interaction histories mining for software change guide. *2012 Third International Workshop on Recommendation Systems for Software Engineering (RSSE)* (Zurich, 4 June 2012). Zurich, 2012. P. 73–77. DOI: <http://doi.org/10.1109/rsse.2012.6233415>
 27. Lijie Z., Godfrey M. W., Hassan A. E. Detecting Interaction Coupling from Task Interaction Histories. *15th IEEE International Conference on Program Comprehension (ICPC '07)* (Banff, 26-29 June 2007). Banff, 2007. P. 135–144. DOI: <http://doi.org/10.1109/icpc.2007.18>
 28. Lyulina E., Birillo A., Kovalenko V., Bryksin T. TaskTracker-tool : A Toolkit for Tracking of Code Snapshots and Activity Data During Solution of Programming Tasks. *Proceedings of the 52nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education* (March 2021). 2021. P. 495–501. DOI: <http://doi.org/10.1145/3408877.3432534>
 29. Maalej W., Happel H.-J. A Lightweight Approach for Knowledge Sharing in Distributed Software Teams. *Practical Aspects of Knowledge Management*. Vol. 5345. P. 14–25. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-540-89447-6_4
 30. Maruyama K., Hayashi S., Omori T. ChangeMacroRecorder : Recording fine-grained textual changes of source code. *2018 IEEE 25th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)* (Campobasso, 20-23 March 2018). Campobasso, 2018. P. 537–541. DOI: <http://doi.org/10.1109/saner.2018.8330255>
 31. Matsuzawa Y., Okada K., Sakai S. Programming process visualizer : A proposal of the tool for students to observe their programming process. *Proceedings of the 18th ACM conference on Innovation and technology in computer science education* (July 2013). 2013. P. 46–51. DOI: <http://doi.org/10.1145/2462476.2462493>
 32. McIntyre M. M., Walker R. J. Assisting potentially-repetitive small-scale changes via semi-automated heuristic search. *Proceedings of the twenty-second IEEE/ACM international conference on Automated software engineering* (November 2007). 2007. P. 497–500. DOI: <http://doi.org/10.1145/1321631.1321718>
 33. McKeogh J., Exton C. Eclipse plug-in to monitor the programmer behaviour. *Proceedings of the 2004 OOPSLA workshop on eclipse technology eXchange* (October 2004). 2004. P. 93–97. DOI: <http://doi.org/10.1145/1066129.1066148>
 34. Minelli R., Lanza M. Visualizing the workflow of developers. *2013 First IEEE Working Conference on Software Visualization (VISOFT)* (Eindhoven, 27-28 Sept. 2013). Eindhoven, 2013. P. 1–4. DOI: <http://doi.org/10.1109/vissoft.2013.6650531>
 35. Murphy G. C., Kersten M., Findlater L. How are Java software developers using the Eclipse IDE? *IEEE Software* (July-Aug. 2006). 2006. Vol. 23. Iss. 4. P. 76–83. DOI: <http://doi.org/10.1109/ms.2006.105>
 36. Negara S., Vakilian M., Chen N., Johnson R. E., Dig D. Is It Dangerous to Use Version Control Histories to Study Source Code Evolution? *ECOOP 2012 – Object-Oriented Programming*. Berlin, 2012. Vol. 7313. P. 79–103. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-642-31057-7_5
 37. Norris C., Barry F., Fenwick Jr. J. B., Reid K., Rountree J. ClockIt : collecting quantitative data on how beginning software developers really work. *ACM SIGCSE Bulletin*. 2008. Vol. 40. Iss. 3. P. 37–41. DOI: <http://doi.org/10.1145/1597849.1384284>
 38. Omori T., Maruyama K. A change-aware development environment by recording editing operations of source code. *Proceedings of the 2008 international working conference on Mining software repositories* (May 2008). 2008. P. 31–34. DOI: <http://doi.org/10.1145/1370750.1370758>
 39. Pärtel M., Luukkainen M., Vihavainen A., Vikberg T. Test My Code. *International Journal of Technology Enhanced Learning (IJTEL)*. 2013. Vol. 5, № 3/4. P. 271. DOI: <http://doi.org/10.1504/ijtel.2013.059495>
 40. Parnin C., Gorg C. Building Usage Contexts During Program Comprehension. *14th IEEE International Conference on Program Comprehension (ICPC'06)* (Athens, 14-16 June 2006). Athens, 2006. P. 13–22. DOI: <http://doi.org/10.1109/icpc.2006.14>
 41. Petrillo F., Soh Z., Khomh F., Pimenta M., Freitas C., Gueheneuc Y.-G. Towards Understanding Interactive Debugging. *2016 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)* (Vienna, 1-3 Aug. 2016). Vienna, 2016. P. 152–163. DOI: <http://doi.org/10.1109/qrs.2016.27>
 42. Proksch S., Nadi S., Amann S., Mezini M. Enriching in-IDE process information with fine-grained source code history. *2017 IEEE 24th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering*

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- (SANER) (Klagenfurt, 20-24 Feb. 2017). Klagenfurt, 2017. P. 250–260.
DOI: <http://doi.org/10.1109/saner.2017.7884626>
43. Robbes R., Lanza, M. SpyWare : a change-aware development toolset. *Proceedings of the 30th international conference on Software engineering* (May 2008). 2008. P. 847–850.
DOI: <http://doi.org/10.1145/1368088.1368219>
 44. Rothlisberger D., Nierstrasz O., Ducasse S., Pollet D., Robbes R. Supporting task-oriented navigation in IDEs with configurable HeatMaps. *2009 IEEE 17th International Conference on Program Comprehension* (Vancouver, 17-19 May 2009). Vancouver, 2009. P. 253–257. DOI: <http://doi.org/10.1109/icpc.2009.5090052>
 45. Salinger S., Oezbek C., Beecher K., Schenk J. Saros : an eclipse plug-in for distributed party programming. *Proceedings of the 2010 ICSE Workshop on Cooperative and Human Aspects of Software Engineering* (May 2010). 2010. P. 48–55. DOI: <http://doi.org/10.1145/1833310.1833319>
 46. Shron Y. *EclipseEye Spying onEclipse*.
URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=064DE0D8481B3C9FD39F875EA79AD59C?doi=10.1.1.709.9455&rep=rep1&type=pdf>
 47. Shin H., Choi H.-J., Baik J. Jasmine : A PSP Supporting Tool. *Software Process Dynamics and Agility*. 2007. Vol. 4470. P. 73–83. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-540-72426-1_7
 48. Shynkarenko V., Zhevago, O. Visualization of program development process. *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (Lviv, 17-20 Sept. 2019). Lviv, 2019. P. 142–145. DOI: <http://doi.org/10.1109/stc-csit.2019.8929774>
 49. Shynkarenko V., Zhevago O. Development of a toolkit for analyzing software debugging processes using the constructive approach. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5. Iss. 2 (107). P. 29–38. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215090>
 50. Sillitti J., Succi, Vernazza. Collecting, integrating and analyzing software metrics and personal software process data. *2003 Proceedings 29th Euromicro Conference* (Belek-Antalya, 1-6 Sept. 2003). Belek-Antalya, 2003. P. 336–342. DOI: <http://doi.org/10.1109/eurmic.2003.1231611>
 51. Sison R. Personal software process (PSP) assistant. *12th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC'05)* (Taipei, 15-17 Dec. 2005). Taipei, 2005. P. 8. DOI: <http://doi.org/10.1109/apsec.2005.87>
 52. Snipes W., Nair A. R., Murphy-Hill E. Experiences gamifying developer adoption of practices and tools. *Companion Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering* (May 2014). 2014. P. 105–114. DOI: <http://doi.org/10.1145/2591062.2591171>
 53. Soetens Q. D., Demeyer S. ChEOPJSJ : Change-Based Test Optimization. *2012 16th European Conference on Software Maintenance and Reengineering* (Szeged, 27-30 March 2012). Szeged, 2012. P. 535–538. DOI: <http://doi.org/10.1109/csmr.2012.70>
 54. Steinert B., Cassou D., Hirschfeld R. CoExist : Overcoming Aversion to Change Preserving Immediate Access to Source Code and Run-time Information of Previous Development States. *ACM SIGPLAN Notices*. 2013. Vol. 48. Iss. 2. P. 107–118. DOI: <http://doi.org/10.1145/2480360.2384591>
 55. Yoon Y., Myers B. A. Capturing and analyzing low-level events from the code editor. *Proceedings of the 3rd ACM SIGPLAN workshop on Evaluation and usability of programming languages and tools* (October 2011). 2011. P. 25–30. DOI: <http://doi.org/10.1145/2089155.2089163>
 56. Yuan X., Vega P., Yu H., Li Y. *A Personal Software Process Tool for Eclipse Environment*. 2005.
URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.1638&rep=rep1&type=pdf>

О. О. ЖЕВАГО^{1*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта marakonec@gmail.com, ORCID 0000-0003-0019-8320

Огляд інструментів збору даних про процеси розробки та налагодження програмного забезпечення з інтегрованих середовищ розробки

Мета. У цій статті передбачено провести огляд літератури, опублікованої у двадцять першому столітті, із метою виявлення та аналізу поточного стану інструментів, які відслідковують взаємодію розробників з інтегрованими середовищами розробки, а також надати рекомендації для подальших досліджень на основі поточного стану. **Методика.** Шляхом систематичного пошуку в п'яти електронних бібліотеках ми провели детальний огляд літератури щодо інструментів збору даних з інтегрованих середовищ розробки. Було відібрано 55 інструментів. **Результати.** Аналіз отриманих інструментів показує, що використання інтегрованого середовища розробки для збору даних дозволяє краще зрозуміти дії розробників, ніж це було можливо раніше. Дані із середовищ розробки дозволяють нам аналізувати, як розробники проводять свій час, дізнатися більше про те, як вони створюють ментальні моделі, досліджують код, проводять міні експерименти, роблячи спроби й допускаючи помилки, а також з'ясувати, що може допомогти кожному підвищити продуктивність. Дослідницьке товариство продовжує розробляти інструменти для відслідкування активності розробників. Отримані дані свідчать, що в цій галузі необхідні додаткові дослідження, щоб краще зрозуміти поведінку програмістів. **Наукова новизна.** Уперше проведено систематизацію та аналіз інструментів відслідкування поведінки програміста в інтегрованому середовищі розробки. **Практична значимість.** Отримані результати сприяють кращому розумінню поточного стану досліджень поведінки програмістів в інтегрованих середовищах розробки та можуть допомогти визначити план як відправну точку для створення нового практичного інструменту.

Ключові слова: процес розробки програмного забезпечення; налагодження; інтегроване середовище розробки; огляд літератури

REFERENCES

1. Amann, S., Proksch, S., & Nadi, S. (2016). FeedBaG: An interaction tracker for Visual Studio. In *2016 IEEE 24th International Conference on Program Comprehension (ICPC)* (pp. 1-3). Austin, USA. DOI: <http://doi.org/10.1109/icpc.2016.7503741> (in English)
2. Antal, G., Végh, Á. Z., & Bilicki, V. (2014). A methodology for measuring software development productivity using Eclipse IDE. In *Proceedings of the 9th International Conference on Applied Informatics* (Vol. 2, pp. 252-262). Eger, Hungary. DOI: <http://doi.org/10.14794/ica.9.2014.2.255> (in English)
3. Bao, L., Ye, D., Xing, Z., Xia, X., & Wang, X. (2015). ActivitySpace: A Remembrance Framework to Support Interapplication Information Needs. In *2015 30th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)* (pp. 864-869). Lincoln, USA. DOI: <http://doi.org/10.1109/ase.2015.90> (in English)
4. Beller, M., Gousios, G., Panichella, A., & Zaidman, A. (2015). When, how, and why developers (do not) test in their IDEs. In *Proceedings of the 2015 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering* (pp. 179-190). DOI: <http://doi.org/10.1145/2786805.2786843> (in English)
5. Beller, M., Spruit, N., Spinellis, D., & Zaidman, A. (2018). On the dichotomy of debugging behavior among programmers. In *Proceedings of the 40th International Conference on Software Engineering* (pp. 572-583). DOI: <http://doi.org/10.1145/3180155.3180175> (in English)
6. Biehl, J. T., Czerwinski, M., Smith, G., & Robertson, G. G. (2007). FASTDash: a visual dashboard for fostering awareness in software teams. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1313-1322). DOI: <http://doi.org/10.1145/1240624.1240823> (in English)
7. Bieliková, M., Polášek, I., Barla, M., Kuric, E., Rástočný, K., Tvarožek, J., & Lacko, P. (2014). Platform Independent Software Development Monitoring: Design of an Architecture. In *SOFSEM 2014: Theory and Practice of Computer Science* (Vol. 8327, pp. 126-137). DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-04298-5_12 (in English)
8. Caldeira, J., Brito e Abreu, F., Cardoso, J., Ribeiro, R., & Werner, C. (2021). Profiling Software Developers with Process Mining and N-Gram Language Models. Arxiv. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2101.06733v1> (in English)
9. Damevski, K., Shepherd, D. C., Schneider, J., & Pollock, L. (2017). Mining Sequences of Developer Interactions in Visual Studio for Usage Smells. *IEEE Transactions on Software Engineering* (Vol. 43, Iss. 4, P. 359-371). DOI: <http://doi.org/10.1109/tse.2016.2592905> (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

10. Dias, M., Cassou, D., & Ducasse, S. (2013). Representing code history with development environment events. *IWST-2013 - 5th International Workshop on Smalltalk Technologies*, 1-7. (in English)
11. Ebraert, P., Vallejos, J., Costanza, P., Van Paesschen, E., & D'Hondt, T. (2007). Change-oriented software engineering. In *Proceedings of the 2007 international conference on Dynamic languages: in conjunction with the 15th International Smalltalk Joint Conference 2007* (pp. 3-24). DOI: <http://doi.org/10.1145/1352678.1352680> (in English)
12. Foster, S. R., Griswold, W. G., & Lerner, S. (2012). WitchDoctor: IDE support for real-time auto-completion of refactorings. In *2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 22-232). Zurich, Switzerland. DOI: <http://doi.org/10.1109/icse.2012.6227191> (in English)
13. Frost, R. (2007). Jazz and the Eclipse Way of Collaboration. In *IEEE Software* (Vol. 24, Iss. 6, pp. 114-117). DOI: <http://doi.org/10.1109/ms.2007.170> (in English)
14. Ge, X., DuBose, Q. L., & Murphy-Hill, E. (2012). Reconciling manual and automatic refactoring. In *2012 34th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 211-221). Zurich, Switzerland. DOI: <http://doi.org/10.1109/icse.2012.6227192> (in English)
15. Gu, Z., Schleck, D., Barr, E. T., & Su, Z. (2012). Capturing and Exploiting IDE Interactions. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming & Software* (pp. 83-94). DOI: <http://doi.org/10.1145/2661136.2661144> (in English)
16. Guarnera, D. T., Bryant, C. A., Mishra, A., Maletic, J. I., & Sharif, B. (2018). iTrace: Eye tracking infrastructure for development environments. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications* (No 105, pp. 1-3). DOI: <http://doi.org/10.1145/3204493.3208343> (in English)
17. Guzzi, A., Pinzger, M., & van Deursen, A. (2010). Combining micro-blogging and IDE interactions to support developers in their quests. In *2010 IEEE International Conference on Software Maintenance* (pp. 1-5). Timisoara, Romania. DOI: <http://doi.org/10.1109/icsm.2010.5609683> (in English)
18. Hattori, L., & Lanza, M. (2010). Syde: a tool for collaborative software development. In *Proceedings of the 32nd ACM/IEEE International Conference on Software Engineering* (Vol. 2, pp. 235-238). DOI: <http://doi.org/10.1145/1810295.1810339> (in English)
19. Hegde, R., & Dewan, P. (2008). Connecting Programming Environments to Support Ad-Hoc Collaboration. In *2008 23rd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering* (pp. 178-187). L'Aquila, Italy. DOI: <http://doi.org/10.1109/ase.2008.28> (in English)
20. Hundhausen, C. D., & Carter, A. S. (2014). Supporting Social Interactions and Awareness in Educational Programming Environments. In *Proceedings of the 5th Workshop on Evaluation and Usability of Programming Languages and Tools* (pp. 55-56). DOI: <http://doi.org/10.1145/2688204.2688215> (in English)
21. Ioannou, C., Burattin, A., & Weber, B. (2018). Mining Developers' Workflows from IDE Usage. *Advanced Information Systems Engineering Workshops*, 316, 167-179. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-92898-2_14 (in English)
22. Jasan, C., Jorde, M., Egelman, C., Green, C., Holtz, B., Smith, E., ... & Murphy-Hill, E. (2020). Enabling the Study of Software Development Behavior With Cross-Tool Logs. *IEEE Software* (Vol. 37, Iss. 6, pp. 44-51). DOI: <http://doi.org/10.1109/ms.2020.3014573> (in English)
23. Jekutsch, S. *ElectroCodeoGram: An Environment for Studying Programming*. Retrieved from <http://www.mi.fu-berlin.de/wiki/pub/SE/ElectroCodeoGram/lancaster.pdf> (in English)
24. Johnson, P. M., Hongbing Kou, Agustin, J., Chan, C., Moore, C., Miglani, J., ... & Doane. (2003). Beyond the Personal Software Process: Metrics collection and analysis for the differently disciplined. In *25th International Conference on Software Engineering, 2003. Proceedings* (pp. 641-646). Portland, USA. DOI: <http://doi.org/10.1109/icse.2003.1201249> (in English)
25. Kitchenham, B. A. & Charters, S. *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. Retrieved from <https://userpages.uni-koblenz.de/~laemmel/esecourse/slides/slr.pdf> (in English)
26. Kobayashi, T., Kato, N., & Agusa, K. (2012). Interaction histories mining for software change guide. In *2012 Third International Workshop on Recommendation Systems for Software Engineering (RSSE)* (pp. 73-77). Zurich, Switzerland. DOI: <http://doi.org/10.1109/rsse.2012.6233415> (in English)
27. Lijie Z., Godfrey, M. W., & Hassan, A. E. (2007). Detecting Interaction Coupling from Task Interaction Histories. In *15th IEEE International Conference on Program Comprehension (ICPC '07)* (pp. 135-144). Banff, Canada. DOI: <http://doi.org/10.1109/icpc.2007.18> (in English)
28. Lyulina, E., Birillo, A., Kovalenko, V., & Bryksin, T. (2021). TaskTracker-tool: A Toolkit for Tracking of Code Snapshots and Activity Data During Solution of Programming Tasks. In *Proceedings of the 52nd ACM*

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

- Technical Symposium on Computer Science Education* (pp. 495-501).
DOI: <http://doi.org/10.1145/3408877.3432534> (in English)
29. Maalej, W., & Happel, H.-J. (2008). A Lightweight Approach for Knowledge Sharing in Distributed Software Teams. In *Practical Aspects of Knowledge Management* (Vol. 5345, pp. 14-25).
DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-540-89447-6_4 (in English)
 30. Maruyama, K., Hayashi, S., & Omori, T. (2018). ChangeMacroRecorder: Recording fine-grained textual changes of source code. In *2018 IEEE 25th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)* (pp. 537-541). Campobasso, Italy. DOI: <http://doi.org/10.1109/saner.2018.8330255> (in English)
 31. Matsuzawa, Y., Okada, K., & Sakai, S. (2013). Programming process visualizer: A proposal of the tool for students to observe their programming process. In *Proceedings of the 18th ACM conference on Innovation and technology in computer science education* (pp. 46-51). DOI: <http://doi.org/10.1145/2462476.2462493> (in English)
 32. McIntyre, M. M., & Walker, R. J. (2007). Assisting potentially-repetitive small-scale changes via semi-automated heuristic search. In *Proceedings of the twenty-second IEEE/ACM international conference on Automated software engineering* (pp. 497-500). DOI: <http://doi.org/10.1145/1321631.1321718> (in English)
 33. McKeogh, J., & Exton, C. (2004). Eclipse plug-in to monitor the programmer behaviour. In *Proceedings of the 2004 OOPSLA workshop on eclipse technology eXchange* (pp. 93-97). DOI: <http://doi.org/10.1145/1066129.1066148> (in English)
 34. Minelli, R., & Lanza, M. (2013). Visualizing the workflow of developers. In *2013 First IEEE Working Conference on Software Visualization (VISOFT)* (pp. 1-4). Eindhoven, Netherlands.
DOI: <http://doi.org/10.1109/vissoft.2013.6650531> (in English)
 35. Murphy, G. C., Kersten, M., & Findlater, L. (2006). How are Java software developers using the Eclipse IDE? *IEEE Software* (Vol. 23, Iss. 4, pp. 76-83). DOI: <http://doi.org/10.1109/ms.2006.105> (in English)
 36. Negara, S., Vakilian, M., Chen, N., Johnson, R. E., & Dig, D. (2012). Is It Dangerous to Use Version Control Histories to Study Source Code Evolution? In *ECOOP 2012-Object-Oriented Programming* (Vol. 7313, pp. 79-103). Berlin, Heidelberg. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-642-31057-7_5 (in English)
 37. Norris, C., Barry, F., Fenwick Jr., J. B., Reid, K., & Rountree, J. (2008). ClockIt: collecting quantitative data on how beginning software developers really work. *ACM SIGCSE Bulletin*, 40(3), 37-41.
DOI: <http://doi.org/10.1145/1597849.1384284> (in English)
 38. Omori, T., & Maruyama, K. (2008). A change-aware development environment by recording editing operations of source code. In *Proceedings of the 2008 international working conference on Mining software repositories* (pp. 31-34). DOI: <http://doi.org/10.1145/1370750.1370758> (in English)
 39. Pärtel, M., Luukkainen, M., Vihavainen, A., & Vikberg, T. (2013). Test My Code. *International Journal of Technology Enhanced Learning (IJTEL)*, 5(3/4), 271. DOI: <http://doi.org/10.1504/ijtel.2013.059495> (in English)
 40. Parnin, C., & Gorg, C. Building Usage Contexts During Program Comprehension. In *14th IEEE International Conference on Program Comprehension (ICPC'06)* (pp. 13-22). Athens, Greece.
DOI: <http://doi.org/10.1109/icpc.2006.14> (in English)
 41. Petrillo, F., Soh, Z., Khomh, F., Pimenta, M., Freitas, C., & Gueheneuc, Y.-G. (2016). Towards Understanding Interactive Debugging. In *2016 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)* (pp. 152-163). Vienna, Austria. DOI: <http://doi.org/10.1109/qrs.2016.27> (in English)
 42. Proksch, S., Nadi, S., Amann, S., & Mezini, M. (2017). Enriching in-IDE process information with fine-grained source code history. In *2017 IEEE 24th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)* (pp. 250-260). Klagenfurt, Austria. DOI: <http://doi.org/10.1109/saner.2017.7884626> (in English)
 43. Robbes, R., & Lanza, M. (2008). SpyWare: a change-aware development toolset. In *Proceedings of the 30th international conference on Software engineering* (pp. 847-850).
DOI: <http://doi.org/10.1145/1368088.1368219> (in English)
 44. Rothlisberger, D., Nierstrasz, O., Ducasse, S., Pollet, D., & Robbes, R. (2009). Supporting task-oriented navigation in IDEs with configurable HeatMaps. In *2009 IEEE 17th International Conference on Program Comprehension* (pp. 253-257). Vancouver, Canada. DOI: <http://doi.org/10.1109/icpc.2009.5090052> (in English)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

45. Salinger, S., Oezbek, C., Beecher, K., & Schenk, J. (2010). Saros: an eclipse plug-in for distributed party programming. In *Proceedings of the 2010 ICSE Workshop on Cooperative and Human Aspects of Software Engineering* (pp. 48-55). DOI: <http://doi.org/10.1145/1833310.1833319> (in English)
46. Sharon, Y. *EclipseEye Spying onEclipse*. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=064DE0D8481B3C9FD39F875EA79AD59C?doi=10.1.1.709.9455&rep=rep1&type=pdf> (in English)
47. Shin, H., Choi, H.-J., & Baik, J. Jasmine: A PSP Supporting Tool. In *Software Process Dynamics and Agility* (Vol. 4470, pp. 73-83). DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-540-72426-1_7 (in English)
48. Shynkarenko, V., & Zhevago, O. (2019). Visualization of program development process. In *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 142-145). Lviv, Ukraine. DOI: <http://doi.org/10.1109/stc-csit.2019.8929774> (in English)
49. Shynkarenko, V., & Zhevago, O. (2020). Development of a toolkit for analyzing software debugging processes using the constructive approach. *Eastern-european Journal of Enterprise Technologies*, 5(2(107)), 29-38. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215090> (in English)
50. Sillitti, J., Succi, & Vernazza. (2003). Collecting, integrating and analyzing software metrics and personal software process data. In *2003 Proceedings 29th Euromicro Conference* (pp. 336-342). Belek-Antalya, Turkey. DOI: <http://doi.org/10.1109/eurmic.2003.1231611> (in English)
51. Sison, R. (2005). Personal software process (PSP) assistant. In *12th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC'05)* (pp. 8). Taipei, Taiwan. DOI: <http://doi.org/10.1109/apsec.2005.87> (in English)
52. Snipes, W., Nair, A. R., & Murphy-Hill, E. (2014). Experiences gamifying developer adoption of practices and tools. In *Companion Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering* (pp. 105-114). DOI: <http://doi.org/10.1145/2591062.2591171> (in English)
53. Soetens, Q. D., & Demeyer, S. (2012). ChEOPJS: Change-Based Test Optimization. In *2012 16th European Conference on Software Maintenance and Reengineering* (pp. 535-538). Szeged, Hungary. DOI: <http://doi.org/10.1109/csmr.2012.70> (in English)
54. Steinert, B., Cassou, D., & Hirschfeld, R. (2012). CoExist: Overcoming Aversion to Change Preserving Immediate Access to Source Code and Run-time Information of Previous Development States. *ACM SIGPLAN Notices*, 48(2), 107-118. DOI: <http://doi.org/10.1145/2480360.2384591> (in English)
55. Yoon, Y., & Myers, B. A. (2011). Capturing and analyzing low-level events from the code editor. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGPLAN workshop on Evaluation and usability of programming languages and tools* (pp. 25-30). DOI: <http://doi.org/10.1145/2089155.2089163> (in English)
56. Yuan, X., Vega, P., Yu, H., & Li, Y. (2005). *A Personal Software Process Tool for Eclipse Environment*. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.121.1638&rep=rep1&type=pdf> (in English)

Received: February 12, 2021

Accepted: June 11, 2021

УДК 004.7:[519.876.5:656.212.5]

В. М. ПАХОМОВА^{1*}, А. О. ОПРЯТНИЙ^{2*}

^{1*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

^{2*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта olkdi@outlook.com, ORCID 0000-0001-7145-9677

Програмна модель для визначення оптимальних маршрутів у комп'ютерній мережі за двоколоніальним мурашиним алгоритмом

Мета. На сучасному етапі в комп'ютерних мережах інформаційно-телекомунікаційної системи (ІТС) залізничного транспорту використовують протокол OSPF, який не дозволяє враховувати декілька метрик під час визначення оптимального маршруту. Тому ми ставимо за мету дослідити можливість організації маршрутизації в комп'ютерних мережах ІТС залізничного транспорту за допомогою двоколоніального мурашиного алгоритму. **Методика.** За програмною моделлю «Two-ACO», створеною мовою Python за двоколоніальним мурашиним алгоритмом, визначено оптимальний маршрут у комп'ютерній мережі. Вхідні дані моделі «Two-ACO»: параметри комп'ютерної мережі (матриця суміжності мережі, кількість маршрутизаторів); параметри мурашиного алгоритму (кількість ітерацій; кількість мурах у колонії; кількість елітних мурах; початковий рівень феромону; коефіцієнт випаровування; параметр для регулювання величини відкладеного феромону). **Результати.** Визначення за програмною моделлю «Two-ACO» оптимального маршруту подано у вигляді графів із зображенням на них оптимальних шляхів: за критерієм сумарної затримки на маршрутизаторах (для першої колонії мурах) та кількістю хопів (для другої колонії мурах). **Наукова новизна.** За створеною програмною моделлю «Two-ACO» для комп'ютерної мережі із 7 маршрутизаторів та 17 каналів проведено дослідження часу визначення оптимального шляху за кількістю звичайних та елітних мурах, значеннями коефіцієнта випаровування та відкладеного феромону. Установлено, що достатньо використовувати кількість мурах, що дорівнює кількості маршрутизаторів, мати в колонії 2 елітних мурах, при цьому вистачає 1 000 ітерацій, коефіцієнта випаровування від 0,2 до 0,7, а відкладеного феромону мурашками близько до одиниці. **Практична значимість.** Створена програмна модель «Two-ACO» з використанням двох колоній мурах за загальною затримкою на маршрутизаторах та кількістю хопів, що складають маршрут, дозволяє паралельно визначити оптимальні маршрути в комп'ютерній мережі залізничного транспорту. З'ясовано, що для комп'ютерної мережі з 15 маршрутизаторів та 17 каналів достатньо мати 30 агентів (двох мурах на вершину), значення феромону, відкладеного агентами, близьке до одиниці, при цьому коефіцієнт випаровування складає 0,4.

Ключові слова: залізничний транспорт; комп'ютерна мережа; маршрутизатор; затримка; двоколоніальний мурашиний алгоритм; феромон; відкладання; випаровування; час пошуку

Вступ

Основним питанням під час функціонування комп'ютерних мереж залізничного транспорту є організація маршрутизації, що досягається на сучасному етапі використанням відомого протоколу OSPF за принципом пошуку найкоротшого шляху. Але такий протокол маршрутизації не може працювати в умовах різкої зміни інтенсивності потоків трафіка, а також зміни конфігурації мережі та врахування декількох метрик визначення оптимального шляху. У зв'язку з цим виникає необхідність в інших

підходах до маршрутизації в комп'ютерних мережах залізничного транспорту, зокрема з використанням мультиагентних методів інтелектуальної оптимізації: мурашиний алгоритм, бджолиний алгоритм, метод часток, метод переміщення бактерій та інші [1–11, 14, 15].

Одним із найбільш розповсюджених є мурашиний алгоритм, першу версію якого запропонував Марко Доріго [9].

У подальшому мурашиний алгоритм для отримання розв'язку різних задач використовували такі вчені: Б. Бульхаймер, К. Гамбарелла, С. Глушко, А. Павленко, Р. Хартл, Х. Хоос,

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

С. Штовба, К. Штраусс, Т. Штютцле та інші. Так, наприклад, у роботі [6] С. Д. Штовба подав результати розв'язку задачі комівояжера для різних модифікацій мурашиного алгоритму. У роботі [2] А. І. Павленко та Ю. П. Титов дослідили стратегії мурашиного алгоритму. С. І. Глушко й Т. В. Какатунова в роботі [1] використовували нечітку модифікацію алгоритму мурашиних колоній.

Автори цієї статті вже надавали розв'язок задачі маршрутизації в інформаційно-телекомунікаційній системі (ІТС) залізничного транспорту з використанням мурашиного методу під час передачі керівних повідомлень, що потребує побудови мінімального кістякового дерева. Однак найчастіше необхідно визначити оптимальний маршрут між заданими вузлами комп'ютерної мережі ІТС, така задача може бути розв'язана як на основі класичного алгоритму, зокрема алгоритму Дейкстри, що лежить в основі протоколу OSPF, так і з використанням нейромережної технології, наприклад, нейронної моделі [13] та нейронечіткої мережі [12]. Але під час використання алгоритму Дейкстри як критерій можна розглянути лише одну метрику, а використання нейромережної технології потребує проведення додаткових досліджень визначення оптимальних параметрів нейронної (нейронечіткої) мережі. Застосування мурашиного алгоритму дозволить визначити оптимальний маршрут у комп'ютерній мережі за різними метриками паралельно, використовуючи одночасно різні колонії мурах.

Ідея мурашиного алгоритму – моделювання поведінки мурах, що пов'язано з їх здатністю швидко знаходити найкоротший шлях від мурашника до джерела їжі та адаптуватися до змінних умов. Під час руху мураха мітить шлях феромоном, і цю інформацію використовують інші мурахи для вибору шляху. Поведінка мурах може мати різний математичний опис, тому існують такі модифікації: Elitist Ant System, Ant-Q, Ant Colony System, Max-min Ant System, ASrank. Відмінними особливостями наявних модифікацій алгоритму є введення елітних му-

рах, механізм виділення та випаровування. На сучасному етапі програмна реалізація мурашиного алгоритму здійснена різними науковцями в Delphi, C++, Java, Maple, MatLAB.

Мета

У цій роботі ми передбачаємо визначити оптимальний маршрут у комп'ютерній мережі залізничного транспорту за двоколоніальним мурашиним алгоритмом, для програмної реалізації якого обрано мову Python, а також з'ясувати параметри мурашиного алгоритму на основі створеної моделі.

Методика

Постановка задачі. Комп'ютерну мережу, що лежить в основі ІТС залізничного транспорту, можна подати як зважений граф $G(V, W)$, де V – множина вершин графа, кількість яких дорівнює B , причому кожна вершина моделює собою вузол (маршрутизатор) мережі; W – множина ребер графа, кожне ребро моделює зв'язок між вузлами; кількість ребер графа дорівнює M . Розглянемо фрагмент такої мережі, зображений на рис. 1 ($B = 15$, $M = 17$). Кожному ребру графа присвоєна певна вага t_{ij} (час передачі пакета по лінії зв'язку від i до j -го маршрутизатора мережі з урахуванням середньої затримки пакета на i -му маршрутизаторі, мкс). Необхідно визначити оптимальний маршрут L_1 між заданими маршрутизаторами комп'ютерної мережі за критерієм:

$$\sum_{(i,j) \in L_1} t_{ij} \rightarrow \min,$$

а оптимальний маршрут L_2 за критерієм:

$$K \rightarrow \min,$$

де K – кількість хопів, що складають маршрут.

Пропонована методика визначає маршрути паралельно (одночасно) з використанням різних колоній мурах.

Fig. 1. Computer network router connection graph

укріплюють феромонну тропу) так і на негативному (випаровування феромонної тропи) зворотному зв'язку, рис. 2.

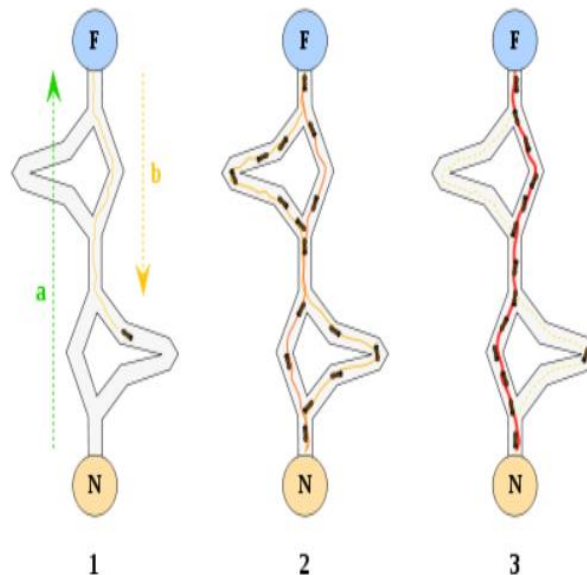


Fig. 2. Routing based on a pheromone

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Математичний апарат. Робота починається з розміщення мурах у вершинах графа, потім відбувається рух мурах – напрям визначають імовірнісним методом на підставі відомої формули:

$$P_i = \frac{l_i^q \cdot f_i^p}{\sum_{k=0}^N l_k^q \cdot f_k^p},$$

де P_i – імовірність переходу шляхом i ; l_i – довжина i -го переходу; f_i – кількість феромонів на i -му переході, q – величина, яка визначає «жадібність» алгоритму; p – величина, яка визначає «стадність» алгоритму, причому $q + p = 1$.

Кількість феромону, який був залишений на кожному ребрі шляху для мурахи k , розраховують за допомогою формули:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{q}{L^k(t)},$$

де $L^k(t)$ – довжина шляху мурахи k на ітерації t .

Для збільшення кількості феромону вздовж кожного ребра пройденого мурахою шляхом, отриманий результат обчислюється за формулою:

$$\tau_{ij}(t+1) = \Delta\tau_{ij}(t) + \tau_{ij}(t).$$

Випаровування феромону визначають за формулою:

$$\tau_{ij}(t) = \tau_{ij}(t) \cdot (1 - \rho),$$

де ρ – коефіцієнт випаровування, що може набувати значення від 0 до 1.

Програмна реалізація мурашиного алгоритму виконана мовою Python з використанням фреймворку для віконних інтерфейсів Qt, а також бібліотек NetworkX та Matplotlib для відображення графів на екран та визначення оптимального маршруту в мережі [3]. У програмі створені класи: NetworkX, що дозволяє представляти мережу як граф, та ACO (Ant Colony Optimization) для роботи з алгоритмом мурашиної оптимізації.

Вхідні параметри моделі: n – кількість маршрутизаторів; $graph$ – матриця суміжності ме-

режі; $iteration$ – кількість ітерацій; $ants$ – кількість мурах у колонії; $elite_ants$ – кількість елітних мурах; $phero_lvl$ – початковий рівень феромону; ro – коефіцієнт випаровування; q – параметр для регулювання величини відкладення феромону.

Результати роботи моделі подають у вигляді графів (Figure1, Figure2) із зображенням на них оптимальних шляхів: за критерієм сумарної затримки на маршрутизаторах (для першої колонії мурах) та кількістю хопів (для другої колонії мурах).

Обмеження, які накладають на програмну модель: коефіцієнт випаровування набуває значення між 0 та 1 (включно); кількість елітних та звичайних мурах не обмежена. Визначено, що за $n > 20$ (кількість маршрутизаторів у мережі) та $iterations > 10\,000$ (кількість ітерацій) програмна модель починає працювати помітно повільніше. Загальна структура програмної моделі «Two-ACO» подана на рис. 3 [3].

У програмі створений клас Network, який дозволяє представляти комп'ютерну мережу як граф. Клас має такі властивості: $routers_num$, що показує кількість маршрутизаторів у графі; $graph$ – матриця суміжності для графа мережі; $cost$ – функція, яка приймає два номери маршрутизаторів як аргументів та повертає затримку.

Клас ACO (Ant Colony Optimization) – клас для роботи з алгоритмом мурашиної оптимізації, що має такі властивості: $iterations$ – кількість ітерацій алгоритму; $ants$ – кількість звичайних мурах у колонії; $elite_ants$ – кількість елітних мурах у колонії; $phero_lvl$ – початковий рівень феромону; a – величина, що визначає «жадібність» алгоритму; b – величина, що визначає «стадність» алгоритму; ro – величина, що визначає «швидкість» випаровування феромону; q – параметр для регулювання величини відкладення феромону, а також такі функції: $init_phero$ – установлює початкову кількість феромону в мережі; $calculate_probs$ – розраховує можливості передачі даних між сусідніми маршрутизаторами; $recalculate_phero$ – функція для коригування рівня феромону, залишеного звичайними мурахами; $recalculate_elite_phero$ – функція для коригування рівня феромону, залишеного елітними мурахами; $path$ – функція, що визначає найкращий шлях між двома маршрутизаторами.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

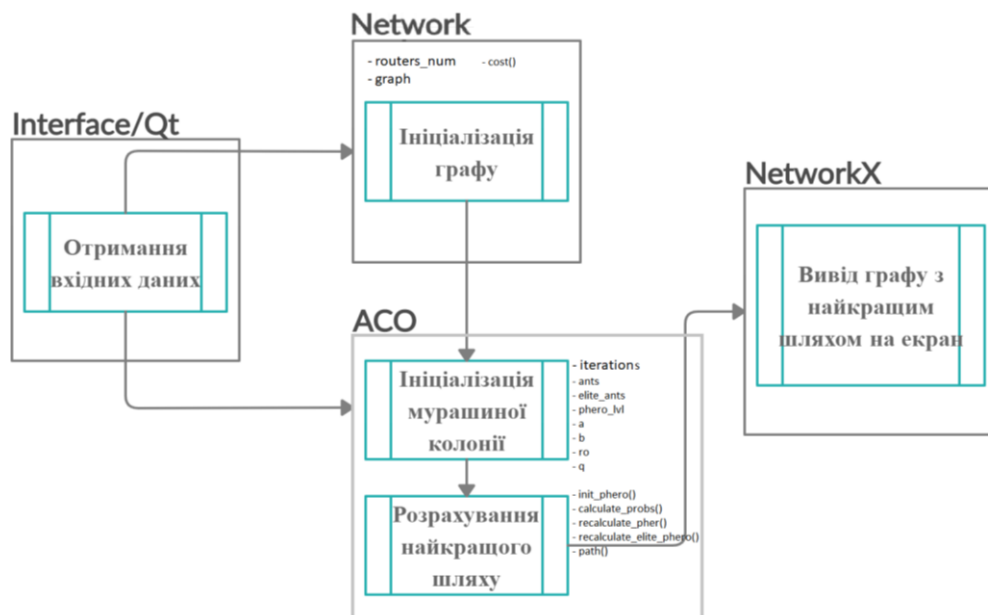


Рис. 3. Загальна структура створеної програмної моделі «Two-ACO»

Fig. 3. General structure of the created Two-ACO software model

Перший можливий випадок. За значень затримок, які вказані на рис. 4, програмна модель «Two-ACO» між вершинами V_0 та V_4 надала оптимальні маршрути (рис. 2): $V_0 \rightarrow V_6 \rightarrow V_4 =$

$2\,120 + 1\,478 = 3\,598$ мкс (Figure1 за першим критерієм); $V_0 \rightarrow V_6 \rightarrow V_4 = 2$ (Figure2 за другим критерієм), при цьому сумарне значення затримок збігається та складає 3 598 мкс.

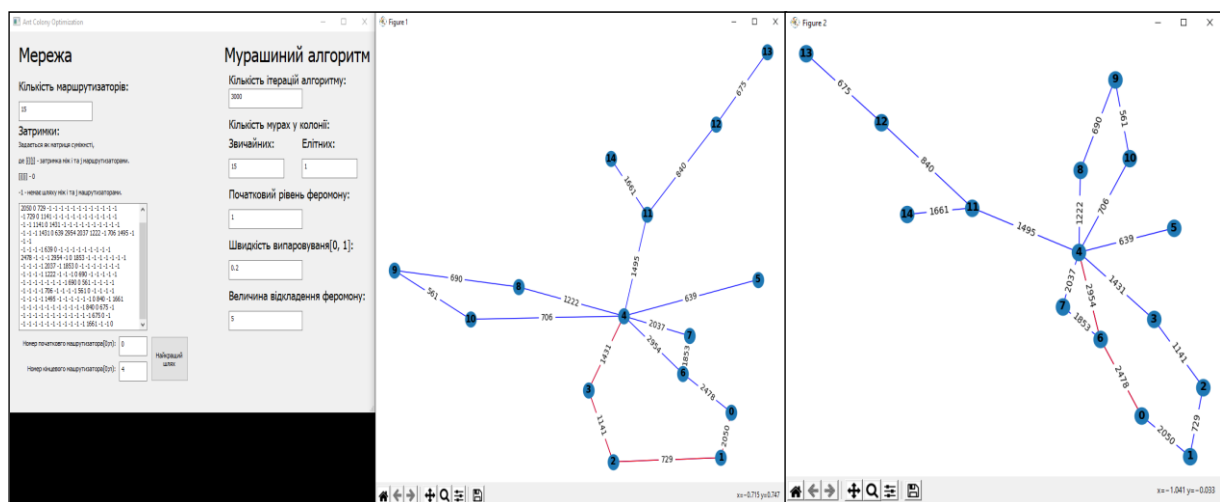


Рис. 4. Визначення за програмною моделлю оптимального маршруту за різними критеріями (за заданих значень затримок на маршрутизаторах)

Fig. 4. Determining the optimal route according to the program model based on various criteria (for set delay values on routers).

Другий можливий випадок. Проведемо запуск програмної моделі зі зміною значень затримок ($V_0 \rightarrow V_6 = 2\,478$ мкс; $V_6 \rightarrow V_4 = 2\,954$

мкс), рис. 5. У цьому випадку програмна модель «Two-ACO» між вершинами V_0 та V_4 надає вже інший оптимальний маршрут (див.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

рис. 5): $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4 = 2\,050 + 729 + 1\,141 + 1\,431 = 5\,351$ мкс (Figure 1 за першим критерієм); але $V_0 \rightarrow V_6 \rightarrow V_4 = 2$ (Figure 2 за другим критерієм), при цьому сумарне значення затримок дорівнює $2\,478 + 2\,954 = 5\,432$ мкс, що перевищує попереднє. Інакше

кажучи, використання шляху $V_0 \rightarrow V_6 \rightarrow V_4$ як оптимального не є доцільним, оскільки існує інший шлях $V_0 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ з меншим значенням сумарної затримки на маршрутизаторах.

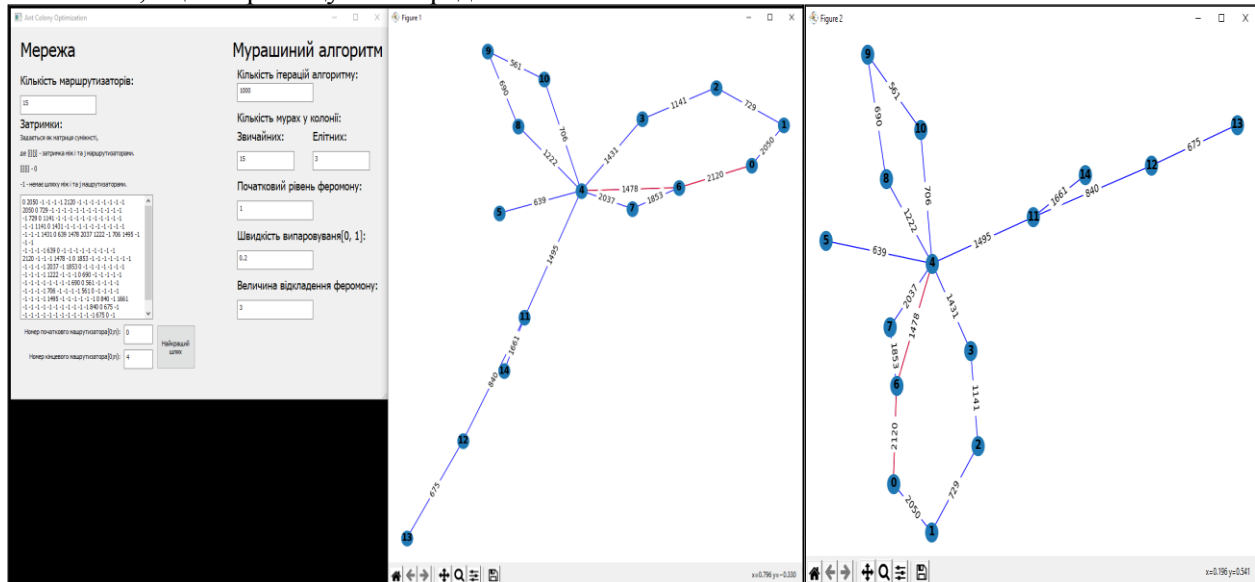


Рис. 5. Визначення за програмною моделлю оптимального маршруту за різними критеріями (у разі зміни значень затримок на маршрутизаторах)

Fig. 5. Determining the optimal route according to the program model based on various criteria (in case of change of delay values on the routers)

Результати

За програмною моделлю «Two-ACO» проведені дослідження кількості ітерацій, необхідних для пошуку оптимального шляху, за параметрами алгоритму. Чим більше агентів, тим менша кількість ітерацій для знаходження оптимального шляху (рис. 6), для досліджуваної мережі двох мурах на вершину достатньо.

У разі 30 агентів оптимальне значення феромону, який вони відкладають, близьке до одиниці (рис. 7).

Проведемо дослідження кількості ітерацій за коефіцієнтом випаровування феромону в разі 30 агентів та визначеної кількості феромону, відкладеного на ребрах графа. Чим вище його значення, тим менше ітерацій пошуку оптимального шляху в комп'ютерній мережі із 15 маршрутизаторів та 17 каналів (рис. 8).

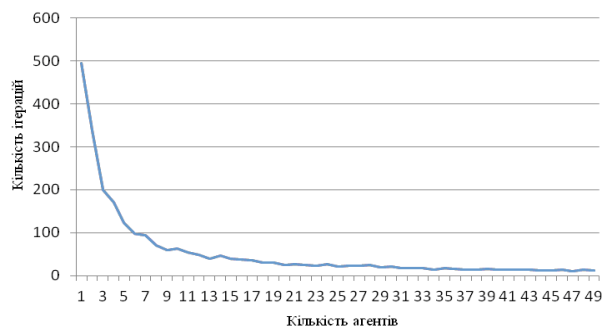


Рис. 6. Кількість ітерацій пошуку оптимального шляху за кількістю агентів

Fig. 6. Number of iterations to find the optimal path by the number of agents

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

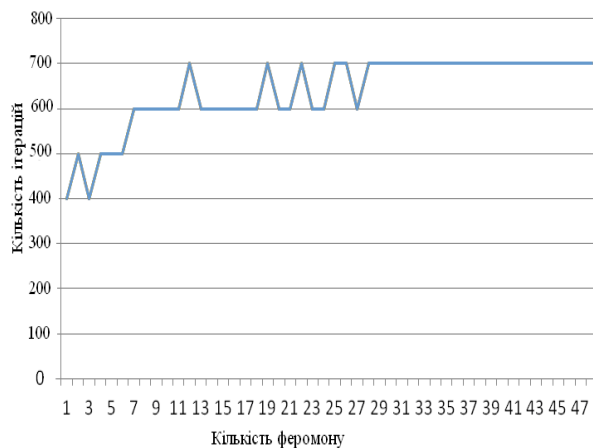


Рис. 7. Кількість ітерацій пошуку оптимального шляху за кількістю феромону

Fig. 7. Number of iterations to find the optimal path by the number of pheromones

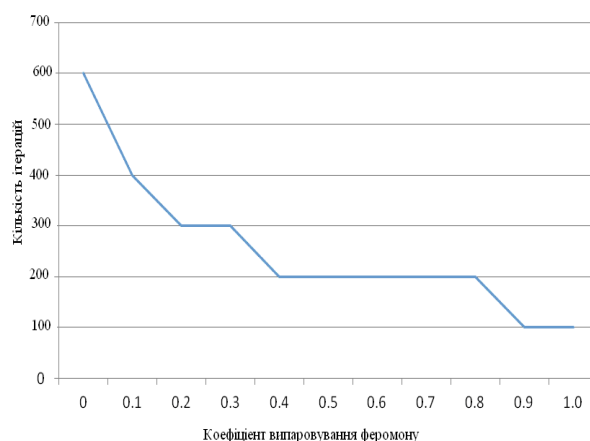


Рис. 8. Кількість ітерацій пошуку оптимального шляху за коефіцієнтом випаровування феромону

Fig. 8. Number of iterations to find for the optimal path by the pheromone evaporation coefficient

Наукова новизна та практична значимість

Усі дослідження проведено для гіпотетичної комп'ютерної мережі із 7 маршрутизаторами та 17 каналами, при цьому: початковий рівень феромону дорівнює – 1; кількість звичайних мурах – 7; кількість елітних мурах 1. Граф такої мережі представлений на рис. 9 (значення затримок на маршрутизаторах подано в мкс).

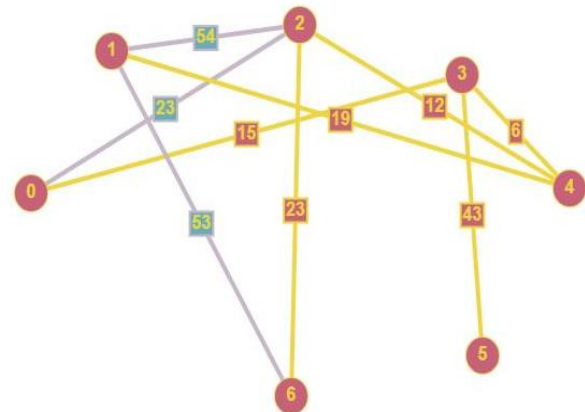


Рис. 9. Граф мережі, на якому проведено дослідження

Fig. 9. Graph of the network on which the study was conducted

Розглянемо залежність часу роботи програмної моделі в разі зміни таких параметрів мурашиного алгоритму: коефіцієнта випаровування (рис. 10); кількості елітних мурах (рис. 12); кількості звичайних мурах (рис. 14); кількості ітерацій (рис. 16); відкладення феромону (рис. 18).

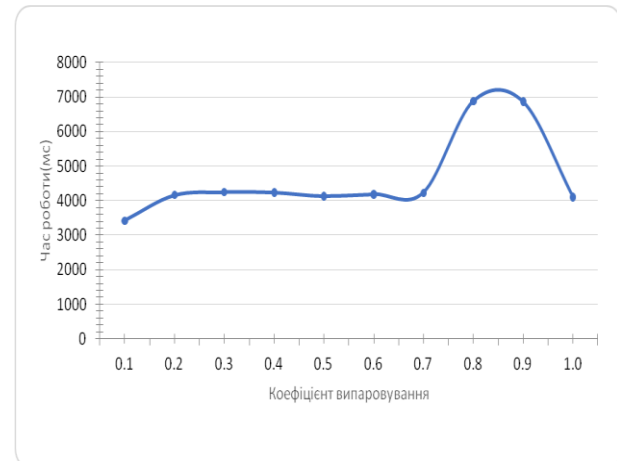


Рис. 10. Час роботи програмної моделі за коефіцієнтом випаровування

Fig. 10. Operating time of the software model by the evaporation coefficient

Із рис. 10 видно, що для комп'ютерної мережі із 7 маршрутизаторів доцільно використовувати коефіцієнт випаровування від 0,2 до 0,7. Відповідний скриншот програмної моделі представлений на рис. 11.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

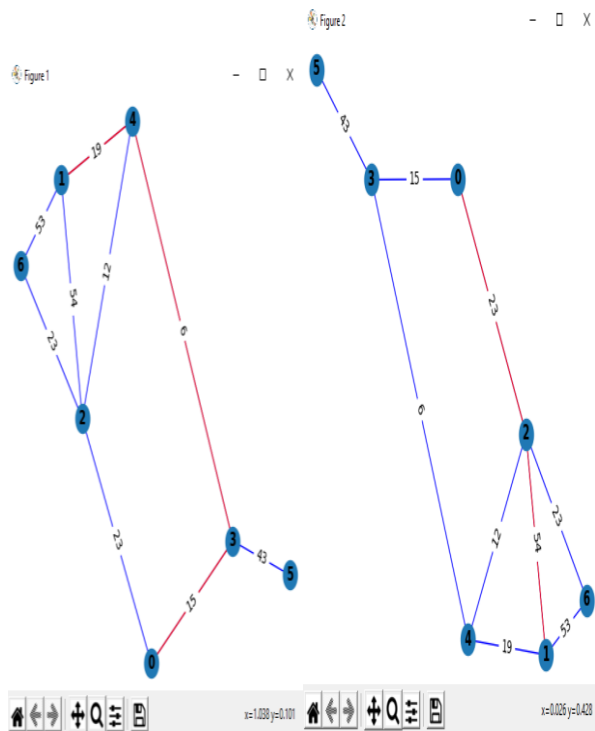


Рис. 11. Маршрут за програмною моделлю у першому дослідженні

Fig. 11. Route according to the software model in the first study

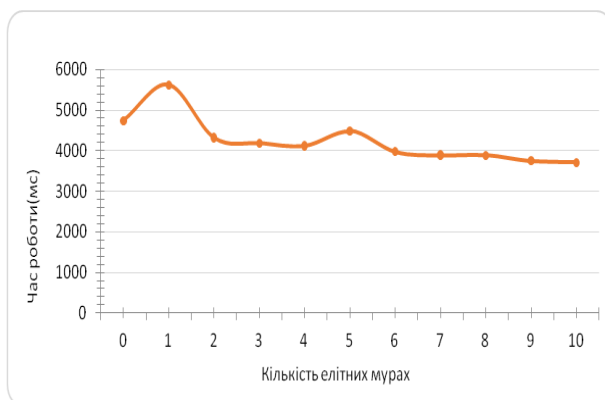


Рис. 12. Час роботи програмної моделі за кількістю елітних мурах

Fig. 12. Operating time of the software model by the number of elite ants

Рис. 12 демонструє: чим більше елітних мурах у колонії, тим швидше надходить оптимальне рішення. Однак зі збільшенням кількості елітних мурах зростає ймовірність того, що програмна модель буде застрягати на локально

оптимальних рішеннях; у нашому випадку достатньо мати двох елітних мурах на колонію. Відповідний скриншот моделі представлений на рис. 13.

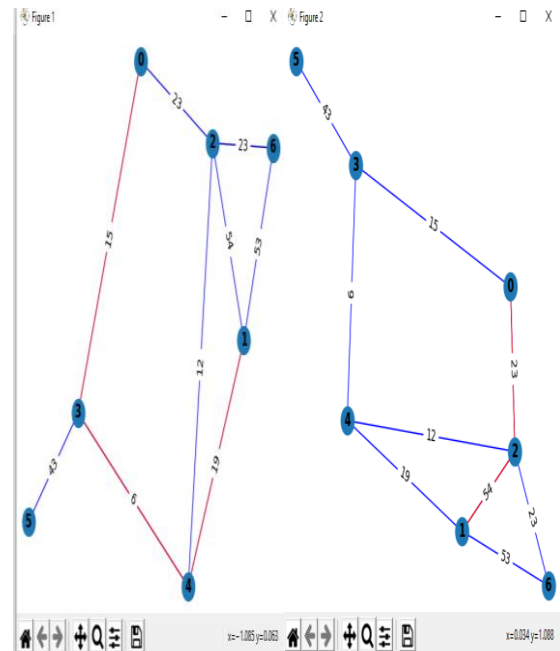


Рис. 13. Маршрут у програмній моделі в другому дослідженні

Fig. 13. Route in the software model in the second study

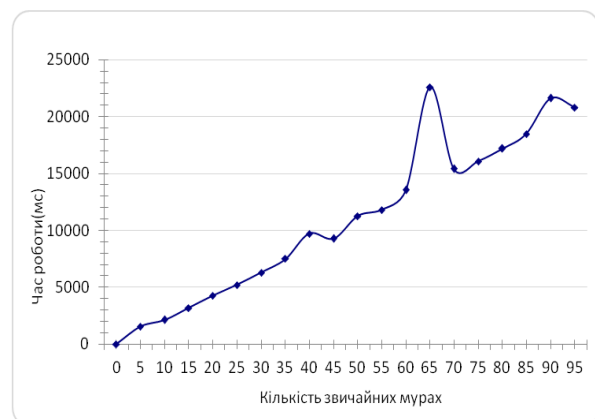


Рис. 14. Час роботи програмної моделі за кількістю звичайних мурах

Fig. 14. Operating time of the software model by the number of ordinary ants

Як бачимо з рис. 14, зі збільшенням кількості звичайних мурах у колонії зростає час виконання програмної моделі. Однак кількості мурах, що дорівнює кількості маршрутизаторів

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

у комп'ютерній мережі, вистачає для знаходження оптимального рішення. Відповідний скриншот програмної моделі представлений на рис. 15.

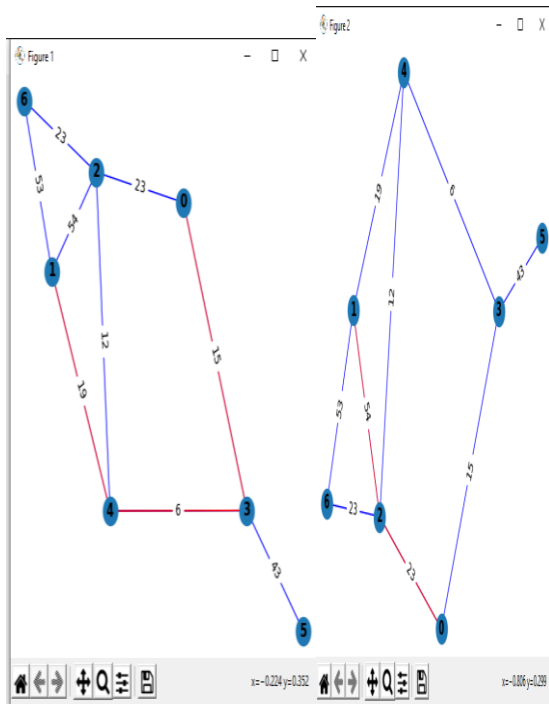


Рис. 15. Маршрут у програмній моделі в третьому дослідженні

Fig. 15. Route in the software model in the third study

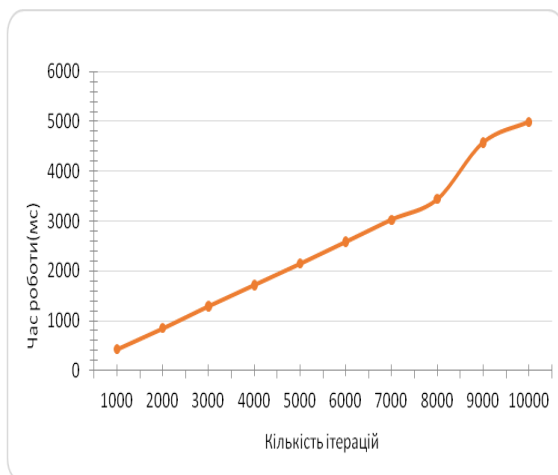


Рис. 16. Час роботи програмної моделі за кількістю ітерацій

Fig. 16. Operating time of the program model by the number of iterations

Із рис. 16 видно, що в разі збільшення кількості ітерацій мурашиного алгоритму збільшується час роботи програмної моделі. Проте для невеликих комп'ютерних мереж 1 000 ітерацій вистачає. Відповідний скриншот програмної моделі представлений на рис. 17.

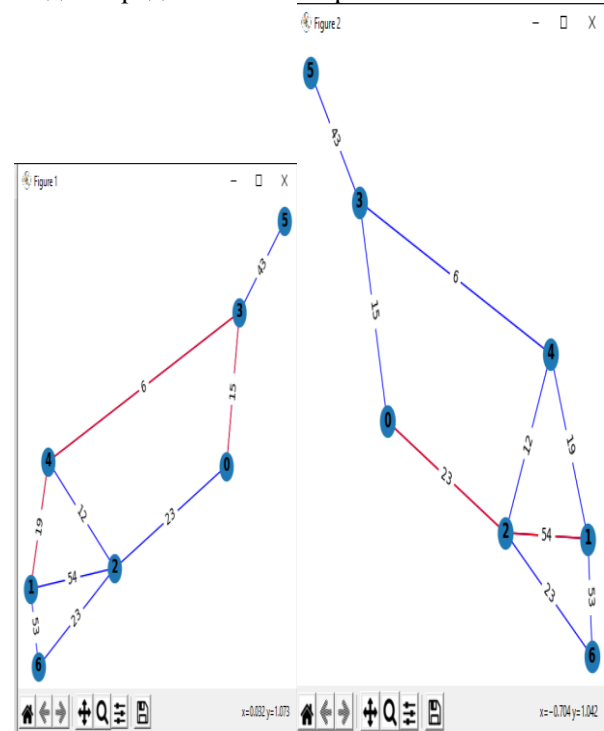


Рис. 17. Маршрут у програмній моделі в четвертому дослідженні

Fig. 17. Route in the software model in the fourth study



Рис. 18. Час роботи програмної моделі за кількістю відкладеного феромону

Fig. 18. Operating time of the software model by the amount of deposited pheromone

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Як свідчить рис. 18 для комп'ютерної мережі із 7 маршрутизаторів значення відкладеного феромону може належати діапазону [5, 8], але достатньо задати його близьким до одиниці. Відповідний скриншот програмної моделі представлений на рис. 19.

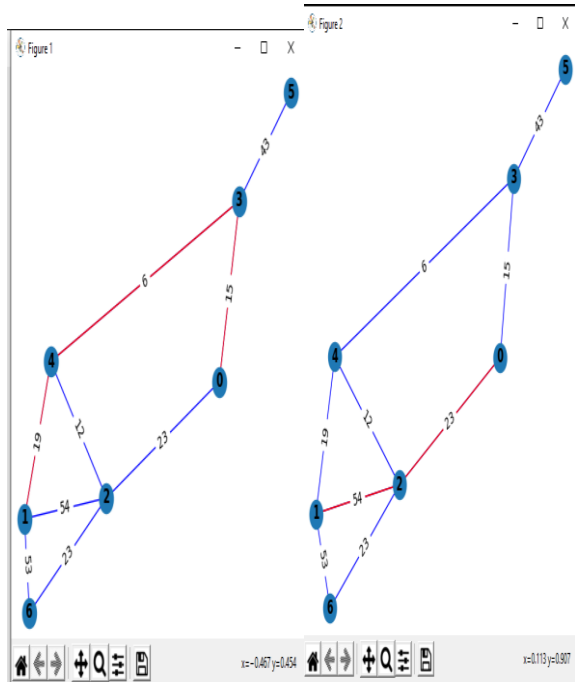


Рис. 19. Маршрут у програмній моделі в п'ятому дослідженні

Fig. 19. Route in the software model in the fifth study

Висновки

Для організації маршрутизації в комп'ютерних мережах можна використовувати мурашиний алгоритм, до основних положень якого належать: стигмержі (stigmergy) та феромон (pheromone). Поведінка мурах може мати різний математичний опис, тому існують такі модифікації: метод мурашиних систем, який використовує елітну стратегію; метод мурашиних систем, заснований на ранжуванні; метод системи мурашиних колоній; максимінний метод мурашиних систем; метод мурашиних колоній

зі стратегією королеви. Для подальшої роботи обрано метод мурашиних колоній з елітною стратегією, а для його реалізації – мову Python із широким спектром сучасних стандартних засобів.

1. Для визначення оптимального маршруту в комп'ютерній мережі за мурашиним алгоритмом елітної стратегії створена мовою Python програмна модель «Two-ACO», вхідні параметри якої: кількість маршрутизаторів у мережі; матриця суміжності мережі та параметри мурашиного алгоритму (кількість ітерацій алгоритму; кількість звичайних та елітних мурах у колонії; початковий рівень феромону, коефіцієнт випаровування; параметр для регулювання величини відкладеного феромону мурахами на ребрах графа мережі).

2. За створеною програмною моделлю «Two-ACO» для гіпотетичної комп'ютерної мережі (із 7 маршрутизаторів та 17 каналів) проведено дослідження часу визначення оптимального шляху за кількістю звичайних та елітних мурах, значень коефіцієнта випаровування та відкладеного феромону. З'ясовано, що достатньо використовувати кількість мурах, що дорівнює кількості маршрутизаторів, мати в колонії 2 елітних мурах, при цьому вистачає 1 000 ітерацій, коефіцієнта випаровування від 0,2 до 0,7, а значення відкладеного феромону мурахами близького до одиниці.

3. Визначено оптимальний маршрут у комп'ютерній мережі залізничного транспорту (із 15 маршрутизаторів та 17 каналів) на основі моделі «Two-ACO» з використанням двох колоній мурах за такими критеріями: загальною затримкою на маршрутизаторах (для першої колонії мурах) та кількістю хопів, що складають маршрут (для другої колонії мурах). Установлено, що достатньо мати 30 агентів (двох мурах на вершину), значення феромону, відкладеного агентами, близьке до одиниці, при цьому коефіцієнт випаровування складає 0,4.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Глушко С. И., Какатунова Т. В. Нечеткая модификация алгоритма муравьиных колоний. *Научное обозрение*. 2013. № 1. С. 377–381.
2. Павленко А. И., Титов Ю. П. Сравнительный анализ модифицированных методов муравьиных колоний. *Прикладная информатика*. 2012. № 4 (40). С. 100–112.

3. Пахомова В. М., Опрятний А. О. Визначення оптимального маршруту в захищеній комп'ютерній мережі з використанням двоколоніального мурашиного алгоритму. *International scientific-practical conference «International scientific integration'2020»* (13-14 nov 2020). USA, 2020.
4. Скаков Е. С., Малыш В. Н. Пчелиный алгоритм оптимизации для решения задачи планирования беспроводной сети. *Программные продукты и системы*. 2016. № 4 (67). С. 67–73.
DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.115.067-073>
5. Смирнова О. С., Богорадникова А. В., Блинов М. Ю. Описание роевых алгоритмов, инспирированных неживой природой и бактериями, для использования в онтологической модели. *International Journal of Open Information Technologies*. 2015. Vol. 3, № 12. С. 28–37.
6. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы. *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. 2003. № 4. С. 70–75.
7. Davidovic T., Teodorovic D., Selmic M. Bee Colony Optimization – Part I : The Algorithm Overview : Invited survey. *YJOR*. 2015. Vol. 25. Iss. 1. P. 33–56. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR131011017D>
8. Dli M. I., Glushko S. I., Ivanova I. V. Ant algorithms as a tool of infrastructure project management. *European Science and Technology : materials of the III research and practice conference (Munich, 2012)*. Munich, 2012. P. 127–129.
9. Dorigo M., Gambardella L. M. Ant Colony System : A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*. 1997. Vol. 1. Iss. 1. P. 53–66.
DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.585892>
10. Hussein W. A., Sahran S., Sheikh Abdullah S. N. H. The variants of the Bees Algorithm (BA) : A survey. *Artificial Intelligence Review*. 2017. Vol. 47. Iss. 1. P. 67–121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9476-8>
11. Kumar K., Zindani D., Davim J. P. *Bees Algorithm*. Optimizing Engineering Problems through Heuristic Techniques. 2019. pp. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351049580-5>
12. Pakhomova V. M., Mandybura Y. S. Optimal route definition in the railway information network using neural-fuzzy models. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). P. 81–98.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184385>
13. Pakhomova V. M., Tsykalo I. D. Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 6 (78). P. 126–142. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154443>
14. Vaishali S. *Nature – All Mathematics*. URL: <http://thebridge.psgtech.ac.in/index.php/2014/11/12/nature-all-mathematics>.
15. Ying Tan. Survey of swarm intelligence. *Swarm Intelligence Vol. 1 : Principles, current algorithms and methods*. 2018. P. 1–28. DOI: https://doi.org/10.1049/pbce119f_ch1

V. M. PAKHOMOVA^{1*}, A. O. OPRIATNYI^{2*}

^{1*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

^{2*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail olkdi@outlook.com, ORCID 0000-0001-7145-9677

Software Model for Determining the Optimal Routes in a Computer Network Based on the Two-Colonial Ant Algorithm

Purpose. At present, the computer networks of the information and telecommunication system (ITS) of railway transport use the OSPF protocol, which does not allow taking into account several metrics when determining the optimal route. Therefore, there is a need to study the possibility of organizing routing in computer networks of rail transport ITS using a two-colonial ant algorithm. **Methodology.** According to the Two-ACO software model, created in the Python language based on the two-colonial ant algorithm, the optimal route in a computer network was determined. Two-ACO model inputs: computer network parameters (network adjacency matrix, number of routers); parameters of the ant algorithm (number of iterations; number of ants in the colony; number of elite ants; initial pheromone level; evaporation rate; parameter for adjusting the amount of pheromone deposition). **Findings.** The results of the Two-ACO model are presented in the form of graphs depicting the optimal paths: the criterion of the total delay on the routers (for the first colony of ants) and the number of hops (for the second colony of ants). **Originality.** According to the created Two-ACO software model for a computer network of 7 routers and 17 channels, a study of the time for determining the optimal path in a computer network by the number of ordinary and elite

ants, evaporation rate and deposited pheromone was conducted. It is determined that it is enough to use the number of ants equal to the number of routers and have 2 elite ants in the colony, with 1000 iterations, evaporation rate from 0.2 to 0.7, and pheromone deposition by ants close to one. **Practical value.** Created Two-ACO software model using two colonies of ants on the following criteria: the total delay on the routers (for the first colony of ants) and the number of hops that make up the route (for the second colony of ants) allows you to parallel determine the optimal routes in a computer network of railway transport. It is estimated that for a computer network of 15 routers and 17 channels, it is sufficient to have 30 agents (two ants on top), the value of the pheromone deposited by the agents is close to one, and the evaporation rate is 0.4.

Keywords: railway transport; computer network; router; delay; two-colonial ant algorithm; pheromone; deposition; evaporation; search time

REFERENCES

1. Glushko, S. I., & Kakatunova, T. V. (2013). Fuzzy modification of the algorithm of ant colonies. *Scientific Review*, 1, 377-381. (in Russian)
2. Pavlenko, A. I., & Titov, Yu. P. (2012). Srovnitelnyy analiz modifitsirovannykh metodov muravinykh koloniy. *Prikladnaya informatika* 4(40), 100-112. (in Russian)
3. Pakhomova, V. M., & Opriatny, A. A. (2020). Determination of the optimal route in a secure computer network using a two-colonial ant algorithm. *International scientific-practical conference «International scientific integration '2020»*. USA. (in Ukrainian)
4. Skakov, E., & Malyshev, V. (2016). Bee colony optimization algorithm for wireless network planning problem solving. *SOFTWARE & SYSTEMS*, 4(67), 67-73. DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.115.067-073> (in Russian)
5. Smirnova, O. S., Bogoradnikova, A. V., & Blinov, M. Yu. (2015). Opisaniye roevykh algoritmov, inspirirovannykh nezhivoy prirodoy i bakteriyami, dlya ispolzovaniya v ontologicheskoy modeli. *International Journal of Open Information Technologies*, 3(12), 28-37. (in Russian)
6. Shtovba, S. D. (2003). Muravinye algoritmy. *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh*, 4, 70-75. (in Russian)
7. Davidovic, T., Teodorovic, D., & Selmic, M. (2015). Bee Colony Optimization-Part I: The Algorithm Overview: Invited survey. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 25(1), 33-56. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR131011017D> (in English)
8. Dli, M. I., Glushko, S. I., & Ivanova, I. V. (2012). Ant algorithms as a tool of infrastructure project management. *European Science and Technology: materials of the III research and practice conference* (pp. 127-129). Munich, Germany. (in English)
9. Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 53-66. DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.585892> (in English)
10. Hussein, W. A., Sahran, S., & Sheikh Abdullah, S. N. H. (2016). The variants of the Bees Algorithm (BA): a survey. *Artificial Intelligence Review*, 47(1), 67-121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9476-8> (in English)
11. Kumar, K., Zindani, D., & Davim, J. P. (2019). *Bees Algorithm*. Optimizing Engineering Problems through Heuristic Techniques (pp. 43-50). DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351049580-5> (in English)
12. Pakhomova, V. M., & Mandybura, Y. S. (2019). Optimal route definition in the railway information network using neural-fuzzy models. *Science and Transport Progress*, 5(83), 81-98. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184385> (in English)
13. Pakhomova, V. M., & Tsykalo, I. D. (2018). Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model. *Science and Transport Progress*, 6(78), 126-142. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154443> (in English)
14. Vaishali, S. *Nature-All Mathematics*. Retrieved from <http://thebridge.psgtech.ac.in/index.php/2014/11/12/nature-all-mathematics> (in English)
15. Ying, Tan. (2018). Survey of swarm intelligence. *Swarm Intelligence-Vol. 1: Principles, current algorithms and methods*, 1-28. DOI: https://doi.org/10.1049/pbce119f_ch1 (in English)

Надійшла до редколегії: 12.02.2021

Прийнята до друку: 14.06.2021

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.867.21-048.34

О. С. КУРОП'ЯТНИК^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта kuropyatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

Параметрична оптимізація стрічкових конвеєрів за критерієм енергоефективності

Мета. У цій роботі поставлено за мету обґрунтування оптимальних значень параметрів стрічкового конвеєра, за яких питомі енерговитрати на транспортування вантажу набувають найменшого значення. **Методика.** Досягнення зазначеної мети здійснено шляхом мінімізації функції питомих енерговитрат, яка відображає витрати енергії на транспортування одиничного вантажу на одиничну відстань. У ході досліджень окружне зусилля привода визначено з використанням методу обходу за контуром. При цьому погонні навантаження від транспортованого вантажу, стрічки та роликпопор було представлено як функції ширини стрічки. Для встановлення оптимальних значень продуктивності конвеєра та швидкості руху стрічки ширину стрічки було подано як функцію цих величин з урахуванням фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу, особливостей конструкції роликпопор та кута нахилу конвеєра. **Результати.** Отримано залежності питомих енерговитрат від проєктних параметрів конвеєра. Їх аналіз дозволив виявити оптимальні значення ширини стрічки, продуктивності конвеєра, швидкості руху стрічки, а також оптимальне співвідношення двох останніх величин для різних видів транспортованого вантажу. Відзначено, що отримані результати можна доповнити шляхом проведення додаткових розрахунків за формулою, наведеною в цій роботі. Установлено, що оптимальне значення ширини стрічки залежить тільки від кута нахилу конвеєра та від коефіцієнтів, які визначають втрати енергії, зокрема коефіцієнта опору руху стрічки; при цьому вплив означеного коефіцієнта зростає зі збільшенням кута нахилу конвеєра. До того ж оптимальне значення ширини стрічки не залежить від довжини конвеєра, його продуктивності та швидкості руху стрічки. **Наукова новизна.** Отримано залежності питомих енерговитрат від проєктних параметрів стрічкового конвеєра, що дозволило встановити оптимальні значення ширини стрічки та відношення продуктивності конвеєра до швидкості стрічки. **Практична значимість.** Результати цієї роботи можуть бути використані під час проєктування енергоефективних стрічкових конвеєрів, які характеризуються найменшими питомими енерговитратами на транспортування вантажу.

Ключові слова: стрічковий конвеєр; енергоефективність; продуктивність; ширина стрічки; оптимізація

Вступ

Стрічкові конвеєри є машинами безперервної дії, основний елемент яких – прогумована вертикально замкнута стрічка, що огинає кінцеві барабани, один із яких, як правило, привідний, інший – натяжний. Стрічкові конвеєри досить широко застосовують на підприємствах хімічної, металургійної, машинобудівної промисловості, у виробництві будівельних матеріалів, транспортному та промисловому будівни-

цтві, на вуглезбагачувальних фабриках [1]. Тому підвищення ефективності таких машин, а також ефективності транспортних процесів із їх використанням є актуальною задачею.

Питанням раціонального проєктування та поліпшення конструкцій стрічкових конвеєрів присвячено чимало робіт. Зокрема, у роботі [8] розглянуто оптимізацію пуску та роботи стрічкових конвеєрів у контексті забезпечення раціональних режимів роботи електропривода. Динамічні процеси, що виникають під час експлу-

МАШИНОБУДУВАННЯ

атації конвеєрів, досліджено і в інших роботах – [4, 5, 7, 12]. Окремі вчені розглядають питання вдосконалення конструкції стрічкових конвеєрів та розширення їх функціональних можливостей щодо транспортування різних вантажів [3, 11].

Одним із напрямів поліпшення конструкцій транспортних засобів і технологій транспортування є підвищення їх енергоефективності [13]. Такий підхід дозволяє скоротити витрати на експлуатацію техніки, зменшити собівартість транспортування вантажу тощо. Питання зменшення енергоспоживання стрічкового конвеєра за рахунок використання особливого алгоритму регулювання швидкості розглянуто в роботі [10].

Мета

У цій роботі поставлено за мету обґрунтування оптимальних значень параметрів стрічкового конвеєра, за яких зведені енерговитрати на транспортування вантажу набувають найменшого значення.

Методика

Як показник енергоефективності стрічкового конвеєра візьмемо питомі енерговитрати e , які відображають витрати енергії E на транспортування вантажу масою m на відстань s :

$$e = \frac{E}{ms}. \quad (1)$$

Витрати енергії можна визначити за формулою:

$$E = \frac{Fs}{\eta}, \quad (2)$$

де F – окружне зусилля привода; η – коефіцієнт корисної дії привода.

Після підставлення (2) в (1) та виконання математичних перетворень отримуємо:

$$e = \frac{F}{\eta m}. \quad (3)$$

Окружне зусилля привода конвеєра з гнучким тяговим органом, в тому числі стрічкового, визначають із використанням методу обходу за контуром, відповідно до якого

$$S_{i+1} = S_i + W_{i,i+1}, \quad (4)$$

де S_i, S_{i+1} – натяги стрічки в точках i та $i+1$ тягового контуру; $W_{i,i+1}$ – опір руху стрічки на ділянці контуру між точками i та $i+1$.

Подальші розрахунки будемо проводити для конвеєрів зі схемою, наведеною на рис. 1.

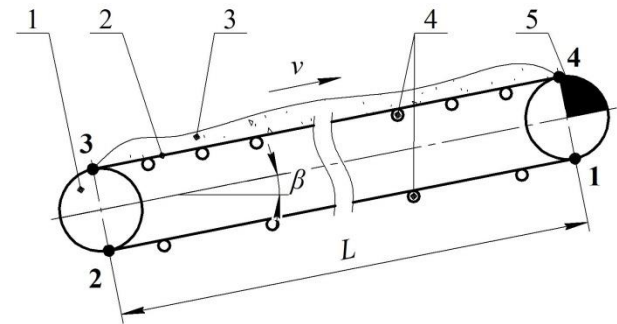


Рис. 1. Схема конвеєра:

1 – натяжний барабан; 2 – стрічка;
3 – транспортований вантаж;
4 – роликоспора; 5 – приводний барабан

Fig. 1. Conveyor scheme:

1 – tension drum; 2 – belt;
3 – transported cargo;
4 – roller supports; 5 – drive drum

Відповідно до позначень, наведених на рис. 1, окружне зусилля привода набуде вигляду:

$$F = S_4 - S_1, \quad (5)$$

де S_1, S_4 – натяги стрічки в точках її збігання з приводного барабана та набігання на барабан.

Використовуючи метод обходу за контуром, визначимо натяги стрічки в точках 2–4, виражаючи їх через натяг S_1 :

$$S_2 = S_1 + W_{12}; \quad (6)$$

$$S_3 = kS_2 = k(S_1 + W_{12}); \quad (7)$$

$$S_4 = S_3 + W_{34} = k(S_1 + W_{12}) + W_{34}. \quad (8)$$

У формулах (6) – (8) прийнято такі позначення: S_2, S_3 – натяги стрічки в точках 2 й 3 відповідно; W_{12}, W_{34} – опори руху стрічки на ділянках між точками 1, 2 й 3, 4 відповідно; k – коефіцієнт, що враховує збільшення натягу стрічки під час огинання нею натяжного барабана ($k = 1,05$ за кута огинання $\alpha = 180^\circ$).

Можливість реалізації тяги стрічкового конвеєра забезпечується в разі дотримання умови

МАШИНОБУДУВАННЯ

$$S_4 \leq S_1 \exp(f\alpha), \quad (9)$$

де f – коефіцієнт зчеплення стрічки з привідним барабаном; α – кут огинання стрічкою привідного барабана.

Із поєднання виразів (8) і (9) випливає, що в разі дотримання граничного стану умови (9) натяг стрічки в точці 1 можна визначити з такого рівняння:

$$S_1 \exp(f\alpha) = kS_1 + kW_{12} + W_{34}.$$

Після виконання математичних перетворень маємо:

$$S_1 = \frac{kW_{12} + W_{34}}{\exp(f\alpha) - k}. \quad (10)$$

Тоді натяг стрічки в точці 4 становитиме:

$$S_4 = \frac{\exp(f\alpha)}{\exp(f\alpha) - k} (kW_{12} + W_{34}). \quad (11)$$

Підставляючи (10) та (11) у (5), після виконання математичних перетворень отримуємо вираз для визначення окружного зусилля привода конвеєра:

$$F = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} (kW_{12} + W_{34}). \quad (12)$$

Величини опорів руху стрічки визначаємо так:

$$W_{12} = q_0 L (w' \cos \beta - \sin \beta) + q_p'' L w' \cos \beta; \quad (13)$$

$$W_{34} = (q + q_0) L (w' \cos \beta + \sin \beta) + q_p' L w' \cos \beta. \quad (14)$$

У цих формулах q – погонне навантаження на стрічку від ваги транспортованого вантажу; q_0 – погонна вага стрічки; q_p', q_p'' – погонне навантаження від ваги роликкоопор (робочої та холостої віток стрічки відповідно); L, β – довжина та кут нахилу конвеєра (див. рис. 1); w' – зведений коефіцієнт опору руху стрічки.

Поєднуючи вирази (12) – (14), отримуємо:

$$F = \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} [kq_0 L (w' \cos \beta - \sin \beta) + kq_p'' L w' \cos \beta + (q + q_0) L (w' \cos \beta + \sin \beta) + q_p' L w' \cos \beta]. \quad (15)$$

Після підставлення (15) у (3) та виконання математичних перетворень отримуємо:

$$e = \frac{1}{\eta} \frac{\exp(f\alpha) - 1}{\exp(f\alpha) - k} \left[\left(1 + \frac{m_0}{m} + \frac{m_p}{m} \right) w' \cos \beta + \left(1 + \frac{m_0}{m} \right) \sin \beta + k \frac{m_0}{m} (w' \cos \beta - \sin \beta) \right]. \quad (16)$$

Таким чином, отримано залежність питомих енерговитрат від параметрів конвеєра, у якій прийнято такі позначення: $m = qL / g$ – маса транспортованого вантажу; $m_0 = q_0 L / g$ – маса стрічки на одному напрямку руху (без урахування частини стрічки, що знаходиться на барабанах); $m_p = (q_p' + kq_p'') L / g$ – узагальнена маса роликкоопор на обох напрямках руху стрічки.

Ураховуючи те, що конвеєр є більш енергоефективним у разі, коли питомі енерговитрати мінімальні, відзначаємо фактори впливу та напрямки їх зміни (за інших незмінних умов) для підвищення енергоефективності конвеєра:

- маса транспортованого вантажу – до збільшення;
- маса стрічки – до зменшення;
- маси роликкоопор – до зменшення;
- коефіцієнти втрати енергії різного роду (η, k, w') – до зменшення;
- кут нахилу конвеєра – вплив неоднозначний.

Проведені автором дослідження показали, що вплив коефіцієнта зчеплення стрічки з барабаном (f) та кута огинання барабана стрічкою (α) на питомі енерговитрати є дуже малим. Слід також відзначити, що питомі енерговитрати не залежать від довжини конвеєра (L).

Більш глибокий аналіз виразу (16) вимагає встановлення залежностей мас стрічки та роликкоопор від ширини стрічки. Вивчення літератури [2, 6] показало наявність прямих залежностей $q_p'(B)$ та $q_p''(B)$, де B – ширина стрічки. А в роботі [9] указано, що навантаження від роликкоопор також залежать від насипної щільності транспортованого вантажу. В усіх випадках ці залежності подано у вигляді табульованих функцій, які слід апроксимувати для спрощення подальшого аналізу. Дослідження пока-

МАШИНОБУДУВАННЯ

зали, що залежності $q'_p(B)$ та $q''_p(B)$ достатньо точно можна описати поліномами третього ступеня (рис. 2) в такій формі:

$$q'_p(B) = 471B^3 - 1039B^2 + 921B - 159; \quad (17)$$

$$q''_p(B) = 205B^3 - 500B^2 + 491B - 111. \quad (18)$$

За цими формулами величини $q'_p(B)$ та $q''_p(B)$ отримуємо в Ньютонах, ділених на метр, у разі, коли ширину стрічки B підставлено в метрах.

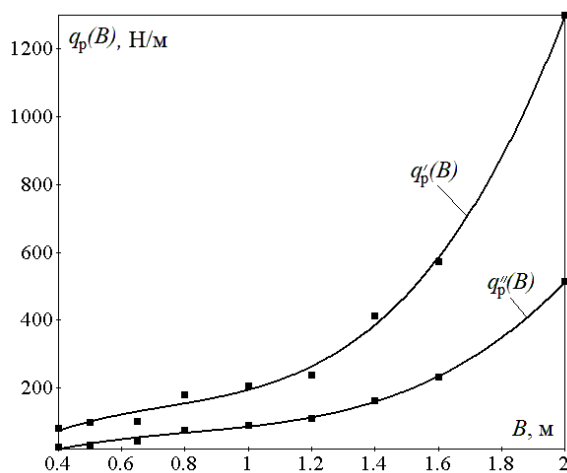


Рис. 2. Апроксимація табульованих залежностей $q'_p(B)$ та $q''_p(B)$

Fig. 2. Approximation of tabulated dependencies $q'_p(B)$ and $q''_p(B)$

Залежність погонної ваги стрічки від її ширини можна встановити аналітично з такого виразу:

$$q_0(B) = g\gamma_c B(n\delta + h_1 + h_2),$$

де γ_c – узагальнена щільність стрічки; n – кількість прокладок стрічки; δ – товщина однієї прокладки; h_1 , h_2 – товщина робочої та ходової обкладок відповідно.

За рекомендаціями [6] попередньо беремо: $\gamma_c = 1100 \text{ кг/м}^3$; $n = 4$; $\delta = 1,2 \text{ мм}$; $h_1 = 4 \text{ мм}$; $h_2 = 2 \text{ мм}$. Тоді після підставлення чисел отримуємо:

$$q_0(B) = 117 B. \quad (19)$$

Щоб отримати залежність $q(B)$, використаємо формулу для визначення ширини стрічки [2]:

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{\Pi}{k_n C \gamma v}} + 0,05 \right), \quad (20)$$

де Π – продуктивність конвеєра; k_n – коефіцієнт, який враховує зсипання транспортованого вантажу під час руху стрічки на підйом (коефіцієнт нахилу); C – коефіцієнт продуктивності, який залежить від форми роликкоопор та фізико-механічних властивостей транспортованого вантажу;

γ – насипна щільність транспортованого вантажу; v – швидкість руху стрічки.

У формулу (20) продуктивність Π слід підставляти в тоннах за годину, насипну щільність γ – у тонах, ділених на кубічний метр, швидкість v – у метрах за секунду; коефіцієнти k_n та C не мають явного фізичного змісту, їх визначають емпірично та вважають безрозмірними величинами (беруть за таблицями). У такому разі результат за формулою (20) – ширину стрічки – отримаємо в метрах.

Ураховуючи те, що для стрічкового конвеєра продуктивність $\Pi = 3,6 qv / g$, із виразу (20) отримуємо:

$$q(B) = \frac{k_n C \gamma g}{3,6} (0,91B - 0,05)^2. \quad (21)$$

Апроксимація табульованої залежності $k_n(\beta)$ [2] дозволила встановити, що в інтервалі значень β від нуля до 30 градусів

$$k_n(\beta) = -9,4 \cos^2 \beta + 21,4 \cos \beta - 11.$$

Коефіцієнт C змінюється в доволі широких межах ($C = 100 \dots 710$ [2]), однак у роботі [9] наведено окремі значення для різних транспортованих вантажів; ними й будемо користуватися.

Підставляючи залежності (17) – (19), (21) у вираз (16) з урахуванням пояснень до нього, отримуємо залежність питомих енерговитрат від ширини стрічки та інших параметрів конвеєра. Аналітичний запис цієї залежності в даній роботі не наведено через його значну громіздкість. Представимо залежність $e(B)$ в графічному вигляді.

Оптимальне значення ширини стрічки $B_{\text{опт}}$ визначаємо шляхом розв'язання рівняння

МАШИНОБУДУВАННЯ

$de(B)/dB = 0$. Оскільки представлення функції $e(B)$ в аналітичному вигляді є ускладненим через її громіздкість, указане рівняння розв'язуємо за допомогою чисельних методів, реалізованих у функції `root` системи MathCAD.

Для встановлення залежності питомих енерговитрат від продуктивності конвеєра та швидкості руху стрічки скористаємося виразом (20), виконуючи необхідні заміни в залежностях (17) – (19), (21). Ці залежності після внесення змін вказувати не будемо через їх громіздкість.

Результати

За матеріалами роботи [9] визначимо добуток $C\gamma$ для деяких матеріалів:

- пісок – $C\gamma = 470 \cdot 1,45 \approx 680$;
- ґрунт – $C\gamma = 470 \cdot 1,6 \approx 750$;
- гравій – $C\gamma = 470 \cdot 1,8 \approx 845$;
- щебінь – $C\gamma = 550 \cdot 1,6 = 880$.

Ураховуючи ці значення, побудуємо залежність $e(B)$ для різних транспортованих вантажів (рис. 3).

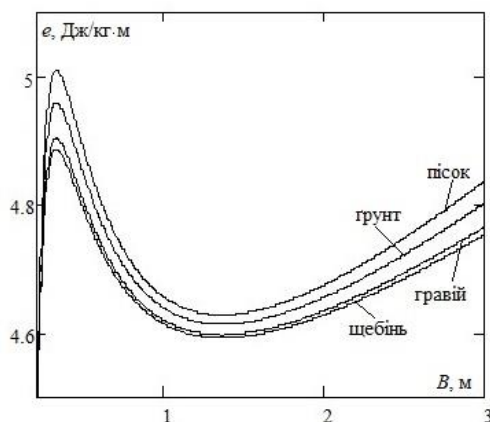


Рис. 3. Залежність питомих енерговитрат від ширини стрічки для різних видів транспортованого вантажу

Fig. 3. Dependence of specific energy consumption on the belt width for different types of transported cargo

Як бачимо, функція $e(B)$ має два екстремуми, отже, існує оптимальне значення ширини стрічки B_{opt} , за якого питомі енерговитрати набувають мінімального значення. Також можна стверджувати, що використання стрічки шириною, яка відповідає першому екстремуму цієї функції, є небажаним, тому що за таких умов питомі енерговитрати є найбільшими.

Із рис. 3 видно, що характер залежності $e(B)$ для різних матеріалів є незмінним, до того ж ця функція набуває екстремальних значень за одних і тих самих значень аргумента. Отже, оптимальне значення ширини стрічки не залежить від виду транспортованого вантажу, так само й від форми роликкоопору. Дослідження показали: оптимальне значення ширини стрічки, за якого питомі енерговитрати є мінімальними, залежить тільки від кута нахилу конвеєра (більшою мірою) та від коефіцієнтів, які визначають втрати енергії, зокрема коефіцієнта опору руху стрічки (рис. 4). При цьому вплив коефіцієнта опору руху стрічки зростає зі збільшенням кута нахилу конвеєра. Відзначаємо, що B_{opt} не залежить від довжини конвеєра, його продуктивності та швидкості руху стрічки.

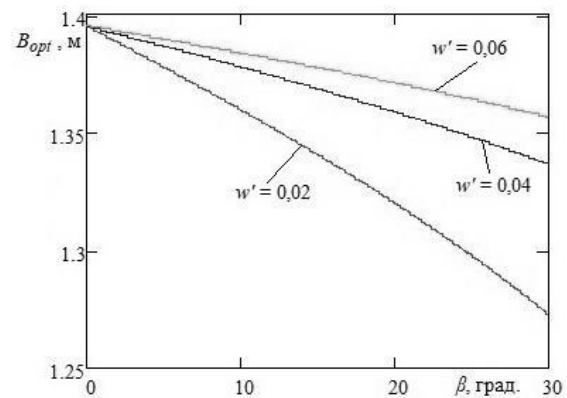


Рис. 4. Залежність оптимальної ширини стрічки від кута нахилу конвеєра за різних значень коефіцієнта опору руху стрічки

Fig. 4. Dependence of the optimal belt width on the belt angle at different values of the belt resistance coefficient

Функцію $e(\Pi)$ подано в графічному вигляді на рис. 5. Як бачимо, ця функція має два екстремуми: перший відповідає максимальним питомим енерговитратам, другий – мінімальним. Отже, існує певне оптимальне значення продуктивності Π_{opt} , за якого конвеєр є найбільш енергоефективним (питомі енерговитрати найменші). Таке значення залежить від швидкості руху стрічки, до того ж ця залежність є лінійною прямопропорційною, що також підтверджується виразом $\Pi = 3,6 qv / g$.

Із виразу (20) випливає, що

$$\xi = \Pi/v = k_n C\gamma (0,91B - 0,05)^2. \quad (22)$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

Залежність $e(\xi)$ для різних видів транспортованого вантажу подано на рис. 6.

Як бачимо, функція $e(\xi)$ має два екстремуми, так само як і функція $e(B)$, але її аргументи, що відповідають екстремальним значенням, різняться для кожного з видів транспортованого вантажу, що підтверджується й залежністю (22).

Таким чином, доходимо висновку, що під час проведення оптимізації стрічкового конвеєра доцільного говорити не про оптимальну продуктивність (Π_{opt}) та оптимальну швидкість руху стрічки (v_{opt}), а про їх оптимальне співвідношення $\xi_{\text{opt}} = \Pi_{\text{opt}}/v_{\text{opt}}$. Значення такого співвідношення для різних матеріалів подано в табл. 1.

Відомості, наведені в табл. 1, отримано з використанням усереднених значень фізико-механічних властивостей транспортованих вантажів. За необхідності величини ξ_{opt} для інших вантажів або за інших умов транспортування (конструкція ролюпопор, кут нахилу конвеєра) можна визначити за формулою (22), підставляючи в неї оптимальне значення ширини стрічки. При цьому слід пам'ятати, що B_{opt} залежить від кута нахилу конвеєра та коефіцієнта опору руху стрічки (див. рис. 4).

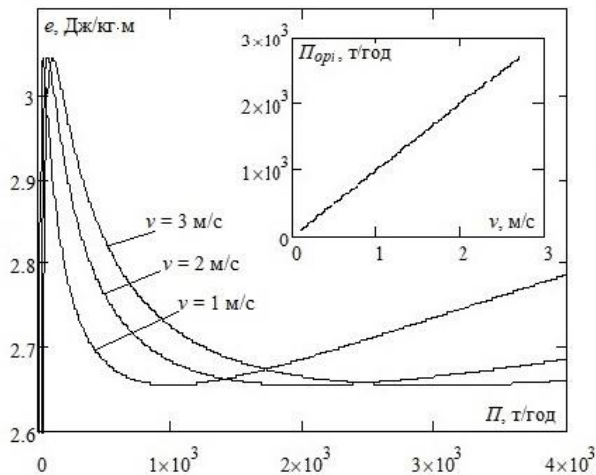


Рис. 5. Залежність питомих енерговитрат від продуктивності конвеєра за різних значень швидкості руху стрічки

Fig. 5. Dependence of specific energy consumption on the conveyor productivity at different values of the belt speed

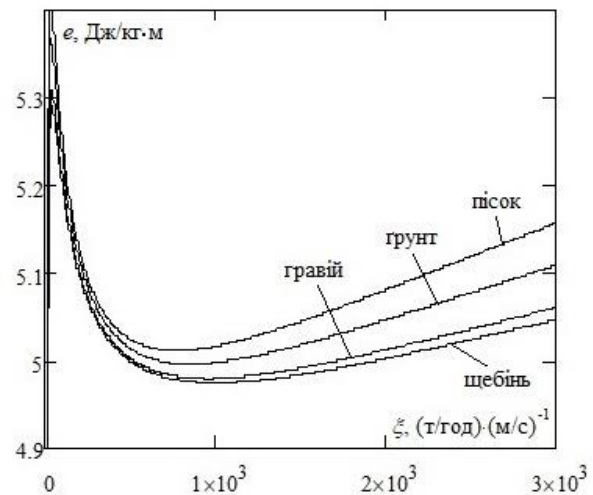


Рис. 6. Залежність питомих енерговитрат від співвідношення продуктивності та швидкості руху стрічки для різних видів транспортованого вантажу

Fig. 6. Dependence of specific energy consumption on the productivity ratio of and the belt speed for different types of transported cargo

Таблиця 1

Оптимальні співвідношення ξ_{opt} , (т/год)·(м/с)⁻¹, для різних видів транспортованого вантажу

Table 1

Optimal ratios ξ_{opt} , (t/h)·(m/s)⁻¹, for different types of transported cargo

Транспортований вантаж	ξ_{opt}
Пісок	770
Ґрунт	850
Ґравій	958
Щебінь	998

Примітка: кут нахилу конвеєра – 22°

Наукова новизна та практична значимість

У роботі отримано залежності питомих енерговитрат від проектних параметрів стрічкового конвеєра, що дозволило встановити оптимальні значення ширини стрічки та відношення продуктивності конвеєра до швидкості стрічки для різних видів транспортованого вантажу. Результати роботи можуть бути використані під час проектування енергоефективних стрічкових

МАШИНОБУДУВАННЯ

конвеєрів, які характеризуються найменшими питомими енерговитратами на транспортування вантажу.

Висновки

Аналіз наведених результатів дозволяє дійти таких висновків:

– оптимальне значення ширини стрічки, за якого питомі енерговитрати є мінімальними, залежить тільки від кута нахилу конвеєра (більшою мірою) та від коефіцієнтів, які визначають втрати енергії, зокрема коефіцієнта опору руху стрічки; при цьому вплив коефіцієнта опору руху стрічки зростає зі збільшенням кута нахилу конвеєра;

– оптимальне значення ширини стрічки не залежить від довжини конвеєра, його продуктивності та швидкості руху стрічки;

– під час проведення оптимізації стрічкового конвеєра доцільного говорити не про його оптимальну продуктивність та оптимальну швидкість руху стрічки, а про оптимальне співвідношення цих величин; зокрема, встановлено, що оптимальне співвідношення продуктивності конвеєра та швидкості руху стрічки під час транспортування піску становить $770 \text{ (т/год)} \cdot \text{(м/с)}^{-1}$ за кута нахилу конвеєра 22° ; за тих самих умов таке співвідношення для ґрунту – $850 \text{ (т/год)} \cdot \text{(м/с)}^{-1}$, для гравію – $958 \text{ (т/год)} \cdot \text{(м/с)}^{-1}$, для щебеню – $998 \text{ (т/год)} \cdot \text{(м/с)}^{-1}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богомаз В. М., Боренко М. В., Нечай І. В., Северин О. П. Якісний аналіз залежності потужності приводу стрічкового горизонтально-похилого конвеєра від його вихідних параметрів. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 1 (67). С. 143–155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/94036>
2. Бондарев В. С., Дубинець О. І., Колісник М. П., Бондарев С. В., Горбатенко Ю. П., Барабанов В. Я. *Підійомно-транспортні машини. Розрахунки підіймальних і транспортувальних машин*. Київ : Вища школа, 2009. 734 с.
3. Коруняк П., Баранович С., Ковальчук Т., Форнальчик Є. Шляхи вдосконалення конструкцій стрічкових конвеєрів. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія : Агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 74–78.
4. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Кульпін Р. А. Оптимізація режиму пуску стрічкового конвеєра за комплексним критерієм. *Науковий журнал «Техніка та енергетика»*. 2019. № 10 (2). С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.02.005>
5. Ловейкін В., Ромасевич Ю., Шалатовська К., Науменко П. Оптимізація керування рухом стрічкового конвеєра у перехідних режимах. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2017. № 89. С. 16–23.
6. Ромакин Н. Е. *Машины непрерывного транспорта*. Москва : Академия, 2008. 432 с.
7. Ромасевич Ю. О. Аналіз перехідних режимів руху стрічкових конвеєрів. *Подъемно-транспортная техника*. 2018. № 1 (57). С. 66–75.
8. Стаднік М. І., Видмиш А. А. Дослідження пуску стрічкових конвеєрів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 3 (102). С. 98–104.
9. Bohomaz V. M. Research of dependence of belt conveyor drive power on its design parameters. *Science and Transport Progress*. 2016. № 1 (61). P. 131–146. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61024>
10. He D., Liu X., Zhong B. Sustainable belt conveyor operation by active speed control. *Measurement*. 2020. Vol. 154. P. 107458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107458>
11. Gładysiewicz L., Król R., Kisielewski W. Measurements of loads on belt conveyor idlers operated in real conditions. *Measurement*. 2019. Vol. 134. P. 336–344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.068>
12. Li J., Pang X. Belt conveyor dynamic characteristics and influential factors. *Shock and Vibration*. 2018. Vol. 2018. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8106879>
13. Raksha S. V., Kuropiatnyk O. S., Krasnoshchok O. L. Justification of criteria for ropeways energy efficiency. *Science and Transport Progress*. 2019. № 6 (84). P. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195601>

O. S. KUROIPIATNYK^{1*}

^{1*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail kuropiatnick@gmail.com, ORCID 0000-0001-5581-3883

Parametric Optimization of Belt Conveyors by Energy Efficiency Criterion

Purpose. The purpose of this work is to substantiate the optimal values of the belt conveyor parameters, at which the specific energy consumption for the cargo transportation takes on the lowest value. **Methodology.** The substantiation of the optimal values of the belt conveyor parameters was carried out by minimizing the function of specific energy consumption, which represents the energy consumption for the transportation of a cargo weighing 1 kg at a distance of 1 m. In the course of research, the drive force was determined using the contour bypass method. In this case, the specific loads from the transported cargo, belt and roller supports were presented as functions of the belt width. To establish the optimal values of the conveyor productivity and belt speed, the belt width was presented as a function of these values, taking into account the physical and mechanical properties of the transported cargo, the design features of the roller supports and the belt angle. **Findings.** I obtained the dependences of specific energy consumption on the design parameters of the conveyor. Their analysis made it possible to identify the optimal values of the belt width, conveyor productivity, belt speed, and the optimal ratio of the last two values for different types of transported cargo. It is noted that the results obtained can be supplemented by carrying out calculations according to the formula given in this work. It has been established that the optimal value of the belt width depends only on the belt angle and on the coefficients that determine the energy losses, in particular the movement resistance coefficient of the belt; the influence of the specified coefficient increases with an increase in the belt angle. In addition, the optimal value of the belt width does not depend on the conveyor length, its productivity and belt speed. **Originality.** The dependences of the specific energy consumption on the design parameters of the belt conveyor were obtained, which made it possible to establish the optimal values of the belt width and the ratio of the conveyor productivity to the belt speed. **Practical value.** The results of this work can be used in the design of energy-efficient belt conveyors, which are characterized by the lowest specific energy consumption for cargo transportation.

Keywords: belt conveyor; energy efficiency; productivity; belt width; optimization

REFERENCES

1. Bohomaz, V. M., Borenko, M. V., Nechay, I. V., & Severyn, O. P. (2017). Qualitative analysis of dependence of drive power horizontal-inclined belt conveyor on its initial parameters. *Science and Transport Progress*, 1(67), 143-155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/94036> (in Ukrainian)
2. Bondariev, V. S., Dubynets, O. I., Kolisnyk, M. P., Bondariev, S. V., Horbatenko, Yu. P., & Barabanov, V. Ya. (2009). *Pidjomno-transportni mashyny. Rozrakhunky pidijmaljnykh i transportovaljnykh mashyn*. Kyiv: Vyshha shkola. (in Ukrainian)
3. Korunyak, P., Baranovych, S., Kovalchuk, T., & Fornalchyk, Ye. (2014). Methods to improve designs conveyor belt. *Journal of Lviv National Agrarian University: agronomy*, 18, 74-78 (in Ukrainian)
4. Loveikin, V. S., Romasevych, Y. O., & Kulpin, R. A. (2019). Optimization of belt conveyor start by complex criteria. *Machinery & Energetics*, 10(2), 5-11. DOI: <https://doi.org/10.31548/machenergy2019.02.005> (in Ukrainian)
5. Loveikin, V., Romasevych, O., Shalatovska, K., & Naumenko, P. (2017). Optimal control of conveyor belt movement in transient regimes. *Girnychy, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini*, 89, 16-23 (in Ukrainian)
6. Romakin, N. Ye. (2008). *Mashyny nepreryvnogo transporta*. Moscow: Akademiya. (in Russian)
7. Romasevych, Yu. O. (2018). Analiz perekhidnykh rezhymiv rukhu strichkovykh konveieriv. *Hebezeuge und Fördermittel*, 1(57), 66-75. (in Ukrainian)
8. Stadnik, M. I., & Vidmish, A. A. (2018). Study of starting of belt conveyors. *Engineering, energy, transport AIC*, 3(102), 98-104 (in Ukrainian)
9. 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: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61024> (in English)
10. He, D., Liu, X., & Zhong, B. (2020). Sustainable belt conveyor operation by active speed control. *Measurement*, 154, 107458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107458> (in English)

МАШИНОБУДУВАННЯ

11. Gładysiewicz, L., Król, R., & Kisielewski, W. (2019). Measurements of loads on belt conveyor idlers operated in real conditions. *Measurement*, 134, 336-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.068> (in English)
12. Li, J., & Pang, X. (2018). Belt conveyor dynamic characteristics and influential factors. *Shock and Vibration*, 2018, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8106879> (in English)
13. Raksha, S. V., Kuropiatnyk, O. S., & Krasnoshchok, O. L. (2019). Justification of criteria for ropeways energy efficiency. *Science and Transport Progress*, 6(64), 60-71. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195601> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.02.2021

Прийнята до друку: 11.06.2021

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.463.65-047.37

А. О. ЛОВСЬКА^{1*}, О. В. ФОМІН², А. В. РИБІН³

^{1*}Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», 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

²Каф. «Вагони та вагонне господарство», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, Київ, Україна, 04071, тел. +380 (67) 813 97 88, ел. пошта fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

³Каф. «Інженерія вагонів та якість продукції», Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 35, ел. пошта rybinandrey2006@gmail.com, ORCID 0000-0003-4430-8018

Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції піввагона з пружно-в'язким наповнювачем у хребтовій балці

Мета. У роботі передбачено дослідити динамічну навантаженість несучої конструкції піввагона з пружно-в'язким наповнювачем у хребтовій балці шляхом математичного моделювання. **Методика.** Здійснено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції піввагона із замкнутою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем із пружно-в'язкими властивостями. До уваги взято випадок найбільшого навантаження несучої конструкції піввагона в експлуатації – маневрове співударення з урахуванням дії на задній упор автозцепу навантаження у 3,5 МН. Для визначення динамічної навантаженості піввагона використано математичну модель, сформовану проф. Г. І. Богомазом. У рамках цього дослідження модель доопрацьовано шляхом адаптації її до визначення динамічної навантаженості піввагона. У ній враховано сили тертя, які виникають між п'ятниками кузова та підп'ятниками візків, а також властивості енергопоглинального матеріалу. Розв'язок математичної моделі здійснено в програмному комплексі MathCad. При цьому диференціальні рівняння руху зведено до нормальної форми Коші, а потім інтегровано за методом Рунге–Кутта. Початкові переміщення та швидкості враховано рівними нулю. Розрахунок здійснено на прикладі універсального піввагона моделі 12–757 виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук) на типових візках 18–100. **Результати.** Отримано прискорення як складові динамічного навантаження, які діють на піввагон із замкнутою конструкцією хребтової балки, заповненої наповнювачем із пружно-в'язкими властивостями. Встановлено, що за жорсткості матеріалу, яким заповнена хребтова балка, 82 кН/м, а також коефіцієнта в'язкого опору 120 кН·с/м максимальні прискорення несучої конструкції піввагона складають близько 37 м/с² (0,37 g). **Наукова новизна.** Запропоновано математичну модель для визначення динамічної навантаженості піввагона із замкнутою конструкцією хребтової балки, заповненої наповнювачем із пружно-в'язкими властивостями. Модель дозволяє отримати прискорення як складові динамічного навантаження, які діють на несучу конструкцію піввагона, з урахуванням заходів щодо вдосконалення за маневрового співударення. **Практична значимість.** Результати проведених досліджень сприятимуть зменшенню пошкоджень несучих конструкцій піввагонів в експлуатації, скороченню витрат на їх утримання, створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій рухомого складу, а також підвищенню ефективності його експлуатації.

Ключові слова: піввагон; несуча конструкція; хребтова балка; динамічна навантаженість; маневрове співударення

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Вступ

В умовах сучасного розвитку транспортної галузі утримання лідерських позицій вимагає від залізниці введення в експлуатацію рухомого складу нового покоління. На стадії конструювання такого рухомого складу важливим є використання методів оптимального проектування, обґрунтування та впровадження нових прогресивних матеріалів, інноваційних рішень тощо.

Уже тривалий час найбільш затребуваним типом вантажного вагона в експлуатації є піввагон. Несуча конструкція цього вагона складається з рами та кузова. Причому основні поздовжні навантаження в експлуатації сприймає хребтова балка вагона. Найбільш навантаженим режимом її експлуатації є маневрове співударення вагонів. Варто сказати, що внаслідок періодичної дії повздовжніх навантажень на раму піввагона, підвищених швидкостей співударень в умовах маневрових робіт та інших експлуатаційних режимів можуть мати місце такі пошкодження, як тріщини, деформації, обриви зварювальних швів тощо (рис. 1).

Така обставина викликає необхідність вилучення вагонів з інвентарного парку або здійснення позапланових видів ремонту, а отже, і додаткових витрат на їх утримання. У зв'язку з цим важливим є вдосконалення несучих конструкцій піввагонів із метою зменшення їх динамічної навантаженості за експлуатаційних режимів.

Автори статті провели аналітичний огляд публікацій із питань забезпечення міцності несучих конструкцій вагонів за експлуатаційних режимів навантажень.

У публікації [8] обґрунтовано застосування універсального профілю для хребтової балки вагона. Цей профіль має С-подібну конфігурацію. Наведено результати розрахунку на міцність, які підтвердили доцільність запропонованих рішень. Слід зазначити, що заходів щодо зменшення динамічної навантаженості рами піввагона при цьому не запропоновано.

Визначенню міцності рами швидкісного вагона-платформи присвячена робота [1]. З'ясовано поля дислокації максимальних еквівалентних напружень та основні показники міцності рами.

а а



б – б



Рис. 1. Пошкодження рами піввагона:
а – тріщина в хребтовій балці;
б – відрив шворневої балки

Fig. 1. Damage to the gondola car frame:
a – center sill crack; b – body bolster break

Проведено порівняльний аналіз меж витривалості рами за результатами теоретичного розрахунку та стендових випробувань. Разом із цим питанням зменшення навантаженості рами вагона-платформи уваги не приділено.

Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень міцнісних якостей елементів рухомого складу на прикладі хребтової балки вантажних вагонів висвітлено в роботі [7]. Наведений приклад використання запропонованого

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

підходу засвідчив його працездатність та ефективність, а також правильність спрямування відповідних науково-дослідних робіт.

У публікації [2] подано розрахунок на міцність кузова піввагона за найбільш несприятливих експлуатаційних режимів навантажень та запропоновано заходи щодо вдосконалення його несучої конструкції.

Однак такі заходи спрямовані на посилення складових несучих конструкцій вагонів, а не зменшення їх динамічної навантаженості в експлуатації.

Обґрунтування вдосконалення несучої конструкції піввагона для забезпечення міцності та надійності його експлуатації висвітлено в роботі [9]. Із метою визначення міцності та втомної довговічності кузова піввагона використано методи математичного моделювання. Результати моделювання підтвердили доцільність запропонованого вдосконалення. Зазначимо, що запропоновані заходи не сприятимуть зменшенню динамічної навантаженості несучої конструкції піввагона в експлуатації.

У роботах [10, 11] наведено результати визначення динамічної навантаженості піввагона з наповнювачем у несучій конструкції. Особливістю піввагона є те, що складові несучої конструкції виготовлені з труб круглого перерізу. При цьому як наповнювач розглянуто піноалюміній. Однак така несуча конструкція вагона характеризується складністю з технологічної точки зору виготовлення та експлуатації.

Мета

Основною метою статті є дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції піввагона з пружно-в'язким наповнювачем у хребтовій балці шляхом математичного моделювання. Для досягнення зазначеної мети визначено такі задачі:

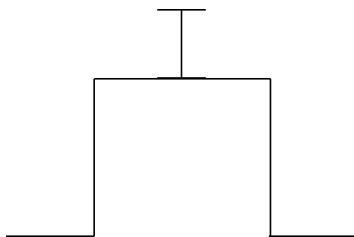
- скласти розрахункову схему несучої конструкції піввагона з пружно-в'язким наповнювачем у хребтовій балці за маневрового співударяння;
- визначити динамічну навантаженість несучої конструкції піввагона.

Методика

Типова хребтова балка піввагона складається з двох Z-подібних профілів, перекритих двотавром (рис. 2, а). Для поліпшення міцності хребтової балки та зменшення витрат на позапланові види ремонтів піввагонів запропоновано використання профілів, які утворюють замкнений переріз хребтової балки, заповнений енергопоглинальним матеріалом у пружно-в'язкими властивостями. Зверху на хребтовій балці розміщується двотавр (рис. 2, б).

Для обґрунтування використання хребтової балки запропонованої конструкції проведено математичне моделювання динамічної навантаженості піввагона. До уваги взято випадок поздовжньої навантаженості несучої конструкції піввагона за маневрового співударяння. Розрахункова схема піввагона наведена на рис. 3.

а – а



б – б

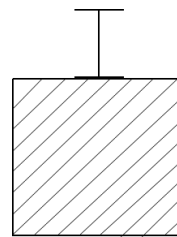


Рис. 2. Переріз хребтової балки піввагона:

а – типова конструкція; б – удосконалена конструкція

Fig. 2. Cross section of the center sill of the gondola car:

а – typical design; б – improved design

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

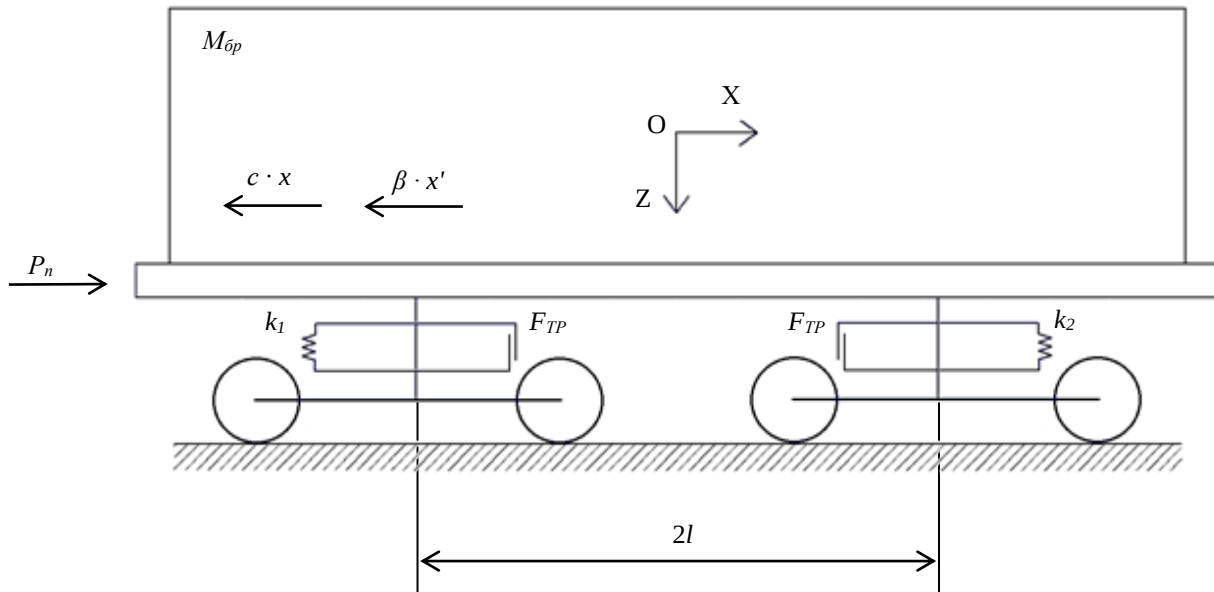


Рис. 3. Розрахункова схема піввагона

Fig. 3. Gondola car calculation scheme

Для визначення динамічної навантаженості піввагона використано математичну модель, сформовану проф. Г. І. Богомазом. У рамках цього дослідження модель доопрацьовано шляхом адаптації її до визначення динамічної на-

вантаженості піввагона. У ній враховано сили тертя, які виникають між п'ятниками кузова та підп'ятниками візків, а також властивості енергопоглинального матеріалу.

$$M_{br} \cdot \ddot{x} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{\varphi} = P_n - 2P_{TP} - \beta \cdot \dot{x} - c \cdot x; \quad (1)$$

$$I_B \cdot \ddot{\varphi} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{x} - g \cdot \varphi \cdot (M_B \cdot h) = l \cdot F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2); \quad (2)$$

$$M_B \cdot \ddot{z} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2), \quad (3)$$

де $\Delta_1 = z - l \cdot \varphi$; $\Delta_2 = z + l \cdot \varphi$, M_{br} – маса брутто вагона; M_B – маса несучої конструкції вагона; I_B – момент інерції вагона; P_n – величина поздовжньої сили на задній упор автозчепу; P_{TP} – сили тертя, які виникають між п'ятниками рами та підп'ятниками візків; c – жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка; β – коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка; l – половина бази вагона; F_{TP} – абсолютне значення сили сухого тертя у ресорному комплекті; k_1 , k_2 – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона; x , φ , z – координати, що відповідають, відповідно, поздовжньому, кутовому навколо поперечної осі та вертикальному переміщенню вагона.

Результати

Розрахунок проведено для піввагона моделі 12–757 на візках 18–100. Значення поздовжньої сили, яка діє на задні упори автозчепу, узятю рівною 3,5 МН [3, 4]. Вхідними параметрами математичної моделі є технічні характеристики піввагона, візків, сила удару в автозчеп, а також властивості енергопоглинального матеріалу. Враховано, що жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка, складає 82 кН/м, а коефіцієнт в'язкого опору – 120 кН · с/м.

Розв'язок диференціальних рівнянь (1) – (3) здійснено за методом Рунге–Кутта в програмному комплексі MathCad [5, 6] у вигляді:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{P_{\Pi} - (P_{\Pi} - 2P_{\text{тр}} - \beta \cdot y_2 - c \cdot y_1) - (M_{\text{Б}} \cdot h) \cdot \dot{y}_4}{M_{\text{бп}}} \\ \frac{l \cdot F_{\text{ТР}} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2) - (M_{\text{Б}} \cdot h) \cdot \dot{y}_2 + g \cdot y_3 \cdot (M_{\text{Б}} \cdot h)}{I_{\text{Б}}} \\ \frac{k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{\text{ТР}} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2)}{M_{\text{Б}}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$Z = \text{rkfixed}(Y0, tn, tk, n, F).$$

При цьому $y_1 = x$; $y_3 = \varphi$; $y_5 = z$; $y_2 = y'_1$;
 $y_4 = y'_3$; $y_6 = y'_5$.

Початкові умови взято рівними нулю:

$$Y0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Узагальнені прискорення обчислено в масиві $ddq_{j,i}$:

$$ddq_{j,1} = \frac{P_{\Pi} - (P_{\Pi} - 2P_{\text{тр}} - \beta \cdot y_2 - c \cdot y_1) - (M_{\text{Б}} \cdot h) \cdot \dot{y}_4}{M_{\text{бп}}}, \quad (5)$$

$$ddq_{j,2} = \frac{l \cdot F_{\text{ТР}} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2) - (M_{\text{Б}} \cdot h) \cdot \dot{y}_2 + g \cdot y_3 \cdot (M_{\text{Б}} \cdot h)}{I_{\text{Б}}}, \quad (6)$$

$$ddq_{j,3} = \frac{k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{\text{ТР}} (\text{sign} \dot{\Delta}_1 - \text{sign} \dot{\Delta}_2)}{M_{\text{Б}}}. \quad (7)$$

Результати розрахунку дозволили отримати прискорення, які діють на раму піввагона із замкненою конструкцією хребтової балки (рис. 4).

При цьому максимальна величина прискорення склала близько 37 м/с^2 . Отримана величина прискорення на 4 % нижча за прискорення, яке діє на піввагон із типовою конструкцією хребтової балки.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

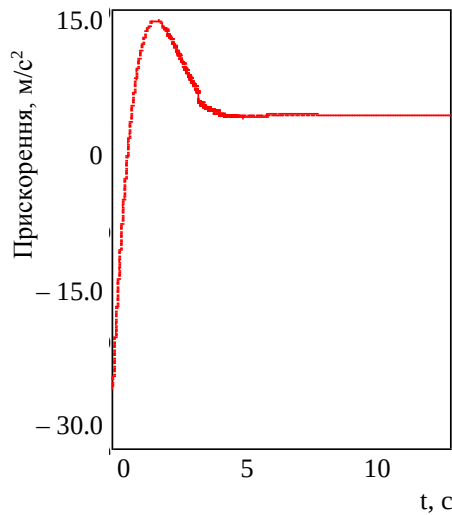


Рис. 4. Прискорення, які діють у центрі мас несучої конструкції піввагона

Fig. 4. Accelerations acting in the mass center of the supporting structure of the gondola car

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано математичну модель для визначення динамічної навантаженості піввагона із замкненою конструкцією хребтової балки, заповненої наповнювачем із пружно-в'язкими властивостями. Модель дозволяє отримати прискорення як складові динамічного навантаження, які діють на несучу конструкцію півва-

гона, з урахуванням заходів щодо вдосконалення за маневрового співударяння.

Результати проведених досліджень сприятимуть зменшенню пошкоджень несучих конструкцій піввагонів в експлуатації, скороченню витрат на їх утримання, створенню напрацювань щодо проєктування інноваційних конструкцій рухомого складу, а також підвищенню ефективності його експлуатації.

Висновки

1. Складено розрахункову схему несучої конструкції піввагона з пружно-в'язким наповнювачем у хребтовій балці за маневрового співударяння. До уваги взято плоску систему координат. Враховано, що піввагон має три ступені вільності. Під час складання розрахункової схеми також враховано сили тертя, які виникають між п'ятниками кузова та підп'ятниками візків, і властивості енергопоглинального матеріалу.

2. Визначено динамічну навантаженість несучої конструкції піввагона. Враховано, що жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка, складає 82 кН/м, а коефіцієнт в'язкого опору – 120 кН · с/м.

Максимальна величина прискорення, яке діє на несучу конструкцію піввагона, склала близько 37 м/с². Отримана величина прискорення на 4 % нижча за прискорення, яке діє на піввагон із типовою конструкцією хребтової балки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко К. В. Оценка прочности рамы скоростного вагона-платформы. *Транспорт Российской Федерации*. 2014. № 3 (52). С. 49–51.
2. Візник Р. І., Чепурченко І. В., Яценко А. О. Особливості визначення експлуатаційних навантажень кузова напіввагона та шляхи удосконалення його конструкції з метою забезпечення міцності і збереження. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 159. С. 91–97.
DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018>
3. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действителен от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.
4. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проєктування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 250 с.
5. Дьяконов В. *MATHCAD 8/2000 : спец. справ.* Санкт-Петербург : Питер, 2000. 592 с.
6. Кирьянов Д. В. *Mathcad 13*. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. 608 с.
7. Недужа Л. О., Швець А. О. Теоретичні та експериментальні дослідження міцнісних якостей хребтової балки вантажного вагона. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 131–147.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123457>
8. Соколов А. М., Савушкина Ю. В., Новоселов А. Ю., Коротков Д. С. Универсальный профиль для хребтовой балки вагонов. *Транспорт Российской Федерации*. 2019. № 1 (80). С. 50–55.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

9. Antipin D. Ya., Racin D. Yu, Shorokhov S. G. Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the OpenTop Wagon Frame by means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 150–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738>
10. Fomin O., Gerlici J., Gorbunov M., Vatulia G., Lovska A., Kravchenko K. Research into the Strength of an OpenWagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*. 2021. Vol. 14 (12). P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
11. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and Strength of Circular Tube Open Wagons with Aluminum Foam Filled Center Sills. *Materials*. 2021. Vol. 14 (8). P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>

A. O. LOVSKA^{1*}, O. V. FOMIN², A. V. RYBIN³

^{1*}Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail alyonalovskaya.vagons@gmail.com, ORCID 0000-0002-8604-1764

²Dep. «Cars and Carriage Facilities», State University of Infrastructure and Technologies, Kyrylivska St., 9, Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 813 97 88, e-mail fomin1985@ukr.net, ORCID 0000-0003-2387-9946

³Dep. «Wagon Engineering and Product Quality», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61500, tel. +38 (057) 730 10 35, e-mail rybinandrey2006@gmail.com, ORCID 0000-0003-4430-8018

Dynamic Loading Research of the Gondola Car Supporting Structure with an Elastic-Viscous Filler in a Center Sill

Purpose. The work aims to investigate dynamic loading of the supporting structure of a gondola car with an elastic-viscous filler in the center sill by means of mathematical modeling. **Methodology.** Mathematical modeling of the dynamic loading of the supporting structure of a gondola car with a closed center sill filled with a filler with elastic-viscous properties has been carried out. The case of the highest load on the supporting structure of the gondola car in operation is taken into account – a shunting collision, taking into account the action of a load of 3.5 MN on the rear stop of the automatic coupler. To determine the dynamic loading of a gondola car, a mathematical model formed by prof. G. I. Bohomaz was used. However, within the framework of this study, the model was refined by adapting it to the determination of the dynamic loading of a gondola car. It also takes into account the friction forces arising between the center plates of the body and the center pivots of the bogies, as well as the properties of the energy-absorbing material. The solution of the mathematical model was carried out in the MathCad software package. In this case, the differential equations of motion were reduced to the Cauchy normal form, and then integrated using the Runge-Kutta method. Initial displacements and speeds are taken equal to zero. The calculation was carried out on the example of a universal gondola car model 12-757 built by Kriukivskiy Carriage Works PJSC (Kremenchug) on standard bogies 18-100. **Findings.** Accelerations are obtained as components of a dynamic load acting on a gondola car with a closed center sill structure filled with an elastic-viscous filler. It was found that with the stiffness of the center sill filler of 82 kN/m, as well as the viscous resistance coefficient of -120 kN·s/m, the maximum accelerations of the gondola car supporting structure is about 37 m/s² (0.37g). **Originality.** A mathematical model is proposed for determining the dynamic loading of a gondola car with a closed structure of a center sill filled with an elastic-viscous filler. The model makes it possible to obtain accelerations as the components of the dynamic loading acting on the supporting structure of the gondola car, taking into account the improvement measures during a shunting collision. **Practical value.** The results of the research will help to reduce the damage to the supporting structures of gondola cars in operation, reduce the cost of their maintenance, create developments in the design of innovative structures of rolling stock, as well as increase the efficiency of its operation.

Keywords: gondola car; supporting structure; center sill; dynamic loading; shunting impact

REFERENCES

1. Bondarenko, K. V. (2014). Strength evaluation for high-speed platform wagon frame. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 3(52), 49-51. (in Russian)
2. Viznyak, R. I., Chepurchenko, I. V., Yatsenko, A. O. (2016). Features of identifying operational loads the body of open-top car and ways of improving its design to ensure durability and preservation. *Collection of Scien-*

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- tific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 159, 91-97.
DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.159.2016.67018> (in Ukrainian)
3. *Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam*, 54 GOST 33211-2014 (2016). (in Russian)
 4. *Vagoni vantazhni. Zagalni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv koliyi 1520mm (nasamohidnih)*, 250 DSTU 7598:2014 (2015). (in Ukrainian)
 5. Dyakonov, V. (2000). *MATHCAD 8/2000: spetsialnyy spravochnik*. Saint Petersburg: Piter. (in Russian)
 6. Kiryanov, D. V. (2006). *Mathcad 13*. Saint Petersburg: BHV-Peterburg. (in Russian)
 7. Neduzha, L. O., & Shvets, A. O. (2018). Theoretical and experimental research of strength properties of spine beam of freight cars. *Science and Transport Progress*, 1(73), 131-147.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123457> (in Ukrainian)
 8. Sokolov, A. M., Savushkina, I. V., Novoselov, A. Iu., & Korotkov, D. S. (2019). Multifunctional configuration for wagon longitudinal tie rod. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 1(80), 50-55. (in Russian)
 9. Antipin, D. Y., Racin, D. Y., & Shorokhov, S. G. (2016). Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-top Wagon Frame by means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 150, 150-154.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738> (in English)
 10. Fomin, O., Gorbunov, M., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., & Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*, 14(12), 1-10.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123420> (in English)
 11. Fomin, O., Gorbunov, M., Lovska, A., Gerlici, J., & Kravchenko, K. (2021). Dynamics and Strength of Circular Tube Open Wagons with Aluminum Foam Filled Center Sills. *Materials*, 14(8), 1-12,
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14081915> (in English)

Надійшла до редколегії: 08.02.2021

Прийнята до друку: 07.06.2021

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 624.15:539.3

В. Г. ШАПОВАЛ^{1*}, І. О. ПОНОМАРЕНКО^{2*}, Г. П. ІВАНОВА^{3*}, Р. М. ТЕРЕЩУК^{4*},
Д. О. ШАШЕНКО^{5*}

^{1*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 471 81 92, ел. пошта shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

^{2*}Каф. «Промислове і цивільне будівництво», Черкаський державний технологічний університет, б-р Шевченка, 460, Черкаси, Україна, 18006, тел. +38 (067) 962 76 71, ел. пошта ivan1990ponomarenko@gmail.com, ORCID 0000-0003-4296-3975

^{3*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

^{4*}Каф. «Будівництво, геотехніка і геомеханіка», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (095) 751 25 26, ел. пошта Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

^{5*}Каф. «Геодезія», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (096) 716 73 93, ел. пошта shashenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-0762-8306

Визначення конструктивних параметрів дискретних утримувальних споруд

Мета. Під час проєктування протизсувних конструкцій виникає багато проблем, тому дискретні конструкції є альтернативою твердим протизсувним конструкціям. У цій роботі передбачено розробити методику визначення зони впливу дискретних утримувальних споруд на взаємодію з ними ґрунтового масиву, що сповзає, та методику, що дозволяє оцінити умови стійкого стану ґрунту, який взаємодіє з дискретними утримувальними конструкціями, шляхом побудови аналітичних залежностей, необхідних для визначення розмірів зони, та коефіцієнта стійкості ґрунту. **Методика.** Для досягнення мети використано теоретичні дослідження геомеханічних процесів із застосуванням аналітичних і чисельних математичних методів, а також аналіз та узагальнення результатів теоретичних досліджень. **Результати.** Наведені в роботі результати досліджень дозволяють під час проєктування зсувних дискретних споруд визначити область взаємодії зсуву з дискретними утримувальними спорудами, а також врахувати коефіцієнт стійкості укладеного між елементами дискретної утримувальної конструкції ґрунту. Отримано залежності для визначення розмірів зони, у якій відбувається взаємодія ґрунтового масиву, що сповзає, з дискретними утримувальними конструкціями, і коефіцієнта стійкості ґрунту в зоні його взаємодії з цими спорудами. **Наукова новизна.** Аналітичні залежності дозволяють розрахунковим шляхом визначити стрілу підйому арки відвалу ґрунту між елементами дискретної протизсувної утримувальної конструкції та коефіцієнт стійкості ґрунту. **Практична значимість.** Результати досліджень дозволяють під час проєктування утримувальних дискретних споруд визначити область їх взаємодії із зсувом та коефіцієнт стійкості ґрунту, укладеного між їх елементами.

Ключові слова: зсув; протизсувна утримувальна конструкція; суцільна утримувальна конструкція; дискретна утримувальна конструкція; коефіцієнт стійкості; зона взаємодії

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Вступ

На сьогодні під час проектування протизсувних утримувальних споруд мають місце такі проблеми [1, 2]:

1. Застосування суцільних утримувальних споруд (підпірних стін) – занадто дорогий і трудомісткий процес.

2. Влаштування таких споруд спричиняє підрізання укосу (схилу) і, як наслідок, утрату ним стійкості, а також відведення підземних вод.

3. Альтернативою суцільним протизсувним є дискретні утримувальні конструкції [6], однак, за їх використання постають такі проблеми:

3.1. Є ризик втрати міцності та стійкості ґрунту, який знаходиться між елементами дискретної утримувальної конструкції, що призводить до цього – руйнування і зрештою – сходження зсуву.

3.2. Дискретні (особливо багаторядні) утримувальні конструкції створюють для підземних вод бар'яний ефект. Наслідок – підйом рівня підземних вод, погіршення стану ґрунту, який знаходиться в зоні впливу утримувальної конструкції, та його руйнування.

3.3. У наш час не існує методик визначення зони впливу дискретних утримувальних споруд на взаємодію з ними ґрунтового масиву, що сповзає. Це важливо знати під час використання для стабілізації зсувонебезпечних ділянок комбінації дискретних утримувальних конструкцій і закріплення ґрунту (наприклад, методами силікатизації, цементзації та подібних).

3.4. Також поки не існує методик, що дозволяють оцінити умови стійкого стану ґрунту, який взаємодіє з дискретними утримувальними конструкціями.

Для врахування взаємодії дискретних утримувальних конструкцій зі зсувами використовують теорію арок ефекту, яку для прогнозу стійкості склепін підземних виробок уперше запропонував М. М. Протод'яконов [11].

Суть цієї теорії полягає в тому, що під час обвалення гірської породи в покрівлі виробки утворюється арокне склепіння, форма якого

близька до параболічної. Стрілу підйому арки визначають із використанням емпіричної формули, яка враховує міцність породи на стискання та величину прогону арки. Оскільки методика М. М. Протод'яконова спрямована на визначення навантаження на кріплення, надалі її розглядати не будемо.

Заслуговує на увагу варіант використання теорії арок ефекту, запропонований Л. К. Гінзбургом [2]. Запропонована ним розрахункова схема наведена на рис. 1, а. Передбачено, що руйнування ґрунту відбувається вздовж лінії, що проходить через замок арки. Були отримані формули для розрахунку стріли підйому арки відвалу та відстані між елементами утримувальних конструкцій:

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{6 \cdot \xi^2 \cdot c \cdot h \cdot \cos(\alpha) - E \cdot [2 \cdot \xi - \operatorname{tg}(\varphi)]}{0,2 \cdot E \cdot \xi^2 \cdot \cos(\alpha)}, \\ \xi &= \frac{f}{b} = \frac{E + \sqrt{E^2 - 2 \cdot E \cdot h \cdot c \cdot \operatorname{tg}(\varphi)}}{4 \cdot h \cdot c} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де b – відстань між елементами утримувальної конструкції; f – стріла підйому арки відвалу; c – питоме зчеплення; φ – кут внутрішнього тертя; E – зсувний тиск; h – товщина ґрунтової маси в місці розташування утримувальної конструкції.

Аналіз формули (1) дозволяє зробити висновки, що відстань між опорами вимірюють в у частках одиниці (насправді вона повинно мати розмірність «метри»). Крім того, ця формула не дає відповіді на запитання про те, у якому стані (стійкому, байдужому або нестійкому) перебуває ґрунт між елементами утримувальної конструкції. Тому найбільш перспективним для цієї задачі є розроблений школою проф. О. М. Шашенка підхід, суть якого полягає в підрахунку утримувальних і зсувних ґрунтових сил і визначенні на цій основі коефіцієнта стійкості, що вказує на стійкість породного (у нашому випадку ґрунтового) масиву [3, 5, 9, 10, 11].

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

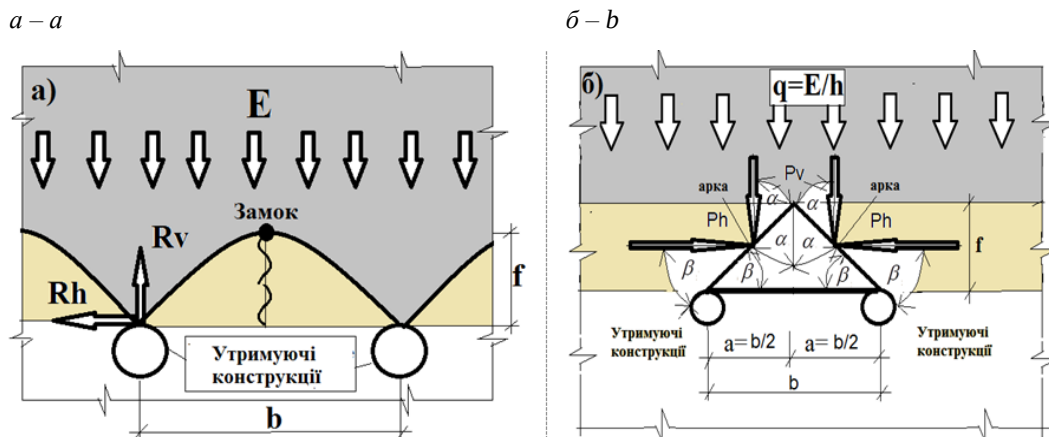


Рис. 1. Розрахункові схеми системи «зсув – дискретна утримувальна конструкція»: а – розрахункова схема Л. К. Гінзбурга; б – розрахункова схема, запропонована в цій статті.

На рисунках узяті позначення:

R_v – вертикальна опорна реакція; R_h – горизонтальна опорна реакція; E – зсувний тиск; b – прогін арки;

β – кут нахилу осі арки до горизонту; P_v і P_h – вертикальний та горизонтальний тиск у точці на осі арки.

Світлим кольором позначено ґрунт у зоні взаємодії зсуву з утримувальною конструкцією

Fig. 1. Calculation schemes of the system «shift – discrete retaining structure»:

a – calculation scheme of L. K. Ginzburg; b – calculation scheme proposed in this article.

Designations:

R_v – vertical support reaction; R_h – horizontal support reaction; E – shear pressure; b – span of the arch;

β – canting angle of arc axis; P_v and P_h – vertical and horizontal pressure at a point on the arch axis.

The soil in the interaction zone of the landslide with the restraining construction is presented in light color

Мета

У цій статті передбачено розробити методику визначення зони впливу дискретних утримувальних споруд на взаємодію з ними ґрунтового масиву, що сповзає, та методику, що дозволяє оцінити умови стійкого стану ґрунту, який взаємодіє з дискретними утримувальними конструкціями, шляхом побудови аналітичних залежностей, необхідних для визначення розмірів зони, що сповзає, та коефіцієнта стійкості ґрунту.

Методика

Завдання дослідження та взяті припущення були сформульовані таким чином:

1. Під час руйнування ґрунтового масиву, що взаємодіє з дискретною утримувальною спорудою, утворюється арка відвалу одиничної товщини, спрямована опуклою частиною назустріч вектору переміщення зсуву. Для зручності візьмемо її стрілковою (розрахункова схема на рис. 1, б).

2. До арки прикладене рівномірне розподілене навантаження q , яке чисельно дорівнює відношенню зсувного тиску E до товщини ґрунтової маси h , тобто $q = \frac{E}{h}$ (рис. 1, б).

3. Опори арок спираються на сусідні елементи дискретної утримувальної конструкції. При цьому виникають горизонтальні (R_h) і вертикальні (R_v) реакції.

4. Відома форма контуру області відвалу гірської породи над виробкою (точніше, її рівняння $Y(x)$).

5. Механізм руйнування породи – зсув. Тому її поведінка під час руйнування підпорядковується умові міцності Кулона–Мора [3, 5, 7, 11]:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c, \quad (2)$$

де τ – дотичне руйнівне напруження; σ – нормальне напруження; φ – кут внутрішнього тертя; c – питоме зчеплення.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

6. Відомі міцнісні характеристики ґрунту (тобто його питоме зчеплення c і кут внутрішнього тертя φ).

7. Прикладені до осей арок горизонтальні сили P_h узяті рівними нулю (це найбільш невідповідний випадок).

У рамках критерію міцності Кулона–Мора необхідно визначити стрілу підйому арки відвалу f та коефіцієнт стійкості ґрунту, що взаємодіє з протизсувною спорудою.

Результати

Нижче представлений алгоритм визначення стріли підйому арки відвалу ґрунту та коефіцієнта його стійкості.

1. Рівняння межі арки відвалу в першому наближенні подано у вигляді:

$$Y(x) = \begin{cases} \frac{f}{a} \cdot x & \text{за } x \in (0, a); \\ f \cdot \left(2 - \frac{x}{a}\right) & \text{за } x \in (a, b); \\ a = \frac{b}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

2. Кут між віссю арки та нормаллю до горизонту дорівнює:

$$\alpha(x) = \alpha = \arctg \left[\frac{dY(x)}{dx} \right] = \arctg \left(\frac{f}{a} \right). \quad (4)$$

3. Кут нахилу осі арки до горизонту дорівнює:

$$\beta(x) = \beta = \frac{\pi}{2} - \arctg \left[\frac{dY(x)}{dx} \right] = \frac{\pi}{2} - \arctg \left(\frac{f}{a} \right). \quad (5)$$

4. Диференціал зсувних сил:

$$dT_{sd}(x) = q \cdot \sin(\alpha) = \frac{q \cdot f \cdot dx}{\sqrt{a^2 + f^2}}. \quad (6)$$

5. Диференціал проекції зсувних сил на вертикальну вісь Oy визначаємо таким чином:

$$dT_{sd,y}(x) = dT_{sd}(x) \cdot \cos(\beta) = \frac{q \cdot f \cdot a \cdot dx}{a^2 + f^2}. \quad (7)$$

6. Диференціал нормальної до осі арки сили визначаємо за формулою:

$$dN(x) = q \cdot \cos(\alpha) = \frac{q \cdot a \cdot dx}{\sqrt{a^2 + f^2}}. \quad (8)$$

7. Диференціал сили, що утримує ґрунтовий масив, дорівнює:

$$dT_{ud}(x) = dN(x) \cdot tg(\varphi) + c \cdot ds = \frac{q \cdot a^2 \cdot tg(\varphi) + c \cdot (a^2 + f^2)}{a \cdot \sqrt{a^2 + f^2}} \cdot dx, \quad (9)$$

де $ds = \frac{dx}{\cos(\alpha)}$ – диференціал дуги осі арки.

8. Диференціал проекції сили на вертикальну вісь, що утримує ґрунтовий масив, дорівнює:

$$dT_{ud,y}(x) = dT_{ud}(x) \cdot \sin(\beta) = \frac{q \cdot a^2 \cdot tg(\varphi) + c \cdot (a^2 + f^2)}{a^2 + f^2} \cdot dx. \quad (10)$$

9. Сума проекцій зсувних сил на вертикальну вісь Oy дорівнює:

$$T_{sd,y} = 2 \cdot \int_0^a dT_{sd,y}(x) = 2 \cdot \frac{q \cdot f \cdot a^2}{a^2 + f^2}. \quad (11)$$

10. Сума проекції сил на вертикальну вісь, утримують ґрунтовий масив, дорівнює:

$$T_{ud,y} = 2 \cdot \int_0^a dT_{ud,y}(x) = 2 \cdot \frac{q \cdot a^2 \cdot tg(\varphi) + c \cdot (a^2 + f^2)}{a^2 + f^2} \cdot a. \quad (12)$$

11. Коефіцієнт стійкості арки відвалу дорівнює відношенню суми її утримувальних сил до суми зсувних сил:

$$K_u = \frac{T_{ud,y}}{T_{sd,y}} = \frac{q \cdot a^2 \cdot tg(\varphi) + c \cdot (a^2 + f^2)}{f \cdot q \cdot a}. \quad (13)$$

12. Формула (13) є функціоналом, який має екстремум (точніше, мінімум) якщо значення стріли підйому арки дорівнює [4]:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

$$f = \frac{\sqrt{q \cdot c \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c^2}}{c} \cdot a = \frac{\sqrt{q \cdot c \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c^2}}{2 \cdot c} \cdot b. \quad (14)$$

Аналіз формули (14) вказує на те, що відповідному мінімальному значенню коефіцієнта стійкості відповідає значення стріли підйому арки вивалу, чисельно рівне міцності ґрунту, розрахованій із використанням критерію О. М. Шашенка [8], поділеній на питома зчеплення ґрунту та помноженій на половину прогону між сусідніми елементами утримувальної конструкції.

13. Далі знайдемо мінімальне значення коефіцієнта стійкості з усіх його можливих значень. Для цього підставимо (13) у (14). Маємо:

$$K_{u,\min} = 2 \cdot \frac{\sqrt{q \cdot c \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c^2}}{q}. \quad (15)$$

Аналіз формули (15) вказує на те, що мінімальне значення коефіцієнта стійкості чисельно дорівнює подвоєній міцності ґрунту, розрахованій із використанням критерію О. М. Шашенка [8], поділеній на зсувний тиск, віднесений до товщини ґрунтової маси в місці знаходження утримувальної конструкції.

Формули (14) і (15) дозволяють визначити критичні значення стріли підйому арки відвалу та її коефіцієнта стійкості для одиничного шару ґрунту. Щоб знайти ці параметри для всієї ґрунтової маси, врахуємо рівність:

$$q = \frac{E}{h}, \quad (16)$$

де h – товщина ґрунтової маси в місці розташування утримувальної конструкції. Маємо:

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{\sqrt{E \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + h \cdot c}}{2 \cdot \sqrt{c \cdot h}} \cdot b; \\ K_{u,\min} &= 2 \cdot \frac{\sqrt{E \cdot c \cdot h \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + (h \cdot c)^2}}{E} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Недоліком формул (17) є те, що вони можуть бути застосовані тільки до однорідних основ. Для його усунення замінимо міцнісні характеристики їх середньозваженими значеннями $\bar{c}$ і $\bar{\varphi}$. У цьому випадку рівності (17) набудуть вигляду:

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{\sqrt{E \cdot \operatorname{tg}(\bar{\varphi}) + h \cdot \bar{c}}}{2 \cdot \sqrt{\bar{c} \cdot h}} \cdot b; \\ K_{u,\min} &= 2 \cdot \frac{\sqrt{E \cdot \bar{c} \cdot h \cdot \operatorname{tg}(\bar{\varphi}) + (h \cdot \bar{c})^2}}{E}; \\ \bar{c} &= \frac{\sum_{i=1}^m c_i \cdot h_i}{h}; \quad \bar{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^m \varphi_i \cdot h_i}{h}, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

де c_i і φ_i – міцнісні характеристики i – того ґрунтового шару завтовшки h_i , а m – кількість ґрунтових шарів.

Наукова новизна та практична значимість

Отримано аналітичні залежності, що дозволяють розрахунковим шляхом визначити такі параметри системи «дискретна протизсувна конструкція – ґрунтовий масив, що сповзає»:

– стрілу підйому арки відвалу ґрунту між елементами дискретної протизсувної утримувальної конструкції (тобто зону впливу дискретної протизсувної споруди на зсув);

– коефіцієнт стійкості ґрунту, укладеного між елементами дискретної протизсувної споруди.

Наведені в роботі результати досліджень дозволяють під час проєктування зсувних дискретних споруд визначити область взаємодії зсуву з дискретними утримувальними спорудами (це важливо за додаткового використання методів поліпшення будівельних властивостей ґрунтових основ), а також врахувати коефіцієнт стійкості укладеного між елементами дискретної утримувальної конструкції ґрунту (це важливо в разі вибору місця влаштування протизсувної споруди, призначення кроку розміщення її елементів та інших конструктивних параметрів).

Висновки

У цілому можна зробити висновок, що отримані у роботі формули дозволяють визначити зону зсуву, у якій відбувається його взаємодія з переривчастими утримувальними спорудами, і коефіцієнт стійкості ґрунту в цій зоні.

Ці дані мають важливе значення для проєктування дискретних утримувальних споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Билеуш А. И. *Оползни и противооползневые мероприятия*. Киев : Наукова думка, 2009. 560 с.
2. Гинзбург Л. К. *Противооползневые сооружения*. Днепропетровск : Лира ЛТД, 2007. 188 с.
3. Ковров О. С., Терещук Р. М. Аналіз підходів щодо визначення міцнісних характеристик гірських порід для прогнозу зсувонебезпечності укосів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2020. Т. 28, № 1. С. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-1-63-72>
4. Корн Г. *Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы*. Москва : Книга по Требованию, 2014. 832 с.
5. Сдвижкова О. А., Ковров О. С., Мнішенко Т. В. Статистична оцінка міцнісних властивостей глинистих порід. *Зб. наук. праць НГУ*. 2018. № 54. С. 240–252.
6. Тютюкін О. Л., Ігнатенко Д. Ю. Визначення раціональних параметрів підпірних конструкцій із ґрунто-цементних паль на зсувонебезпечних схилах. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 6 (90). С. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/225281>
7. Шаповал В. Г., Шаповал А. В., Моркляник Б. В., Андреев В. С. *Механика грунтов*. Днепропетровск : Пороги, 2010. 168 с.
8. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П., Сдвижкова Е. А. *Геомеханика. Учебник*. Киев : ГВУЗ Национальный горный университет, 2015. 563 с.
9. Babets D. V., Kovrov O. S., Moldabayev S. K., Tereschuk R. M., Sosna D. O. Impact of water saturation effect on sedimentary rocks strength properties. *Науковий вісник НГУ*. 2020. № 4. Р. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/076>
10. Solodyankin O., Kovrov O., Ruban N. Investigation of physical and mechanical properties of subsiding soils at the Yevpatoriyskaya ravine located in the City of Dnepropetrovsk. *Науковий вісник НГУ*. 2015. № 1. Р. 15–20.
11. Shapoval, V., Solodyankin, A., Hryhoriev, O. & Dubovyk, O. Determining the parameters of a natural arch while forming support load of a horizontal roadways. *Науковий вісник НГУ*. 2021. № 2. Р. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/017>

V. H. SHAPOVAL^{1*}, I. O. PONOMARENKO^{2*}, H. P. IVANOVA^{3*}, R. M. TERESHCHUK^{4*},
D. O. SHASHENKO^{5*}

^{1*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 471 81 92, e-mail shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

^{2*}Dep. «Industrial and Civil Construction», Cherkasy State Technological University, Shevchenko Blvd., 460, Cherkasy, Ukraine, 18006, tel. +38 (067) 962 76 71, e-mail ivan1990ponomarenko@gmail.com, ORCID ID 0000-0003-4296-3975

^{3*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 452 99 45, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

^{4*}Dep. «Construction, Geotechnics and Geomechanics», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 751 2526, e-mail Tereschuk.rm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4509-2511

^{5*}Dep. «Geodesy», Dnipro University of Technology, Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (096) 716 73 93 e-mail shashenko@gmail.com, ORCID 0000-0002-0762-8306

Definition of Construction Parameters of Discrete Restraining Constructions

Purpose. There are many problems in the design of anti-landslide constructions, therefore discrete constructions are an alternative to solid anti-landslides. Despite the advantages of such constructions, difficulties also arise when using them. In this work, it is envisaged to develop methods for determining the zone of influence of discrete restraining constructions on the interaction of a sliding soil mass with them and a method for assessing the conditions of a stable state of the soil, which interacts with discrete restraining constructions, by constructing analytical dependencies necessary to determine the zone size and the soil stability coefficient. **Methodology.** Theoretical studies of geomechanical processes using analytical and numerical mathematical methods, as well as analysis and generalization of theoretical research results were used to achieve the purpose. **Findings.** The research results presented in the work allow, during the design of landslide discrete constructions, to determine the area of interaction of the shear with discrete retaining constructions, as well as to take into account the

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

stability coefficient of the soil laid between the elements of the discrete retaining structure. Dependences were obtained for determining the zone size in which the sliding soil mass interacts, with discrete retaining constructions, and the soil stability coefficient in the zone of its interaction with these constructions. **Originality.** Analytical dependencies allow to calculate the boom of lifting the soil dumping arch between the elements of the discrete anti-landslide restraining construction and the coefficient of soil stability. **Practical value.** The research results allow, when designing discrete restraining constructions, to determine the area of interaction of the shear with these constructions and the stability coefficient of the soil laid between the elements of the discrete restraining construction.

Keywords: shear; anti-landslide restraining structure; solid restraining structure; discrete restraining structure; stability coefficient; interaction zone

REFERENCES

1. Bileush, A. I. (2009). *Opolzni i protivoopolznevyie meropriyatiya*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
2. Ginzburg, L. K. (2007). *Protivoopolznevyie sooruzheniya*. Dnepropetrovsk: Lira LTD. (in Russian)
3. Kovrov, O., & Tereschuk, R. (2020). Analysis of approaches for determination of mine rocks strength properties to forecast landslide hazard. *Modern Technology, Materials and Design in Construction*, 28(1), 63-72. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-1-63-72> (in Ukrainian)
4. Korn, G. (2014). *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Opredeleniya, teoremy, formuly*. Moscow: Kniga po Trebovaniyu. (in Russian)
5. Sdvizhkova, O. A., Kovrov, O. S., & Mnishenko, T. V. (2018). Statistical assessment of clay rocks strength properties. *The Collection of Research Papers of the National Mining University*, 54, 240-252. (in Ukrainian)
6. Tiutkin, O. L., & Ihnatenko, D. Y. (2021). Determination of rational parameters of supporting structures made of soil-cement piles on landslide-prone slopes. *Science and Transport Progress*, 6(90), 97-105. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/225281> (in Ukrainian)
7. Shapoval, V. G., Shapoval, A. V., Morklyanik, B. V., & Andreev, V. S. (2010). *Mekhanika gruntov*. Dnepropetrovsk: Porogi. (in Russian)
8. Shashenko, A. N., Pustovoytenko, V. P., & Sdvizhkova, Ye. A. (2015). *Geomekhanika. Uchebnik*. Kyiv: GVUZ Natsionalnyy gornyy universitet. (in Russian)
9. Babets, D., Kovrov, O., Moldabayev, S., Tereschuk, R., & Sosna, D. (2020). Impact of water saturation effect on sedimentary rocks strength properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 76-81. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/076> (in English)
10. Solodyankin, O., Kovrov, O., & Ruban, N. (2015). Investigation of physical and mechanical properties of subsiding soils at the Yevpatoriyskaya ravine located in the City of Dnepropetrovsk. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 1, 15-20. (in English)
11. Shapoval, V., Solodyankin, A., Hryhoriev, O. & Dubovyk, O. (2021). Determining the parameters of a natural arch while forming support load of a horizontal roadways. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 17-25. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/017> (in English)

Надійшла до редколегії: 10.02.2021

Прийнята до друку: 10.06.2021

ЗМІСТ

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В. В. БУРЧЕНКОВ

Оцінка впливу інформації про тип підшипника буксового
вузла вагонів на точність автоматичної класифікації букс,
що гріються..... 5

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

О. М. ПАТЛАСОВ, Є. М. ФЕДОРЕНКО

Допустимі значення динамічної дії рухомого складу на
залізничну колію в разі підвищення осьового
навантаження 15

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

О. О. ЖЕВАГО

Огляд інструментів збору даних про процеси розробки та
налагодження програмного забезпечення з інтегрованих
середовищ розробки 24

В. М. ПАХОМОВА, А. О. ОПРЯТНИЙ

Програмна модель для визначення оптимальних
маршрутів у комп'ютерній мережі за двоколоніальним
мурашиним алгоритмом 38

МАШИНОБУДУВАННЯ

О. С. КУРОП'ЯТНИК

Параметрична оптимізація стрічкових конвеєрів за
критерієм енергоефективності 50

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А. О. ЛОВСЬКА, О. В. ФОМІН, А. В. РИБІН

Дослідження динамічної навантаженості несучої
конструкції піввагона з пружно-в'язким наповнювачем
у хребтовій балці 59

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

**В. Г. ШАПОВАЛ, І. О. ПОНОМАРЕНКО,
Г. П. ІВАНОВА, Р. М. ТЕРЕЩУК, Д. О. ШАШЕНКО**

Визначення конструктивних параметрів дискретних
утримувальних споруд..... 67

CONTENTS

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

V. V. BURCHENKOV

Influence Assessment of the Information Concerning the Bearing Type of Axle Box of Cars on the Automatic Classification Accuracy of Heated Boxes 5

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

O. M. PATLASOV, Y. M. FEDORENKO

Permissible Values of the Dynamic Impact of the Rolling Stock on the Railway Track in the Case of Axle Load Increase 15

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

O. O. ZHEVAHO

An Overview of Tools for Collecting Data on Software Development and Debugging Processes from Integrated Development Environments 24

V. M. PAKHOMOVA, A. O. OPRIATNYI

Software Model for Determining the Optimal Routes in a Computer Network Based on the Two-Colonial Ant Algorithm 38

MECHANICAL ENGINEERING

O. S. KUROIPIATNYK

Parametric Optimization of Belt Conveyors by Energy Efficiency Criterion 50

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

A. O. LOVSKA, O. V. FOMIN, A. V. RYBIN

Dynamic Loading Research of the Gondola car Supporting Structure with an Elastic-Viscous Filler in a Center Sill 59

TRANSPORT CONSTRUCTION

V. H. SHAPOVAL, I. O. PONOMARENKO,

H. P. IVANOVA, R. M. TERESHCHUK,

D. O. SHASHENKO

Definition of Construction Parameters of Discrete Restraining Constructions 67

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі A4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються двома мовами – українською та англійською.

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),

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

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

№ 3 (93) 2021

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 9,07. Тираж 100 пр. Зам. №02/03

**Дніпровський 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: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 3 (93) 2021

(in Ukrainian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 9,07. Circulation 100. Order no. 02/03

Dnipro 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: kolesnykova@diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

