

ISSN 2664-262X

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Центральноукраїнський національний технічний університет

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.  
ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

Збірник наукових праць  
За загальною редакцією М.І. Черновола  
Заснований у 1997 році

**В и п у с к 7(38)  
Частина I**

Кропивницький • 2023

---

ISSN 2664-262X

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Central Ukrainian National Technical University

**CENTRAL UKRAINIAN SCIENTIFIC BULLETIN.  
TECHNICAL SCIENCES**

**Collected Works**

Under the general editorship of M. Chernovol  
Founded in 1997

**Issue 7(38)  
Part I**

Kropyvnytskyi • 2023

У науковому віснику представлені статті, присвячені проблемам проектування, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки і транспортних засобів, технології виробництва, транспортних технологій та логістики, будівництва, матеріалознавства, ІТ-технологій, роботизації, автоматизації в промисловості та сільському господарстві. Наведені практичні рекомендації до використання результатів досліджень у галузях народного господарства.

Науковий вісник є фаховим виданням, в якому публікуються основні результати наукових досліджень професорсько-викладацького складу, аспірантів, докторантів університету, а також науковців інших навчальних закладів, науково-дослідних інститутів НАНУ та промислових підприємств України.

Збірник розрахований на наукових, науково-технічних працівників різних галузей науки та техніки, ЗВО, здобувачів вчених ступенів і звань.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 3 квітня 2023 року № 7.

Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Черновол М.І.

Редакційна колегія: Аулін В.В., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Лисенко С.В., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 13 «Механічна інженерія», 19 «Архітектура та будівництво», 20 «Аграрні науки та продовольство», 27 «Транспорт»); Смірнов О.А., д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Доренський О.П., канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар за галузями: 12 «Інформаційні технології», 15 «Автоматизація та приладобудування»); Березюк І.А., канд. техн. наук, доц.; Варума Аріфа, Dr PhD (Нігер); Васильковський О.М., канд. техн. наук, проф.; Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, проф.; Галкін А.С., д-р техн. наук, проф.; Гамалій В.Ф., д-р ф.-м. наук, проф.; Гасенко А.В., канд. техн. наук, доц.; Голуб Д.В., канд. техн. наук, доц.; Гриньків А.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.; Дарієнко В.В., канд. техн. наук, доц.; Зоценко М.Л., д-р техн. наук, проф.; Івашук В.В., д-р техн. наук, доц.; Карпушин С.О., канд. техн. наук, доц.; Кириченко А.М., д-р техн. наук, проф.; Клименко В.В., д-р техн. наук, проф.; Коваленко О.В., д-р техн. наук, доц.; Кондратець В.О., д-р техн. наук, проф.; Кузик О.В., канд. техн. наук, доц.; Матейчик В.П., д-р техн. наук, проф.; Мацуї А.М. канд. техн. наук, доц.; Мелешко С.В., д-р техн. наук, проф.; Осадчий С.І., д-р техн. наук, проф.; Павленко І.І., д-р техн. наук, проф.; Пашинський В.А. д-р техн. наук, проф.; Пашинський М.В., канд. техн. наук, Росолов О.В., д-р техн. наук, доц.; Сало В. М., д-р техн. наук, проф.; Смірнов С.А., канд. техн. наук; Солових С.К., д-р техн. наук, проф.; Сторчак М.Г., д-р техн. наук, ст. наук. співр. (Німеччина); Тарандушка Л.А., д-р техн. наук, доц.; Філімоніхін Г.Б., д-р техн. наук, проф.; Шепеленко І.В., д-р техн. наук, доц.; Яцун В.В., канд. техн. наук, доц.

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8,  
Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522)  
390-472, +380 (522) 390-437, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: <http://mapiea.kntu.kr.ua/>

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Науковий вісник заснований у 1997 році.

Включений до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (доктора філософії) в галузі технічних наук (постанови Президії ВАК України від 9 червня 1999 року №1-05/7, від 14 жовтня 2009 року № 1-05/4; накази Міністерства освіти і науки України від 29 грудня 2014 року № 1528, від 07 листопада 2018 року № 1218, від 02 липня 2020 року № 886, від 24 вересня 2020 року № 1188).

Науковий вісник зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних *Index Copernicus*, *CrossRef*, *Open Ukrainian Citation Index*, *WorldCat*, *ResearchBib*, *Google Scholar*

Реєстраційне свідоцтво: серія КВ № 23513-13353 ПР від 13.07.2018 р.

ISSN 2664-262X (p), 2707-9449 (o)

DOI: 10.32515/2664-262X

## КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 640.412(477.83):005.591.6

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.3-9](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.3-9)

**Oksana Chernenko**, Assos. Prof., PhD phys.&math. sci., **Nina Rudenko**, Senior Lecturer,  
**Daryna Bondar**, applicant  
*Poltava University of Economics and Trade, Poltava, Ukraine*  
*e-mail: oksanachernenko7@gmail.com, ninarudenko7@gmail.com, eldarychan@gmail.com*

## Development of simulator software on the topic "Normal algorithms" of the distance learning course "Theory of Algorithms"

The paper describes the design and development of a training simulator in the NetBeans integrated environment in the Java programming language. The simulator program articulates questions of three levels of complexity, methodological recommendations and theoretical issues on the topic. The developed software product is implemented in the corresponding distance learning course on the Moodle platform and is recommended for use in the educational process by applicants in the "Computer Science" specialty.

**training simulator, educational activities, NetBeans IDE software development environment, Java programming language**

**Formulating the problem.** With the development of technology, mankind has got many ways to make its life easier. Take, for example, the situations of the recent past when, due to the corona virus, it was not possible to work or study as usual. Then technologies came to the rescue that made it possible to do everything remotely - online meetings were used in training, and all kinds of tests or simulators were used to consolidate the material being studied.

Electronic simulators are generally indispensable in the training of some specialists, as they allow, in parallel with the study of theoretical material, to perform practical tasks, which increases the level of training. In addition, not always the applicant can perceive the information and understand the material being studied from the first presentation. This problem can be solved through the creation and implementation of various simulators in distance courses [1-6].

**Analysis of recent research and publications.** As part of the preparation of bachelor's and master's theses by students under the guidance of teachers, many simulators from various disciplines were developed and implemented in the educational process for students of the "Computer Science" specialty [7, 8].

Training simulators have proven themselves quite positively. Approaches to their design and implementation depend on the specifics of educational components and the amount of material being studied [9, 10]. Distance courses continue to be filled with new software. Due to the constant updating of the material from the educational component "Theory of Algorithms", there is a need to develop training simulators that allow users to learn theoretical material in parallel with testing knowledge and skills [11, 12, 13].

**Setting objectives.** Develop software for the simulator on the topic "Normal Algorithms", which contributes to improving the quality of education in higher educational institutions using distance technologies.

**Presenting main material.** The process of design and algorithmization preceded the software implementation of the simulator. After analyzing the theoretical material on this topic, it was decided to create a three-level training simulator with the possibility of accessing lectures before the actual testing. The training simulator is written in Java [14, 15] using the integrated environment and NetBeans.

When starting the program, a window opens to the user with the specified information about the developer, as well as three buttons that give the opportunity to go to theoretical information, choose the difficulty of testing or close the program.

If you click the "Information Page" button, a window with the theory will open, where you can familiarize yourself with the necessary information.

The "Start training" button opens a window with a choice of testing complexity.

The easy level includes 5 questions of a theoretical nature, the medium level includes 3 practical tasks, and the difficult level includes 2 practical ones.

Let's consider questions in the theoretical block of tasks.

**Question 1.** Words in Markov's theory are written...?

Answer options:

1. Small Latin letters p, q, r (or letters with indices).
2. Arbitrary characters.
3. Capital Latin letters P, Q, R (or letters with indices).

**Question 2.** Select matching function classes:

Respond options:

1. The class of all partially recursive functions.
2. The class of all computable functions.
3. The class of all recursive functions.
4. The class of all Turing-computable functions.
5. The class of all normally computable functions.
6. Class of elementary functions.

**Question 3.** The following words are given:  $P_1$ : "vessel",  $P_2$ : "ves",  $P_3$ : "sel".

Choose the correct statement"

Answer options:

1.  $P_2$  is a co-element of  $P_3$ .
2.  $P_2$  and  $P_3$  are co-elements of  $P_1$ .
3.  $P_1$  is included in  $P_2$  and  $P_3$ .

**Question 4.** Establish a correspondence between statements and their meanings.

Statement: normal algorithm,  $\Lambda$ , word, alphabet.

Meaning: fixed set of characters; arbitrary non-empty set of characters; arbitrary set of characters; arbitrary sequence of letters; meaningful sequence of characters; an ordered final list of substitutions; finite list of substitutions; empty word.

**Question 5.** What does the Markov's normalization principle sound like?

Answer options:

1. There is an algorithm for finding the values of a function given in some alphabet if and only if the function is computable.
2. There is an algorithm for finding the values of a function given in some alphabet, when the function is normally computable.
3. There is an algorithm for finding the values of a function given in some alphabet if and only if the function is normally computable.
4. There is an algorithm for finding the values of a function specified in some alphabet when the function is computable.

If the user selects an incorrect answer, an error message and a hint are displayed.



Otherwise, if the correct answer is chosen, another window with the inscription "The answer is correct!" is displayed.

After the correct answer, the user can proceed to the next question.

After passing the last task of the specified level, a message appears about its successful completion, and the user returns to the start page, where the latter can select another level of testing.

Let's consider middle level tasks from the practical block.

**Task 1.** The normal algorithm in the alphabet  $A = \{a,b,1\}$  is given by the scheme:  $a \rightarrow 1, b \rightarrow 1$ . Apply it to the words "1aab, baaabla".

At first, the panel contains only the condition and the first stage of the job. After the user enters the answer and confirms it with the button, an inscription about the result will appear below, as well as a field for the second part of the solution (Fig. 1)

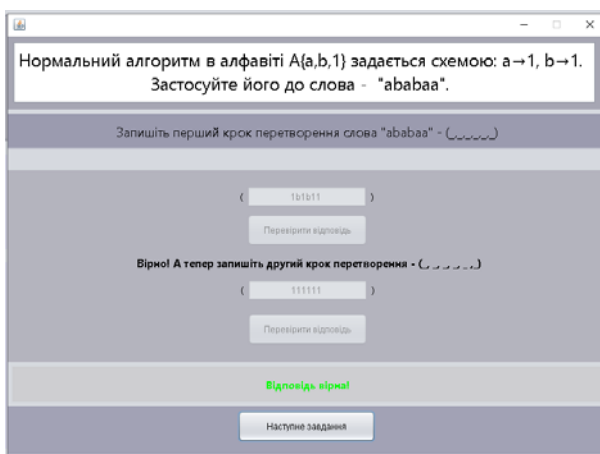


Figure 1 – Practical task 1

Source: compiled by the authors

Confirmation buttons block the corresponding fields. The next subtask with a different word becomes available only when both questions have been answered correctly.

**Task 2.** "The normal algorithm in the alphabet  $A = \{a,b\}$  is given by the scheme:  $ab \rightarrow a, b \rightarrow \Lambda, a \rightarrow b$ . Apply it to the word – "abbbbaaab".

First, the user needs to go through the sequence of tasks from the top panel, choosing one answer among the four suggested (Fig. 2).

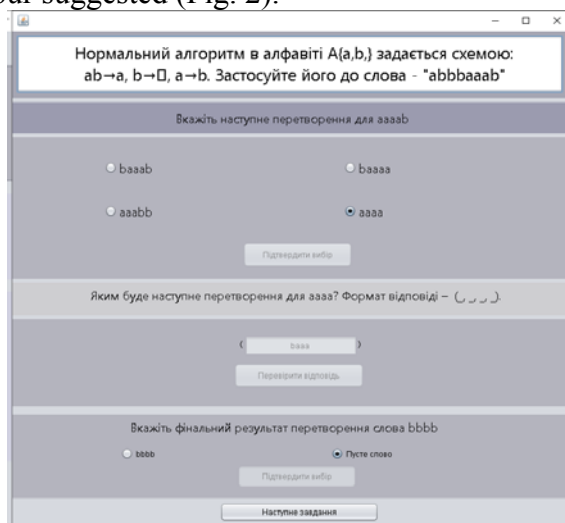


Figure 2 – Practical task 2

Source: compiled by the authors

After completing this stage, another one appears below, providing for the input of the answer from the keyboard. In case of an error, a hint for the correct answer will be displayed. If the choice is confirmed, the field is blocked, and then you can proceed to the sequence of questions of the last block in this task.

When the sequence is completed, the button to go to the last task of the middle level becomes available.

**Task 3.** “The normal algorithm is given by the scheme:  $bb \rightarrow ba, ba \rightarrow a, a \rightarrow \Lambda, b \rightarrow \Lambda \dots$  Apply it to the word – **bbaab** .

At first, four buttons are available for selection, in the last two stages of the transformation, only two remain (Fig. 3).

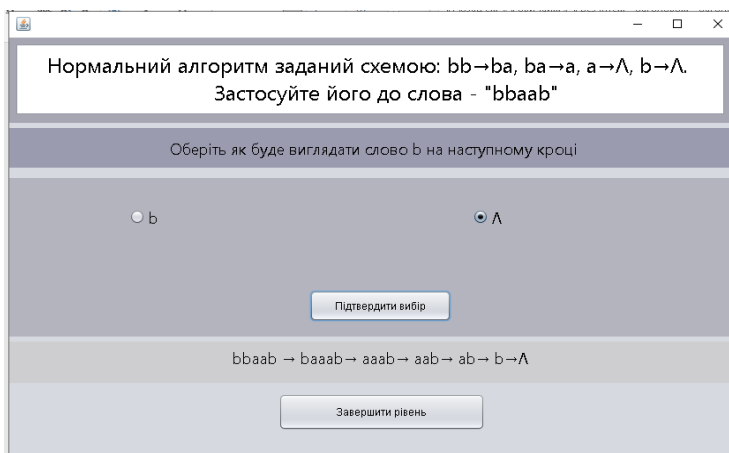


Figure 3 – Practical task 3

Source: compiled by the authors

When the selected option is correct, the transformation chain is built below, otherwise a hint box is displayed. The "Finish Level" button returns the user to the start page.

Let's move on to the consideration of problems of a complex level.

**Task 1.** "In the alphabet  $B = A \cup \{a, b, c\}$  , which is an extension of the alphabet A, consider the normal algorithm given by the scheme. Apply it to the following words: 999, 1998."

$0b \rightarrow 2$	$a0 \rightarrow 0a$	$0a \rightarrow 0b$	$0c \rightarrow 1$
$1b \rightarrow 3$	$a1 \rightarrow 1a$	$1a \rightarrow 1b$	$1c \rightarrow 2$
$2b \rightarrow 4$	$a2 \rightarrow 2a$	$2a \rightarrow 2b$	$2c \rightarrow 3$
$3b \rightarrow 5$	$a3 \rightarrow 3a$	$3a \rightarrow 3b$	$3c \rightarrow 4$
$4b \rightarrow 6$	$a4 \rightarrow 4a$	$4a \rightarrow 4b$	$4c \rightarrow 5$
$5b \rightarrow 7$	$a5 \rightarrow 5a$	$5a \rightarrow 5b$	$5c \rightarrow 6$
$6b \rightarrow 8$	$a6 \rightarrow 6a$	$6a \rightarrow 6b$	$6c \rightarrow 7$
$7b \rightarrow 9$	$a7 \rightarrow 7a$	$7a \rightarrow 7b$	$7c \rightarrow 8$
$8b \rightarrow c0$	$a8 \rightarrow 8a$	$8a \rightarrow 8b$	$8c \rightarrow 9$
$9b \rightarrow c1$	$a9 \rightarrow 9a$	$9a \rightarrow 9b$	$9c \rightarrow c0$
		$c \rightarrow 1$	
		$\Lambda \rightarrow a$	

When converting each word, a choice of one correct answer out of four is offered in stages. In case of an error, a hint will be displayed, allowing the user to answer correctly. If everything is correct, there is a transition to the next step and a word transformation chain is built below.

**Task 2.** Develop a normal algorithm that computes a function  $f(w)=wu$  that adds a fixed word  $u$  to the right of each word  $w$  in the  $A$  alphabet. For the desired normal algorithm, the alphabet  $B = A \cup \{2\} = \{0,1\} \cup \{2\} = \{0,1,2\}$  and a set of substitutions are given:

$21 \rightarrow 12$	$21 \rightarrow 20$
$\Lambda \rightarrow 1$	$2 \rightarrow .u$
$20 \rightarrow 2$	$20 \rightarrow 02$
$\Lambda \rightarrow u2$	$2 \rightarrow 2u$
$20 \rightarrow 01$	$\Lambda \rightarrow 2$

It is necessary to select the desired transformations from the proposed list and set them sequentially according to the specified pattern – (  $\_$ ,  $\_$ ,  $\_$ ,  $\_$  ). Using the result check the correctness of the constructed algorithm on specific examples.

If the correct transformations are selected from the list, then the transition to the next step takes place, that is, a panel appears with the second part of the task, where you need to transform the word according to the selected rules. Otherwise, an error message is displayed. Implementation of this task in the simulator is similar to the previous one.

As a result of successful completion of all tasks, a message is displayed to the user with the results of completion and a recommendation for better learning of the material.

**Conclusions.** Thus, a simulator on the topic "Normal Algorithms" of the discipline "Theory of Algorithms", compatible with the Moodle remote platform, was implemented in software. The training simulator has been introduced into the educational process of the Poltava University of Economics and Trade for students majoring in "Computer Science".

The software product is written in the NetBeans integrated environment in the Java programming language. In the future, it is planned to update the simulator program in accordance with changes in the curriculum of the discipline. The software product is used as a component of the information environment and provides an opportunity to approach the solution of the problem of effective integration of independent work into the educational process, allows filling the gaps in the knowledge of applicants for education.

## Список літератури

1. Волкова, Н.П. Інтерактивні технології навчання у вищій школі: навчально-методичний посібник. Дніпро: Університет імені Альфреда Нобеля, 2018. 360 с.
2. Доценко, Н. Застосування навчальних комп'ютерних інтерактивних тренажерів здобувачами вищої освіти інженерних спеціальностей в умовах інформаційно-освітнього середовища. *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології*. 2018. № 2(76). С. 118–128. URL: <https://doi.org/10.24139/2312-5993/2018.02/118-128> (дата звернення: 18.03.2023).
3. Virk R. The Simulation Hypothesis: An MIT Computer Scientist Shows Why AI, Quantum Physics and Eastern Mystics All Agree We Are In a Video Game. Bayview Books, 2019. 330 p.
4. Murray-Smith, D. J. Testing and Validation of Computer Simulation Models: Principles, Methods and Applications. Springer, 2015. 266 p.
5. Mohamed M Hafez and William E Tavernetti. Introduction To Computer Simulations For Integrated Stem College Education. WSPC, 2019. 234 p.
6. Vlachopoulos D., Makri A. The effect of games and simulations on higher education: a systematic literature review. *Intertional Journal of Education Technology in Higher Education*, 2017, Vol.14 (22). URL: <https://d-nb.info/1141475928/34> (Last accessed: 27.03.2023).
7. Черненко О.О., Чілікіна Т.В., Ольховська О.В. Розробка та використання навчальних тренажерів при підготовці фахівців напряму «Комп'ютерні науки». International scientific and practical conference "Mathematics, physics, mechanics, astronomy, computer science and cybernetics: issues of productive interaction": conference proceedings, Yuly 9-10. 2021. Wloclawek, Republic of Poland: "Baltija Publishing", 2021. С. 55-59.

8. Ольховська О.В., Собіборець О.Ю. Програмна реалізація елементів тренажеру з теми «Системи числення, арифметичні операції в різних системах числення» дисципліни «Архітектура обчислювальних систем». *Новітні інформаційно-комунікаційні технології в освіті: матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції молодих учених та студентів (Полтава, 24-25 листопада 2021 р.)*. Полтава: ПП «Астрая», 2021. С. 141-142.
9. Bhakat Rohit. Development of software simulator for the cut-off method of the distance learning course Elements of combinatorial optimization. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології (КНІТ-2022): матеріали науково-практичного семінару*. 2022. Вип. 1. Полтава: кафедра КНІТ ПУЕТ, С.36-38.
10. Бардаченко С.Р. Електронний тренажер для дистанційного курсу «Теорія алгоритмів» на тему: «Машини Тьюрінга» URL : <http://www2.el.puet.edu.ua/st/mod/resource/view.php?id=98521> (дата звернення: 19.03.2023).
11. Яновський, А. Інформаційно-освітнє середовище в умовах дистанційного навчання. *Humanities science current issues*. 2020, Т. 4, № 30. С. 310-315. URL: <https://doi.org/10.24919/2308-4863.4/30.212627> (дата звернення: 19.03.2023).
12. Триус, Ю. В., Герасименко, І. В., Франчук, В. М. Система електронного навчання ВНЗ на базі MOODLE: метод. посіб. Черкаси, 2020. 220 с.
13. Ghrmida, S. M., Harkusha, S. V., Koshova, O. P., Orikhivska, O. G. Some Peculiarities of Development of Desktop Application «Using Array in Java». *Збірник наукових статей магістрів*. Полтава: ПУЕТ, 2022. С. 105-109.
14. Schildt H. Java: A Beginner's Guide, Eighth Edition. McGraw-Hill Education, 2018. 720 p.
15. Bloch J. Effective Java. Addison-Wesley Professional, 2018. 412 p.

## References

1. Volkova, N.P. (2018). *Interaktyvni tekhnologii navchannia u vyshchii shkoli: navchalno-metodychnyi posibnyk [Interactive learning technologies in higher education: educational and methodological guide]*. Dnipro: Universytet imeni Alfreda Nobelia [in Ukrainian]
2. Dotsenko, N. (2018). Zastosuvannia navchalnykh kompiuternykh interaktyvnykh trenazheriv zdobuvachamy vyshchoi osvity inzhenernykh spetsialnostei v umovakh informatsiino-osvitnoho seredovyshcha [The use of educational computer interactive simulators by students of higher education in engineering specialties in the conditions of an informational and educational environment]. *Pedahohichni nauky: teoriia, istoriia, innovatsiini tekhnologii – Pedagogical sciences: theory, history, innovative technologies, 2(76)*, 118–128 [in Ukrainian].
3. Virk, R. (2019). The Simulation Hypothesis: An MIT Computer Scientist Shows Why AI, Quantum Physics and Eastern Mystics All Agree We Are in a Video Game. Bayview Books, 330 p. [in English].
4. Murray-Smith, D. J. (2015) Testing and Validation of Computer Simulation Models: Principles, Methods and Applications. Springer. 266 p. [in English].
5. Mohamed M Hafez & William E Tavernetti. (2019). Introduction To Computer Simulations for Integrated Stem College Education. WSPC. 234 p. [in English].
6. Vlachopoulos, D. & Makri, A. (2017). The effect of games and simulations on higher education: a systematic literature review. *Intertional Journal of Education Technology in Higher Education. Vol.14 (22)*. Retrieved from <https://d-nb.info/1141475928/34> [in English].
7. Chernenko, O.O., Chilikina, T.V. & Olkhovska, O.V. (2021). Rozrobka ta vykorystannia navchalnykh trenazheriv pry pidhotovtsi fakhivtsiv napriamu «Komp'uterni nauky» [Development and use of educational simulators in the training of specialists in the field of "Computer Sciences"]. Mathematics, physics, mechanics, astronomy, computer science and cybernetics: issues of productive interaction : *International scientific and practical conference (Yuly 9-10. 2021. Wloclawek): conference proceedings, Republic of Poland: Baltija Publishing. Pp. 55-59.* [in Ukrainian]
8. Olkhovska, O.V. & Sobiborets, O. Iu. (2021) Prohramna realizatsiia elementiv trenazheru z temy «Systemy chyslennia, aryfmetychni operatsii v riznykh systemakh chyslennia» dystsypliny «Arkhitektura obchysliuvalnykh system» [Software implementation of the elements of the simulator on the topic "Calculation systems, arithmetic operations in various calculation systems" of the discipline "Architecture of computing systems"]. The latest information and communication technologies in education: *VII Vseukrainska naukovo-praktychna Internet-konferentsia molodykh uchenykh ta studentiv (Poltava, 24-25 lystopada 2021 r.) – VII All-Ukrainian scientific and practical Internet conference of young scientists and students* (pp. 141-142). Poltava: PP «Astraia» [in Ukrainian].
9. Bhakat Rohit (2022). Development of software simulator for the cut-off method of the distance learning course Elements of combinatorial optimization. Computer science and information technologies (КНІТ-

- 2022): *Materialy Naukovo-Praktychnoho Seminaru – Materials of the Scientific and Practical Seminar* (pp. 36-38). Vol. 1, Poltava: kafedra KNIT PUET [in English].
10. Bardachenko, S.R. Elektronnyi trenazher dlia dystantsiinoho kursu «Teoriia alhorytmiv» na temu: «Mashyny Tiurinha» [Electronic simulator for the distance course "Theory of algorithms" on the topic: "Turing machines"] . *www2.el.puet.edu.ua*. Retrieved from <http://www2.el.puet.edu.ua/st/mod/resource/view.php?id=98521>.
  11. Yanovskyi, A. (2020). Informatiino-osvitnie seredovyshe v umovakh dystantsiinoho navchannia [Information and educational environment in the conditions of distance learning]. *Humanities science current issues. Vol. 4, 30, 310-315*. [in Ukrainian]
  12. Tryus, Yu. V., Herasymenko, I. V. & Franchuk, V. M. (2020) Systema elektronnoho navchannia VNZ na bazi MOODLE: Metodychnyi posibnyk [The MOODLE-based e-learning system of higher education institutions: Methodical manual]. Cherkasy. 220 p. [in Ukrainian]
  13. Ghrmida, S. M., Harkusha, S. V., Koshova, O. P., Orikhivska, O. G. (2022). Some Peculiarities of Development of Desktop Application «Using Array in Java». *Collection of scientific articles of masters*. Poltava: PUET [ in English]
  14. Schildt, H. (2018). *Java: A Beginner's Guide, Eighth Edition*. McGraw-Hill Education. 720 p. [in English].
  15. Bloch, J. (2018). *Effective Java*. Addison-Wesley Professional. 412 p. [in English].

**О.О. Черненко**, доц., канд. фіз.-мат. наук, **Н.С. Руденко**, ст. викл., **Д.О. Бондар**, здобувач  
*Полтавський університет економіки і торгівлі, м. Полтава, Україна*

### **Розробка програмного забезпечення тренажеру з теми «Нормальні алгоритми» дистанційного навчального курсу «Теорія алгоритмів»**

Найважливішим завданням на сьогоднішньому етапі модернізації освіти в Україні є забезпечення якісного навчання під час очної, дистанційної чи змішаної форм для студентів навчальних закладів різного рівня акредитації. Для підвищення засвоєння теоретичного матеріалу та формування професійних компетентностей одним з ефективних методів є використання програм-тренажерів під час навчального процесу. У статті розглянуто процес програмної реалізації тренажеру дистанційного навчального курсу «Теорія алгоритмів».

У інтегрованому середовищі NetBeans на мові програмування Java створено програму-тренажер для дистанційного курсу «Теорія алгоритмів». Тренажер реалізовано у вигляді віконної програми, яка не потребує додаткового програмного забезпечення. Дослідження підтверджує, що саме інтерактивні додатки найбільш зрозумілі для користувачів та не потребують пояснень. Стартова сторінка програми містить інформацію про розробника; кнопки переходу до теоретичних відомостей; вибору рівня складності: легкий, середній та складний; та завершення роботи. Легкий рівень включає у себе 5 запитань теоретичного характеру, у середньому - 3 практичних завдання, у складному - 2 практичних. Вгорі вікна програми знаходиться панель для відображення завдань, в центрі - варіанти або поля для запису відповідей, знизу - дві панелі, перша показує результати відповіді, а інша містить дві кнопки: «Перевірити відповідь» та «Наступне завдання». Задачі досить різноманітні: вибір однієї чи декількох правильних відповідей, завдання на відповідність та введення відповіді з клавіатури.

Розроблений програмний продукт виконує навчальну та контролюючу функції. Тренажер інтегровано в систему дистанційного навчання на платформі Moodle Полтавського університету економіки та торгівлі та впроваджено в навчальний процес для використання здобувачам освіти за спеціальністю «Комп'ютерні науки». Інноваційні методи навчання допомагають здобувачам освіти самостійно ліквідувати прогалини у знаннях без використання додаткового аудиторного часу чи викладача.

**навчальний тренажер, освітня діяльність, середовище розробки програм NetBeans IDE, мова програмування Java**

*Одержано (Received) 16.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 29.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 656.212.5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.10-15](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.10-15)**К.В. Крячко**, доц., канд. техн. наук, **А.М. Шрамко**, **В.В. Коврига***Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ), м. Харків, Україна**e-mail: krackokaterina@gmail.com*

## Раціоналізація спільної роботи залізничних станцій у вузлі

В даній роботі рекомендуються варіанти оптимального перерозподілу сортувальної і маневрової роботи між сортувальними та вантажними станціями при формуванні передаточних поїздів з можливістю урахування детального підбору окремих груп вагонів на окремі вантажні fronti. Це дає змогу раціонального використання сортувального пристрою та маневрових локомотивів як на технічній, так і на вантажних станціях, а також зменшення тривалості знаходження місцевих вагонів під час здійснення основних технологічних операцій у залізничному вузлі.

**передаточні поїзди, залізничний вузол, залізничні станції, вантажні перевезення, маневрові локомотиви**

**Постановка проблеми.** Попри систематичне скорочення обсягів вантажних перевезень, що за останній рік склало більш ніж на 10%, попит на залізничні послуги не зменшився, але цілий ряд причин викликає суттєві збитки (необґрунтованість тарифів, невиконання технологічних норм знаходження вагонів на сортувальних та вантажних станціях, невідповідність робочого парку вагонів необхідним обсягам роботи, застосування в експлуатації застарілого рухомого складу, перевантажувально-розвантажувальних машин тощо). Так наприклад 91,3% маневрових локомотивів застосовується з перевищеним терміном експлуатації; із 111200 вантажних вагонів 31% перебуває в неробочому парку, а 56,5% використовується з простроченим нормативним терміном; середній знос вагонів дорівнює понад 90%; тривалість здійснення операцій з поточного утримання цих вагонів на 40-60% перевищує заплановані норми [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням взаємодії основних станцій залізничного вузла з метою скорочення тривалості знаходження вагонів в умовах виконання технологічних операцій займалися видатні вчені в Україні та за кордоном. В першу чергу ці проблеми розглядалися в наукових роботах Смехова А.О. [2]; Данька М.І. [3]; Бутько Т.В. [4]; Ломотька Д.В. [5]; Альошинського Є.С. [6].

**Постановка завдання статті.** З метою раціональної організації роботи суміжних залізничних підрозділів з'являється необхідність дослідження застосування раціональної технології, що дозволила б прийняття оперативних рішень, націлених на скорочення обороту вантажних вагонів, що від навантаження до наступного навантаження розташовуються на початково-кінцевих пунктах, тобто на вантажних станціях, більшу половину часу та понад 40% - на технічних станціях, що їх обслуговують.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогоднішній день 55% вантажних станцій знаходиться у залізничних вузлах, але основний обсяг роботи з навантаження-вивантаження здійснюється на станціях десяти найбільших міст України із населенням понад 500 тисяч жителів і 30 великих міст – в межах від 100 до 500 тисяч жителів [7].

Зазвичай це позакласні станції та станції першого класу, на яких є щонайменше два маневрових локомотиви і які виконують усі види робіт, основна частка з яких припадає на сортування і подавання вагонів на певні вантажні фронти.

Спільна тривалість знаходження вагонів на вантажних станціях (біля 70%) приходить на простой при очікуванні накопичення подач, подавання, розставлення і на міжопераційні простой під час їх виконання та проведення вантажних робіт.

Істотно більша тривалість знаходження вагонів на вантажних станціях, які мають один маневровий локомотив, чи зовсім його не мають. Такі станції, зазвичай, мають незначний колійний розвиток та робота з підбирання окремих груп вагонів на вантажні фронти викликає чималі простой.

За основним призначенням вантажні станції мають займатися організацією вивантаження та навантаження, а невласливу їм сортувальну роботу рекомендується здійснювати на технічних станціях.

Відповідно до результатів досліджень технології переробки місцевих вагонопотоків, що включаються до передаточних поїздів на вузлових технічних станціях [8], найчастіше, операції по закінченню формування таких поїздів не відбуваються та вони прямують після накопичення вагонів прямо з колій сортувального парку чи після перестановки до парку відправлення; таким чином основна робота з ретельним сортуванням передається на вантажні станції у залізничному вузлі.

Аналіз структури вагонопотоку з переробкою, який прибуває до технічних станцій, показав, що із загального обсягу місцевий потік вагонів дорівнює від 7 до 12%, а простій під накопиченням составів передаточних поїздів – до восьми та більше годин.

Витрати часу на закінчення формування составів передаточних поїздів через гірку на технічній станції в декілька разів менше, ніж на вантажній станції, залежно від кількості груп вагонів у составі. Враховуючи те, що собівартість переробки одного вагона на технічній станції десь в 5-6 разів менша ніж на вантажній, в такому випадку економічно доцільно операцію по закінченню формування з підбиранням груп вагонів по окремих вантажних фронтах здійснювати на технічних станціях, особливо в нинішній час, коли із скороченням загального обсягу роботи ці гірки мають достатній резерв переробної спроможності.

Але при цьому виникає і ряд проблем, що слід вирішувати впровадженням додаткових організаційно-технічних заходів. Наприклад, в процесі підбирання груп вагонів виникає необхідність виділення додаткових колій в сортувальному парку чи вільних ділянок колій за парковими гальмовими позиціями і якщо таке сортування організувати конкретно між розпусками основного вагонопотоку, тоді вільні ділянки колій можуть застосовуватися між стрілочною зоною та парковими гальмовими позиціями.

Крім цього, якщо станція оснащена автоматизованою системою управління, тоді слід коригувати інформаційне забезпечення програми сортувального процесу, тому що відчепи виділяються в цілому для конкретної вантажної станції, а не для вантажного фронту, в такому випадку при розформуванні буде відсутня інформація про певного вантажовласника.

Зважаючи на це для підбирання вагонів на сортувальних станціях по окремих пунктах вивантаження необхідно розробити додаткову інформаційну базу на сервері вузлового диспетчера та відкоригувати систему управління базою даних, що дозволить у сортувальних листках надавати потрібну інформацію з метою підбирання груп місцевих вагонів для вантажних станцій залізничного вузла у процесі розпуску основного вагонопотоку чи після накопичення составів передаточних поїздів.

Одночасно потрібно розглянути необхідність запровадження при вузловому диспетчері додаткової штатної одиниці оператора (в умовах обслуговування лише однієї вантажної станції – при маневровому диспетчері технічної станції) для постійного зв'язку з вантажними станціями та надання оперативної інформації про місцезнаходження на вантажних фронтах, що майже не змінить собівартості переробки вагонів на технічній станції, але суттєво зменшить її на вантажній станції. Дану комплексну взаємодію технології роботи дуже важливо застосовувати при однозмінній чи двозмінній роботі вантажних фронтів (на сьогоднішній час понад 90% вантажних фронтів працюють в одну зміну). Це дозволить суттєво стабілізувати режим роботи вантажної станції від моменту прибуття передаточного поїзда до моменту подачі вагонів на вантажні fronti у ранкові періоди

Для розв'язання задачі перерозподілу маневрової роботи в першу чергу потрібно визначити середнє число груп вагонів (пгр) з окремими призначеннями вантажної станції у складах передаточних поїздів, у відповідності з дослідженнями [2] встановлено, що максимальна кількість груп вагонів ( $n$ ), що надходять одночасно на всі вантажні fronti, дорівнює від 13 до 19%, що дозволило виявити залежність пгр від  $n$  і середньодобового обсягу місцевих вагонів (пм), які передаються на вантажну станцію

$$n_{ep} = n - \sum_{i=1}^n \left( \frac{n_m - n_i}{n_m} \right)^n, \quad (1)$$

де  $n_i$  – середньодобова кількість вагонів  $i$ -го призначення.

Крім того було виявлено, що середня кількість відчепів (гв) у складі передаточного поїзда ( $m$ ) яка визначає обсяг маневрової роботи на витяжних коліях, майже завжди менше максимального ( $g_{max}$ ) та визначається

$$g_e = g_{max} \left[ 1 - \sum_{i=1}^n \left( \frac{n_i}{n_m} \right)^2 \right], \quad (2)$$

Варіант ретельного підбирання груп вагонів на технічній станції можливий в умовах обслуговування вантажних фронтів локомотивом від передаточного поїзда. Тривалість такого розформування у 5-6 разів менша, ніж на витяжних коліях вантажної станції, проте тривалість збирання груп вагонів у 3-4 рази більша за рахунок довшої довжини гіркової горловини, втім при відсутності ізольованого сортувального парку на вантажній станції вищенаведений варіант повинен бути основним. В умовах наявності маневрового локомотива на вантажній станції цей варіант слід застосовувати за умови

$$\frac{n_{ep}}{m_{ce}} \left[ t_{p\phi}^{m\phi} + \sum_{i=1}^{m_{ce}} (t_{zi} + t_{ei}) \right] > n_{ep} \left[ t_{p\phi}^e + \sum_{i=1}^{m_{cc}} (t'_{zi} + t'_{ei}) \right], \quad (3)$$

де  $m_{ce}$ ,  $m_{cc}$  – кількість колій сортувального парку вантажної та технічної станції, куди підбираються відчепи для подач на вантажні fronti;

$t_{p\phi}^{m\phi}$ ,  $t_{p\phi}^e$  – тривалість розформування состава передаточного поїзда через маневрову витяжку і через сортувальну гірку, хв.;

$t_{zi}$ ,  $t'_{zi}$  – тривалість заїзду локомотива на  $i$ -ту колію сортувального парку вантажної і сортувальної станції, при збиранні відчепів, хв.;

$t_{ei}$ ,  $t'_{ei}$  – тривалість виїзду локомотива з  $i$ -ї колії сортувального парку вантажної і сортувальної станції при збиранні відчепів, хв.

Слід зауважити, що при збиранні відчепів тривалість заїзду чи виїзду на  $i$ -ту колію змінюється з поступовим збільшенням величини состава.



Згідно другого варіанту, після накопичення складу передаточного поїзда, на сортувальній станції виконується скорочене повторне сортування з підбиранням окремих груп вагонів по районах вантажної станції.

При умові наявності резерву колій сортувального парку накопичення рекомендується виконувати на окремих коліях, в такому випадку для закінчення формування передаточного поїзда потрібно буде тільки з'єднати вагони з цих колій, а коли такий резерв відсутній, тоді необхідно здійснювати техніко-економічне обґрунтування цього варіанту за умови укладки і утримання додаткової кількості колій ( $m_d$ ) з урахуванням повторного сортування на них

$$365n_{cp}[t_{pф}^2 + \sum_{i=1}^{m_{cc}}(t_{zi} + t_{ei})](m_c e_{e2} + e_{le}) > m_d(K \cdot E_n + \Delta E) + n_{cp} \sum_{i=1}^{m_d}(t_{zi} + t_{ei})365, \quad (4)$$

де  $K$  – вартість укладки додаткової колії в сортувальному парку, грн.;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

$\Delta E$  – щорічні експлуатаційні витрати на поточне утримання і ремонт додаткової колії, грн.;

$e_{e2}$  – вартість однієї вагоно-години простою, грн.;

$e_{le}$  – вартість однієї локомотиво-години маневрової роботи, грн.

До того ж на вантажній станції необхідно виконувати удосконалення конструкції сортувального парку для можливості ізолюваного обслуговування окремих маневрових районів станції при двох локомотивах.

Третій варіант можливо застосовувати при проектуванні вантажної станції модульного типу та здійсненні маневрової роботи двома локомотивами. Підбирання окремих груп вагонів по різних модулях виконується на сортувальній станції одночасно з розформуванням та накопиченням складу передаточного поїзда.

Згідно результатів виконаних досліджень встановлено, що в умовах загального обсягу місцевого вагонопотоку, який накопичується на сортувальній станції, від 50 до 70 вагонів на добу, кількість призначень складає від 58 до 75% максимальної кількості груп вагонів у передаточних поїздах, а при обсязі більше ніж 120 вагонів на добу збільшується не тільки кількість груп, але і кількість відцепів у складі.

Це можна пояснити тим, що при невеликих обсягах роботи на вантажній станції кількість вагонів у відчепках буде меншим та при накопиченні на склад поїзду в ньому буде більша кількість призначень, а при більших обсягах збільшується кількість вагонів, що надходять у відчепках при розформуванні поїздів на сортувальній станції, а крім того кількість груп таких вагонів одного призначення, які надходять з різних розформованих поїздів. При цьому кількість призначень у цілому помалу зменшується у передаточному поїзді, але збільшується кількість поїздів.

Це дає можливість знаходження варіанту сумісної технології переробки місцевого вагонопотоку, але найбільш оптимальне рішення можливе тільки після техніко-економічного обґрунтування.

Схожа технологія сумісної роботи сортувальної станції та контейнерного терміналу може бути задіяна при підбиранні вагонів із контейнерами різної вантажопідйомності для зменшення тривалості їх розстановки по ізолюваних секціях контейнерних площадок.

Ритмічність організації сумісної роботи технічної та вантажної станції залізничного вузла залежить також від своєчасного підвозу робітників цих станцій з приміських районів. З урахуванням цього, графік руху приміських поїздів мусить бути чітко пов'язаний з роботою змін станцій та вантажних фронтів, через це керівництво

пасажи́рської ста́нції в першу чергу повинно формувати раціональний графік прокладки приміських поїздів у залежності від кількості робітників, які надходять з різних приміських зон.

Виявлено, що довжина першої приміської зони розташовується в межах до 30 км, другої – до 50 км, а третьої – до 70 та більше км. Найбільш інтенсивний пасажиропотік першої зони потребує не менше ніж 6-8 пар приміських поїздів, другої – не менше ніж 4 та третьої – не менше ніж 2. При цьому для скорочення часу знаходження пасажирів на шляху прямування від і-тої до головної пасажирської станції рекомендується застосовувати ступінчастий графік, тобто коли пасажир третьої зони не мають зупинок приміського поїзду в межах першої та другої зони, а пасажир другої зони не зупиняються на зупинкових пунктах першої зони. Скорочення кількості зупинок дає змогу зменшити енергетичні витрати та своєчасно підвозити робітників до головної станції.

**Висновки.** Впровадження сумісної технології роботи вантажної та технічної станції, що її забезпечує по підбиранню груп вагонів задля обслуговування вантажних фронтів дозволить зменшити простої рухомого складу та витрати палива. Крім того чіткий взаємозв'язок у роботі усіх станцій залізничного вузла надає можливість стабілізації руху поїздів на примикаючих підходах.

## Список літератури

1. Транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (дата звернення: 31.03.2023).
2. Смахов А.А. Оптимизация процессов грузовой работы. Москва: Транспорт, 1973. 264 с.
3. Данько М.І., Крячко К.В. Теоретичні основи оптимального функціонування системи вантажної станції. *Зб. наук. праць*, 2003. Вип. 56. С. 5-13.
4. Бутко Т.В., Головка Т.В. Удосконалення сумісної роботи портів та залізничних вузлів в умовах зростання вантажопотоків. *Зб. наук. праць*, 2006. Вип. 8. С. 5-13.
5. Ломотько Д.В., Запара Я.В., Запара Є.В. Використання логістичних підходів та системної оптимізації при функціонуванні транспортних вузлів. *Зб. наук. праць*, 2009. Вип.111. С. 17-23.
6. Альошинський Є.С., Пестременко-Скрипка О.С. Аналіз впливу простою міжнародного вагонопотоку на оборот вагонів. *Зб. наук. праць*, 20013. Вип.137. С. 24-29.
7. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 31.03.2023).
8. Крячко К.В. Статистичні дослідження функціонування системи обслуговування залізничних вантажних фронтів. *Зб. наук. праць*, 2004. Вип. 2. С. 93-94.
9. Barabino B., Massimo F. Characterizing, measuring, and managing transit service quality. *Advanced Transportation*. 2016. Vol. 50(5). P. 818–840.
10. Dewei Li, Daamen W., Rob M. P. Goverde. Estimation of train dwell time at short stops based on track occupation event data: A study at a Dutch railway station. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 50, Issue 5. Journal of Advanced Transportation 2016. p. 877–896.

## References

1. Transportna strategiya Ukrainy na period do 2030 roku. Shvaleno rozporjadzhenyamy Kabinetu Ministriv vid 30 travnya 2018 r. № 430-p. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (data zvernennya: 31.03.2023) [in Ukrainian].
2. Smehov, A.A. (1973). Optimizaciya processov gruzovoy raboty. Moskva: Transport, 264 p [in Russian].
3. Danko, M.I. & Kriachko, K.V. (2003). Teoretichni osnovi optimalnogo funkcionuvannya sistemy vantazhnoi stancii: Zbir. nauk. prac., Issue 56. Kharkiv: UkrDAZT, 5-13 [in Ukrainian].
4. Butko, T.V. & Golovko, T.V. (2006). Udoskonalennya sumisnoi roboty portiv ta zaliznichnih vuzliv v umovah zrostannya vantagopotokiv: Zbir. nauk. prac., Issue 8. Donetsk: DonIZT, 5-13 [in Ukrainian].

5. Lomotko, D.V., Zapara, Y.V. & Zapara, E.V. (2009). Viktorystannya logistichnih pidhodiv ta sistemnoi optimizacii pri funkcionuvanni transportnih vuzliv: Zbir. nauk. prac., Issue 111. UkrDAZT, 17-23 [in Ukrainian].
6. Alyoshinskiy, E.S. & Pestremenko-Skripka, O.S. (2013). Analiz vplivu prostoyu mignarodnogo vagonopotoku na oborot vagoniv: Zbir. nauk. prac., Issue 137. Kharkiv. UkrDAZT, 24-29 [in Ukrainian].
7. Dergavna slugba statistiki Ukrainy. *ukrstat.gov.ua*. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian].
8. Kriachko, K.V. (2004). Statistichni doslidennya funkcionuvannya sistemi obslugovuvannya zaliznicnih vantagnih frontiv: Zbir. nauk. prac., Issue 2. Kharkiv. HNEU, 93-94 [in Ukrainian].
9. Barabino, B. & Massimo, F. (2016). Characterizing, measuring, and managing transit service quality. *Advanced Transportation, Vol. 50(5)*, p. 818–840 [in English].
10. Dewei, Li, Daamen, W. & Rob, M. P. Goverde. (2016). Estimation of train dwell time at short stops based on track occupation event data : A study at a Dutch railway station. *Journal of Advanced Transportation, Vol. 50, Issue 5*, pp. 877–896 [in English].

**Kateryna Kryachko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Shramko**, student, **Vladislav Kovriga**, student  
*Ukrainian State University of Railway Transport (UkrDURT), Kharkiv, Ukraine*

### **Rationalization of Joint Work of Railway Stations in the Node**

In this work the variants of rational technology for the redistribution of the sorting and shunting work between sorting and freight stations in the formation of the gear trains, taking into account possible detailed the selection of individual groups of cars for specific cargo fronts .This gives the possibility of optimal use of screening devices and shunting locomotives as sorting and freight stations, as well as the reduction of the length of time of local cars during the execution of the basic technological operations in the railway node. The studies of the structure of volumes with the processing of coming to the sorting stations, it was found that of the total local traffic volume ranges from 7% to 12% and the accumulation time of trains gear trains – up to 8 hours or more.

Given that the time for the completion of the formation of these compounds through an slide in the rail yard for much less than freight (depending on the number of groups of wagons ) and that the cost of recycling of one car on the yard and station at 5 – 6 times less than the cargo, was asked to undertake the completion of the formation to the exactions of railway freight fronts in the rail yard, especially at this time when the reduction in the total amount of work sorting slides have sufficient reserve processing capacity.

The dependences for determining the number of groups of wagons with defined assignment freight station in trains transfer trains, as well as finding the average number of uncoupling , which determines the amount of shunting work on the exhaust paths.

**transfer trains, railway junction, railway stations, freight transport, shunting locomotives**

*Одержано (Received) 30.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**КІБЕРБЕЗПЕКА**

УДК 004 + 614.8

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.16-21](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.16-21)

**К.М. Марченко**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Оришака**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м Кривий Ріг, Україна*  
*e-mail: k\_marchenko@i.ua*

## Інформаційна безпека життєдіяльності людини і суспільства в умовах війни

У статті розглянуті аспекти інформаційної війни як невід'ємної складової гарячих війн. Проаналізовані механізми інформаційного впливу на свідомість людини та масову свідомість. Окреслені особливості інформаційної війни в умовах широкомасштабних військових дій в Україні. Наголошується, що інформаційна зброя приводить до сумірних наслідків із військовою зброєю та є різновидом зброї масового враження. Запропоновані інструменти та засоби протидії інформаційній агресії для людини та суспільства.

**інформаційна безпека, інформаційна війна, безпека життєдіяльності, свідомість, інформаційний вплив, інформаційна агресія, медіа-грамотність**

**Постановка проблеми.** Широкомасштабна війна, розпочата в Україні, викликала інтенсивний сплеск інформаційної агресії та інформаційної конфронтації, хвилі якої розповсюдилися практично по всьому світу. Штучно підготовлена інформація використовується як зброя, яка діє не менш ефективно, ніж армійське озброєння. Інформаційні війни, які у всі часи велися таємно та підступно, перейшли у фазу відкритості, відвертості та боротьби на знищення.

Метою інформаційної зброї перш за все є свідомість людини та масова свідомість. Ті, хто практикує використання інформаційної зброї, добре знаються як на людській психології, так і на психології людських колективів та мас.

Інформаційна безпека життєдіяльності людини й суспільства в умовах інтенсивної інформаційної війни стає першоприоритетною задачею, як запорука безпеки фізичної.

Таким чином, розробка методів та заходів з інформаційної безпеки людини й суспільства та протидії інформаційній агресії в умовах війни є **актуальною задачею**.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із перших, хто започаткував поняття інформаційної війни був канадський культуролог, філософ М. Маклюен, який у 1960 роках написав: "Істинно тотальна війна – це війна за допомогою інформації".

Історію виникнення та еволюції інформаційних війн досліджено у роботі Я.М. Жаркова [1], Особливості сучасних інформаційних війн вивчали Г. Почепцов [2] та О.В. Курбан [6]. Соціально-правовим аспектам інформаційної безпеки приділено увагу в роботах Б.В. Остроухова та Б.М. Петрика [3]. Теоретичні основи та методологію інформаційних війн розвинені у дослідженнях О.В. Курбан [4]. Питання протидії інформаційним війнам підняті у роботі О.Г. Додонова [5]. Дослідження В. О. Жадька спрямовані на проблеми інформаційної безпеки в умовах гібридної війни, безперечною складовою якої є війна інформаційна [9].

Аналіз наукових робіт у сфері інформаційних війн показав недостатність досліджень з забезпечення інформаційної безпеки життєдіяльності людини та суспільства, що стає особливо актуальним в умовах "гарячої" війни.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо деякі механізми інформаційного впливу на людину та суспільство.

У свідомій діяльності людини первинною завжди була й є ідея - певне уявлення про бажане, про кінцевий або проміжний результат діяльності. В результаті дії людини набувають характеру цілеспрямованості. Усвідомлення, опис бажаного є інформацією, тому можна впевнено стверджувати, що інформація первинна у людській діяльності. Після того, як ідея з'явилася у свідомості людини та була прийнята до реалізації, у тій же свідомості людина починає цю ідею розвивати, конкретизувати, уточнювати, і, разом з цим, розвивається й інформація. Таким чином, бачимо, що прийняття та реалізація ідей та інформації відбувається через свідомість. Масова ж свідомість людей, які утворюють певний колектив, служить колективній реалізації ідей.

Слід зазначити, що людина не завжди слідує своїм ідеям - ідеї можуть бути делеговані зовні. Для того, щоб людина щось здійснила, зовнішня ідея повинна стати для неї привабливою, такою, що приносить задоволення або певну вигоду, або ж такою, яка допомагає уникнути небезпеки, навіть фатальних втрат, тому є практично безумовною для реалізації. Тобто для впровадження ідей у людську свідомість та подальшої їх здійснення, автор ідеї користується тими мотивами, які для виконавця є актуальними. Боротьба відбувається за людську свідомість, за виконавців ідей.

З тих пір, як на Землі зародилися такі викривлення, як особиста вигода та брехня, для досягнення корисних цілей використовується маніпуляція свідомістю. Зокрема, привертається увага до того, що бажане та вигідне, бо ж, як відомо, куди спрямована увага, туди спрямовується й енергія. Енергія далі може виступати в різних формах - від подальшого розповсюдження наданої інформації до фізичних та грошових витрат. Для того, щоб ідея стала привабливою або навіть необхідною, використовується сугестія - навіювання (цілеспрямований вплив на волю й почуття людини).

Якщо влада одної країни хоче поглинути іншу країну з метою захоплення її ресурсів або територій, ідеологи створюють в обличчі цільової країни ідею, образ зовнішнього ворога. Ця ідея, як правило, підкріплюється штучно створеними конфліктами, які викликають у виконавців - власного населення такі емоції, як образ, обурення, гнів, жагу помсти, ненависть, ворожнечу тощо. Підігрівання емоцій, інформаційне накачування емоційної бульбашки, нацьковування служить для виведення інертної людської маси з рівноваги. Виконавець, засліплений такими емоціями, вже сам просить у влади зброю, щоб піти помститися.

Світогляд людини базується на апріорній інформації, і у своєму житті більшість людей сприймають світ скрізь набір своїх персональних та масових уявлень, тобто опосередковано. Постійне зростання обсягів інформації, якими оперує сучасна людина, приводить до зміщення балансу у її житті між реальним та віртуальним, інформаційним світом. Отже, і вплив інформації на пріоритети людини, її поведінку та вибір значно зростає.

Дуже важливою є можливість з використанням сучасних інструментів інформаційного впливу спрямовано змінювати як бачення людськими спільнотами окремих ситуацій, об'єктів та подій, так і глобальну картину світу в цілому, культури та самі умови існування людського колективу. І тут ми наближуємося до головної мети інформаційної боротьби та інформаційних війн: розповсюдження і підсилення окремими групами свого економічного та владного впливу, тотальний контроль над всіма видами ресурсів, включаючи й людські.

Таким чином, інформація, інформаційний вплив, а згодом й інформаційні війни стали вагомим чинником перерозподілу територій та впливу імперій, засобом

геополітичного протистояння [7].

Інформаційний аспект протистояння та боротьби між державами просліджується з давніх часів. Зокрема, китайський воєначальник Сунь-Цзи наголошував: "Підкорити суперника без бою – ось вінець мистецтва". За висловом Наполеона Буонапарта, "чотири газети зможуть принести ворогові більше зла, ніж стотисячна армія".

З поширенням мережі Інтернет та створенням соціальних мереж включення людей до спільного інформаційного простору значно зросло. Інформаційні війни стають все більш широкомасштабними з мільйонними колективами учасників, а нові види інформаційних ресурсів, наприклад, мас-медіа, використовуються як нові види інформаційної зброї [6, 9].

В інформаційній війні, яка в умовах широкомасштабних військових дій в Україні стала не менш гарячою, очевидні нові риси та особливості:

- відкритість та відвертість інформаційних впливів;
- глобальність інформаційної війни;
- загострення інформаційних сутичок, суперечок, спорів;
- інтенсивність інформаційних атак;
- спроби інформаційним шляхом вивести з дії військові та інфраструктурні об'єкти, зокрема, щільні та чисельні хакерські атаки;
- агресивність інформаційних дій;
- інформаційне насильство;
- жорстке обмеження в доступі до інформації;
- політизованість інформації, спрямована на досягнення певних політичних (читай економічних) цілей;
- значна поляризованість інформації, що полягає у поданні діаметрально протилежних думок, фактів та висновків і є слідством конфронтації;
- зростання частки емоційного забарвлення та суб'єктивного трактування відносно до частки фактів.

З огляду на масштабність інформаційного впливу на окремі спільноти та на світове суспільство в цілому, а також та на руйнівні наслідки, можна впевнено стверджувати, що інформація є одним із видів зброї масового враження [9].

Інформація, як зброя, призвела до більших руйнувань, ніж зброя військова, адже вона, по-перше, стала витоком та причиною агресії, по-друге, крім спричинених завдяки ній вбивства та фізичним руйнуванням, вона здійснює як індивідуальні, так і широкомасштабні руйнування на моральному та психічному рівні, руйнуючи душі людей та основи суспільства.

Слід зауважити, що злочини інформаційної війни є не менш, а можливо й більш тяжкими, ніж військові злочини. Таким чином, важливим є реформування законодавства з метою підсилення відповідальності за інформаційні злочини, зокрема, за розпалювання ворожнечі та насильства з використанням інформаційних засобів, особливо, якщо це привело до загибелі людей, втрати ними здоров'я, руйнування моральних, духовних та культурних цінностей, до значних матеріальних втрат.

Найкращою зброєю в інформаційному протиборстві є відкрита, правдива, достовірна й неупереджена інформація, беззаперечні факти, які в достатній мірі, всебічно висвітлюють ту чи іншу подію. Висвітлення ж ситуації лише з одного боку, навіть у правдивих фактах може бути кваліфікованим як цілеспрямований інформаційний вплив на суспільство.

Для людини найкращим "рятувальним кругом" у вирі інформації є зосередження на "ближній" інформації: власне самопочуття, нагальні потреби, навколишня обстановка, стан людей, які поруч. Адже саме в це коло людина може привнести

конструктивні зміни, рішення, допомогти собі та тим, хто поруч.

Щодо "дальньої" інформації та віддалених проблем, людині, яка стикається з інформацією, слід запитати себе: "Чи можу я вплинути на це? Чи можу сприяти вирішенню цих проблем?", а далі перенести акцент на конкретні дії або свідому бездіяльність, щоб уникнути психічного перенавантаження. Тільки конкретний свідомий вибір, свідоме рішення по відношенню до інформації здатні розрядити психічну напругу.

Щоб не потонути в безмежному океані інформації, не бути захопленим потужними інформаційними потоками, треба свідомо спостерігати за цим океаном "з берега", вміти відсторонюватися, дистанціюватися від токсичної руйнівної інформації, розототожнюватися з нею.

При контакті з інформацією слід сприймати факти, відкидаючи емоційне забарвлення, вмикаючи такий механізм, як фільтрування. Важливо брати до уваги факти, що висвітлюють події з різних боків, усвідомлюючи інтереси та мотиви всіх учасників. «Неможливо вирішити проблему на тому самому рівні, на якому вона виникла. Потрібно стати вище цієї проблеми, піднявшись на наступний рівень» - сказав одного разу Альберт Ейнштейн.

Найкращими способами протидії інформаційним впливам та агресії є

- надання правдивої всебічної інформації;
- навчання населення у вигляді проходження курсів з інформаційної безпеки;
- індивідуальні тренінги, особливо відповідальних осіб;
- підготовка тренерів з інформаційної безпеки;
- широка пропаганда та розвинення інформаційної культури в інформаційному суспільстві;
- інформаційний лікбез, медіа-освіта [9] - школи та курси інформаційної грамотності для населення;
- навчання правилам інформаційної гігієни, розсудливості та розбірливості при контакті з інформацією.

Зокрема, необхідно вчити громадян критичному мисленню та розпізнаванню негативних інформаційних впливів, маніпулювання, дезінформації, фальсифікації тощо.

#### **Висновки:**

1. Інформаційна війна є невід'ємною складовою сучасної "гарячої" війни.
2. Свідомість людини та особливо масова свідомість є головною ціллю інформаційних впливів.
3. Інформаційна безпека людини є запорукою її безпечної життєдіяльності.
4. Головним засобом протидії інформаційній агресії є поширення правдивої інформації, дійсних фактичних даних, які всебічно та об'єктивно висвітлюють події у світі.
5. Навчання громадян правилам інформаційної безпеки та медіа-грамотності є запорукою безпеки, благополуччя, єдності та сталого розвитку суспільства в цілому.

#### **Список літератури**

1. Історія інформаційно-психологічного протиборства : підруч. / Я.М.Жарков та ін.; за заг. ред. д.ю.н., проф., засл. юриста України Є.Д.Скулиша. Київ : Наук.-вид. відділ НА СБ України, 2012. 212 с.
2. Почепцов Г. Сучасні інформаційні війни. Вид. 2-ге, допов. Київ : КиєвоМогила акад., 2016. 502 с.
3. Інформаційна безпека (соціально-правові аспекти): підруч. / Остроухой Б. В. та ін. ; за заг- ред. Є. Д. Скулиша. Київ : КНТ, 2010. 776 с.

4. Курбан О. В. Теорія інформаційної війни: базові основи, методологія та понятійний апарат. *Наук. журнал «ScienceRise»*. 2015. № 11(1). С. 95-100.
5. Горбулін В.П., Додонов О.Г., Ланде Д.В. Інформаційні операції та безпека суспільства: загрози, протидія, моделювання: монографія. Київ: Інтертехнологія, 2009. 164 с.
6. Курбан О.В. Сучасні інформаційні війни в мережевому он-лайн просторі: навч. посіб. Київ: ВІКНУ, 2016. 286 с.
7. Рудницька У.І. Інформаційні війни як засіб геополітичного протистояння. *Гуманітарний журнал*. 2015. № 1-2. С. 134-139.
8. Бабенко Ю. Інформаційна війна – зброя масового знищення! URL: <https://www.pravda.com.ua/rus/articles/2006/04/20/4399050/> (дата звернення: 02.03.2023).
9. Гібридна війна і журналістика. Проблеми інформаційної безпеки: навчальний посібник / за заг. ред. В. О. Жадька; ред.-упор.: О. І. Харитоненко, Ю. С. Полтавець. Київ: Вид-во НПУ імені М. П. Драгоманова, 2018. 356 с.

## References

1. Zharkov, Ia.M., Kompantseva, L.F., Ostroukhov, V.V., Petryk, V.M., Prysiazhniuk, M.M. & Skulysh Ye.D. (2012). *History of informational and psychological struggle*. Ye.D. Skulysha (Ed.). Kyiv: Nauk.-vyd. viddil NA SB Ukrainy [in Ukrainian].
2. Pocheptsov, H. (2016). *Modern information wars*. (2d ed.). Kyiv: KyievoMohyl. akad. [in Ukrainian].
3. Ostroukhov B. V., Petryk B. M., Prnsiazhniuk M. M. et al. (2010). *Information security (social and legal aspects)*. Ye. D. Skulysha (Ed.). Kyiv: KNT [in Ukrainian].
4. Kurban, O.V. (2015). Teoriia informatsiinoi viiny: bazovi osnovy, metodolohiia ta poniatynnyi aparat [The theory of information warfare: basic foundations, methodology and conceptual apparatus]. *Nauk. zhurnal «ScienceRise» – Scientific magazine "Science Rise", 11(1)*, 95-100 [in Ukrainian].
5. Horbulin, V.P., Dodonov, O.H. & Lande, D.V. (2009). *Informatsiini operatsii ta bezpeka suspilstva: zahrozy, protydiia, modeliuвання [Information operations and public security: threats, countermeasures, modeling]*. Kyiv: Intertekhnolohiia [in Ukrainian].
6. Kurban, O.V. (2016). *Suchasni informatsiini viiny v merezhevomu on-lain [Modern information wars in the online network space]*. Kyiv: VIKNU [in Ukrainian].
7. Rudnytska, U.I. (2015). Informatsiini viiny yak zasib heopolitychnoho protystoiannia [Information wars as a means of geopolitical confrontation]. *Humanitarnyi zhurnal – Humanitarian journal, 1-2*, 134-139 [in Ukrainian].
8. Babenko, Yu. Informatsiina viina – zbroia masovoho znyshchennia! Retrieved from <https://www.pravda.com.ua/rus/articles/2006/04/20/4399050> [in Ukrainian].
9. Zhadka, V.O., Kharytonenko, O.I. & Poltavets, Yu.S. (Eds.). (2018). *Hybrid war and journalism. Problems of information security*. Kyiv: Vyd-vo NPU imeni M. P. Drahomanova [in Ukrainian].

**Konstantyn Marchenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleh Oryshaka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

### Information Security of Human Life and Society in Conditions of War

The large-scale war started in Ukraine caused an intense surge of informational aggression and informational confrontation, the waves of which spread almost all over the world. Artificially prepared information is used as a weapon that works no less effectively than army weapons. The purpose of information weapons is primarily human consciousness and mass consciousness. Information security of human life and society in the conditions of intense information war becomes a priority task, as a guarantee of physical security.

In the information war, which in the conditions of a flarge-scale military operations in Ukraine has become no less hot, new features and peculiarities are obvious: openness and frankness of information influences; the global nature of the information war; aggravation of information clashes, disputes, disputes; intensity of information attacks; attempts to disable military and infrastructure facilities by means of information; aggressiveness of information actions; informational violence; strict restrictions on access to information; politicization of information; significant polarization of information; an increase in the share of emotional coloring and subjective interpretation relative to the share of facts.

Based on an overview of the scale of the informational impact on society and the destructive consequences, it can be argued that information is one of the weapons of mass impression.

The best ways to counter informational influences and aggression are to provide true and comprehensive information; education of the population in the form of information security courses; individual trainings, especially for responsible persons; training of information security trainers; broad propaganda and development of information culture in the information society; media education - schools and information



literacy courses for the population; learning the rules of information hygiene, prudence and legibility when contacting information. In particular, it is necessary to teach citizens critical thinking and recognition of negative informational influences, manipulation, misinformation, falsification, etc.

**Information security, information war, life safety, consciousness, information influence, information aggression, media literacy**

*Одержано (Received) 29.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

## ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.048.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.22-29](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.22-29)

**В. М. Боков**, проф., канд. техн. наук, **О. Ф. Сіса**, доц., канд. техн. наук, **В. Я. Мірзак**, доц., канд. техн. наук, **Р. В. Телюта**, доц., канд. техн. наук, **В. В. Пукалов**, доц., канд. техн. наук

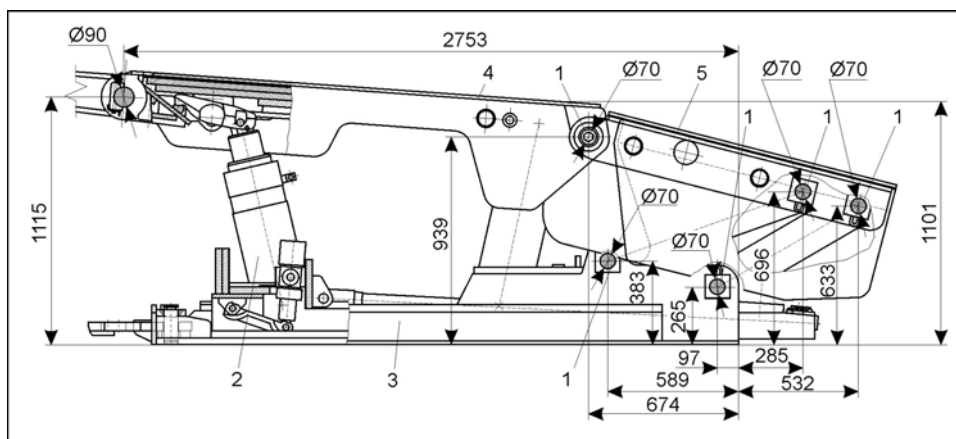
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: mirzak.moodle@gmail.com*

### Удосконалення технології розбирання металокопункцій механізованого шахтного кріплення

Запропоновано технологію для розбирання металокопункцій шахтного кріплення, що дозволяє замінити фізично важку та небезпечну працю оператора на більш легкий, механізований процес з використанням потужного гідравлічного біпреса.

**механізоване шахтне кріплення, моделювання, демонтаж осей, гідравлічний біпрес, кінематична схема, інструмент**

**Постановка проблеми.** Механізоване шахтне кріплення є одним із необхідних компонентів гірничо-шахтного обладнання. Основні функції, що виконуються механізованим шахтним кріпленням зводяться до забезпечення керування гірським тиском, активній підтримці покрівлі в робочому привибійному просторі очисного вибою, захисту привибійного простору від проникнення обвалених порід покрівлі тощо. Сучасні механізовані секції шахтного кріплення являють собою достатньо металомісткі, складні і дорогі механізми [1–4], що здатні підтримувати тимчасовий нормальний стан покрівлі за очисним вибоєм і тим самим забезпечувати відповідні умови праці (рис. 1).



1 – пальці, що підлягають випресовуванню; 2 – гідравлічний циліндр; 3 – основа; 4, 5 – рухома покрівля

Рисунок 1 – Типова конструкція механізованого шахтного кріплення у складеному стані  
Джерело: креслення ТОВ «СІМЗ»

© В.М. Боков, О.Ф. Сіса, В.Я. Мірзак, Р.В. Телюта, В.В. Пукалов, 2023

В процесі експлуатації шарнірні з'єднання шахтного кріплення практично перестають обертатися. Це пов'язано з тим, що внаслідок дії агресивної шахтної води та сильної запиленості, діаметральний зазор 1 – 2 мм між віссю та втулкою щільно заповнюється окислами та вугільним пилом, особливо у з'єднаннях основи [5]. Дана обставина приводить до того, що осі у шарнірах втрачають рухомість та потребують значного зусилля для їх демонтажу.

Для ремонту механізованого шахтного кріплення необхідне розбирання шарнірних з'єднань, які утворені осями (пальцями) та отворами у важелях (траверсах), вушках основи та перекриттях.

В теперішній час розбирання шарнірних з'єднань шахтного кріплення здійснюється з використанням ручного ударного інструменту. Ця операція достатньо трудомістка та фізично важка. За даними ТОВ «СІМЗ», більше 50 % вибитих осей повторно використовуються. Більш того, у ряді випадків не є можливим демонтувати усі осі в шарнірних з'єднаннях через необхідність створення великого зусилля при демонтажу. Тоді місце з'єднання ретельно прогривають автогенною горілкою. Але іноді і це не допомагає. В останньому випадку приймають радикальне та витратне рішення: автогеном відрізають місце з'єднання, виготовляють нове та закріплюють його методом зварювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах [6,7] звертається увага на можливість підвищити термін експлуатації різних деталей за рахунок нанесення різного роду захисних покриттів, зокрема іонно-плазмового напилювання робочих поверхонь, а в роботі [8] – дисперсними керамічними покриттями та полімерними антикорозійними покриттями. За даними ТОВ «СІМЗ», що спеціалізується на ремонті шахтного кріплення, такі покриття лише незначно подовжують термін експлуатації шарнірних з'єднань, але проблема їх розбирання залишається.

Із викладеного вище, в роботі пропонується:

– виконати дослідження щодо моделювання деформації елементів шахтного кріплення під навантаженням із застосуванням розрахункового модуля SOLIDWORKS Simulation для визначення максимально допустимого зусилля демонтажу осей;

– розробити концепцію оригінального спеціалізованого гідравлічного біпреса для демонтажу осей, що дозволить замінити трудомістку та фізично важку працю оператора на легку, механізовану. Такий біпрес не був об'єктом дослідження.

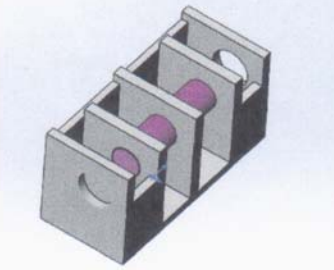
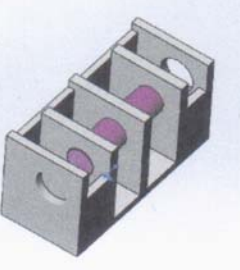
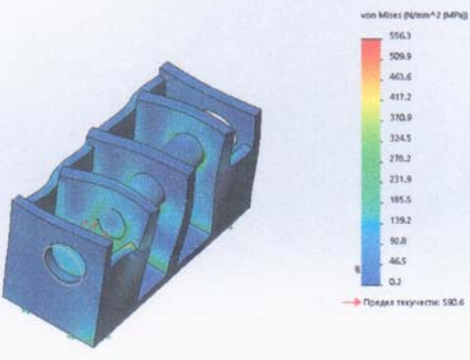
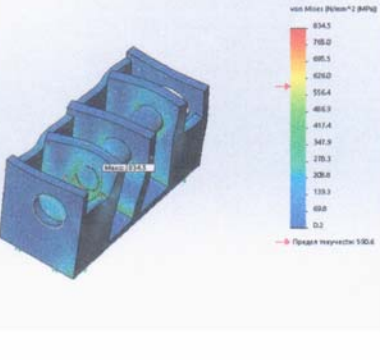
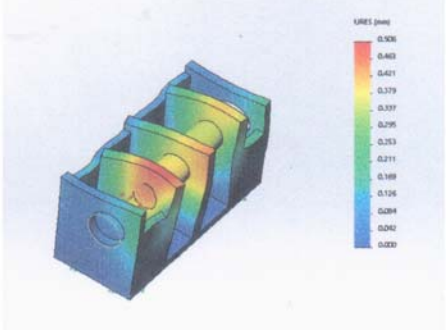
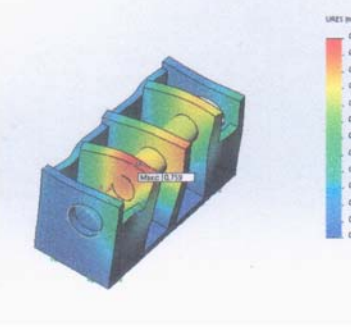
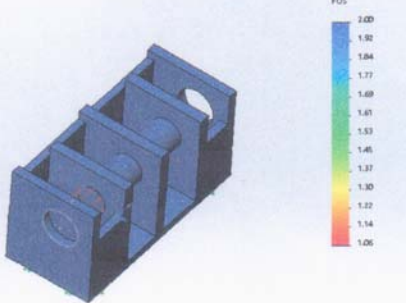
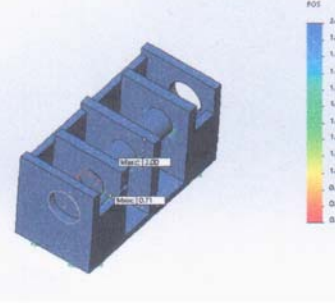
**Постановка задачі.** Метою дослідження є покращення умов праці оператора при реалізації процесу демонтажу осей у шарнірних з'єднаннях шахтних кріплень за рахунок застосування механізованого спеціалізованого гідравлічного біпреса.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: визначити максимально допустиме зусилля демонтажу осей з урахуванням міцності елементів конструкції, що несе; розробити концепцію механізованого гідравлічного біпреса, що включає склад установки, загальний технічний опис, принцип дії, кінематичну схему, інструмент.

**Методика дослідження.** Для моделювання деформації елементів шахтного кріплення під навантаженням використовувався розрахунковий модуль SOLIDWORKS Simulation [9, 10]. Спочатку створювалася реальна модель фрагмента шахтного кріплення. Матеріал: сталь з межею текучості 590 МПа. Потім модель послідовно навантажувалася зростаючим зусиллям. При цьому слідкували за зміною трьох параметрів: напруженням за Мізесом, переміщенням елементів конструкції та за коефіцієнтом запасу міцності. Це дозволило визначити максимальне зусилля демонтажу осей, при якому дані параметри відповідали допустимим значенням.

**Виклад основного матеріалу.** Результати моделювання деформації елементів шахтного кріплення під навантаженням зведено в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання напружено-деформованого стану фрагмента шахтного кріплення при демонтажу осі

Параметри	Зусилля 1000 кН	Зусилля 1500 кН
Модель фрагменту		
Напруження за Мізесом		
Переміщення		
Коефіцієнт запасу міцності		

Джерело: розроблено автором

Як бачимо, при навантаженні фрагмента шахтного кріплення в діапазоні від 1000 кН до 1500 кН спостерігається зростання переміщення з 0,506 мм до 0,759 мм та

зменшення коефіцієнта запасу міцності від 1,06 до 0,71. Таким чином, навантаження шахтного кріплення зусиллям більшим 1000 кН приводить до втрати запасу міцності конструкції, що неприпустимо.

Для вирішення проблеми ефективного розбирання шарнірних з'єднань шахтного кріплення пропонується оригінальний гідравлічний біпрес «Кит-100» горизонтальної компоновки з двома незалежними робочими органами із зустрічним напрямком передавання зусилля (рис. 2). Номінальне зусилля одного робочого органу дорівнює 1000 кН. Один із робочих органів впирається в шахтне кріплення, а другий робочий орган з протилежного боку в той же момент здійснює демонтаж осі.

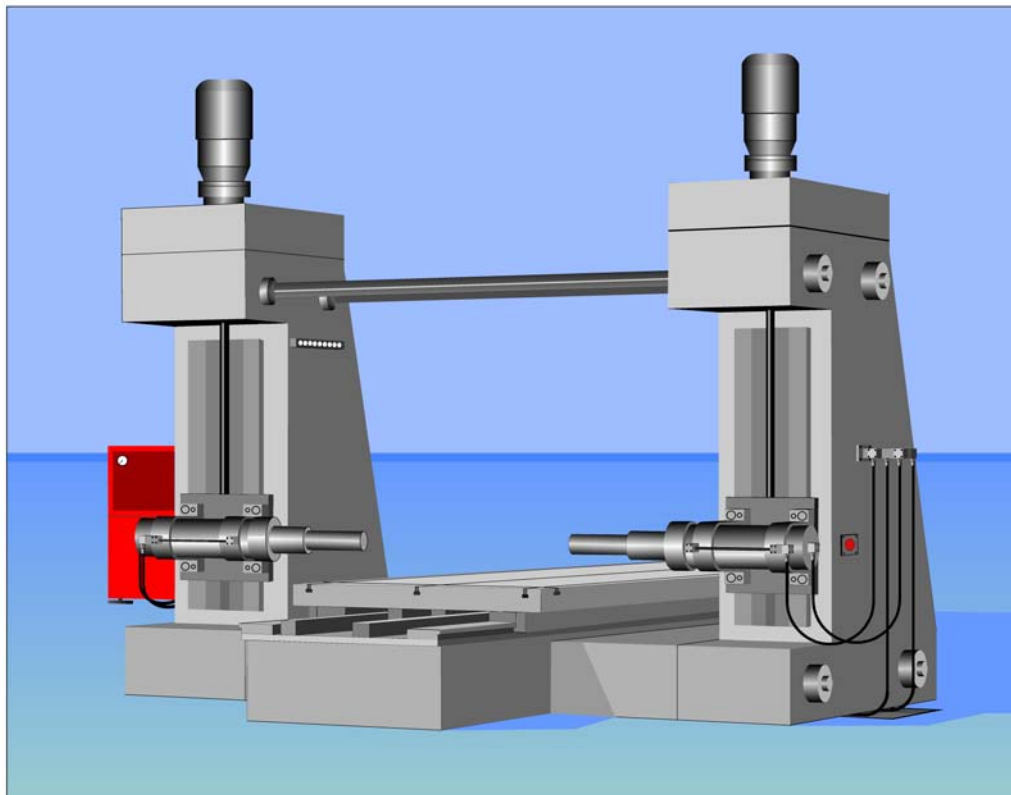


Рисунок 2 – Загальний вид гідравлічного біпреса «Кит-100»

*Джерело: розроблено авторами*

Гідравлічний біпрес «Кит-100» (рис. 3) включає в себе:

- рухомий стіл 1 (1600 × 3000 мм), на якому розміщується шахтне кріплення. Стіл забезпечує переміщення кріплення по осі Y (хід 1500 мм);
- станину, що складається із рами 2, корпусів 3, 4 та стійок 5, 6. Елементи станини з'єднані між собою гвинтами та стягнуті чотирма шпильками 7;
- на стійках 5, 6, з можливістю вертикального переміщення (хід 1430 мм), змонтовані силові гідравлічні циліндри 8, 9;
- приводи вертикального переміщення гідроциліндрів – гвинтові 10, 11 від мотор-редукторів 12, 13;
- привід горизонтального переміщення стола – гвинтовий 14 від мотор-редуктора 15;
- кожний гідроциліндр забезпечує хід штока 350 мм по осі X;
- керування біпресом – ручне, кнопкове. Пульт керування – переносний, індивідуальний.

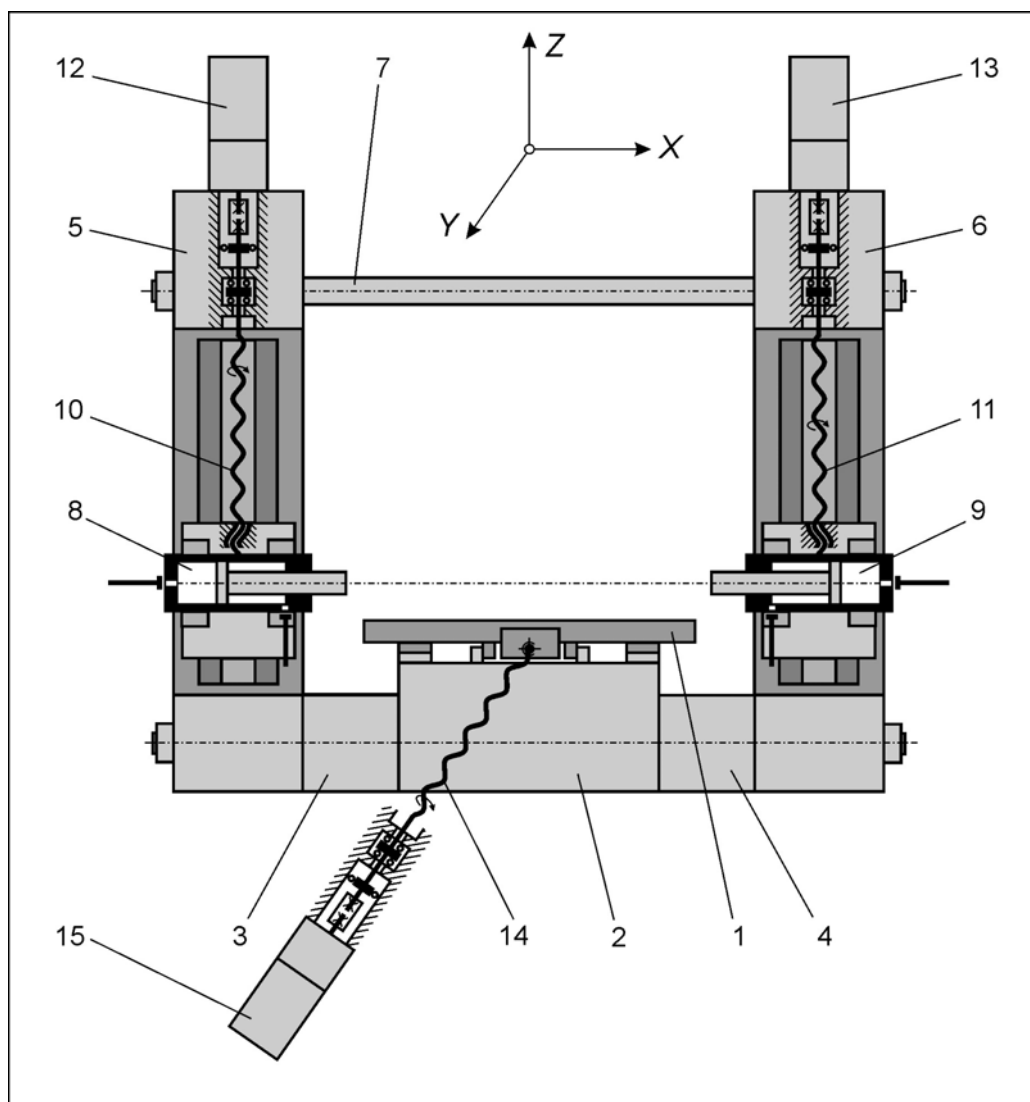


Рисунок 3 – Кінематична схема гідравлічного біпреса «Кит-100»

*Джерело: розроблено авторами*

Перед початком роботи стіл 1 висувають в зону завантаження та за допомогою цехового крану встановлюють на ньому шахтне кріплення. Кріплення закріплюють до столу верстатними гвинтами М20 за допомогою прихоплювачів. Кількість та місця розташування болтів визначається для кожного шахтного кріплення індивідуально. Далі переміщують стіл 1 в зону демонтажу верхнього ряду осей.

До штока гідроциліндра 8 прикріплюють накладною гайкою натискний інструмент (пуансон-штовхач) відповідного діаметра. Діаметр інструмента повинен бути на 10 мм менше діаметра осі, що демонтують. Для більш точного позиціонування інструмента відносно осі, на інструмент одягають легкий ковпачок, що центрує, який виконаний у вигляді керна. Керуючи переміщенням штока по осям  $X$ ,  $Z$  та столом по осі  $Y$ , підводять вістря ковпачка у центр осі. Далі відводять шток, знімають ковпачок і підводять знову шток до торкання з віссю.

Після виконання цих операцій переходять до циліндру 9, який змонтований на стійці 6. На шток гідроциліндра 9 накручують плоский циліндричний інструмент для того, щоб не ушкодити різьбу під накладну гайку. Далі, керуючи переміщенням штока по осям  $X$ ,  $Z$ , встановлюють його у задане місце до торкання з шахтним кріпленням. Оскільки в гідростанції керування передбачені нормально закриті гідравлічні замки,

гідроциліндр, з точки зору гідравліки, є закритим та може протидіяти зусиллю демонтажу.

Далі переходять до гідроциліндра 8, який змонтований на стійці 5, та починають процес демонтажу осі. Після закінчення процесу шток встановлюють в початкове положення та переходять до позиціонування шахтного кріплення для демонтажу наступної осі.

З метою забезпечення безпечних умов праці, індивідуальний переносний пульт керування біпресом виключає можливість одночасної роботи обох гідроциліндрів 8, 9.

Інструментом для демонтажу осі (пальця) із шахтного кріплення є пуансон-штовхач (рис. 4).

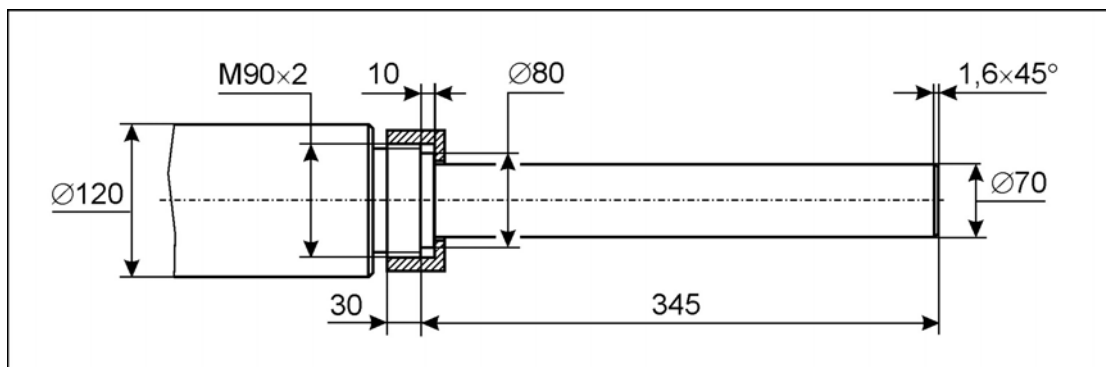


Рисунок 4 – Приклад виконання та кріплення до штоку пуансона-штовхача з робочим діаметром 70 мм для гідравлічного біпреса «Кит-100»

Джерело: розроблено авторами

Він під дією навантаження працює на поздовжній вигин, а тому повинен мати відповідний запас поздовжньої стійкості. Чим вище твердість пуансона-штовхача, тим менше він вигинається, але при великій твердості та ексцентричному навантаженні він схильний до сколювання. Тому для виготовлення пуансона-штовхача рекомендується якісні сталі 45, 45X та інструментальні сталі У7, У8. При цьому твердість інструмента не повинна бути більшою 40...42 HRC<sub>e</sub>. Результати моделювання на поздовжню стійкість у SOLIDWORKS Simulation показали запас міцності для рекомендованих сталей в межах від 4,5 до 5,2.

Гідравлічний біпрес «Кит-100» являє собою установку, що складається із наступних елементів (рис. 5):

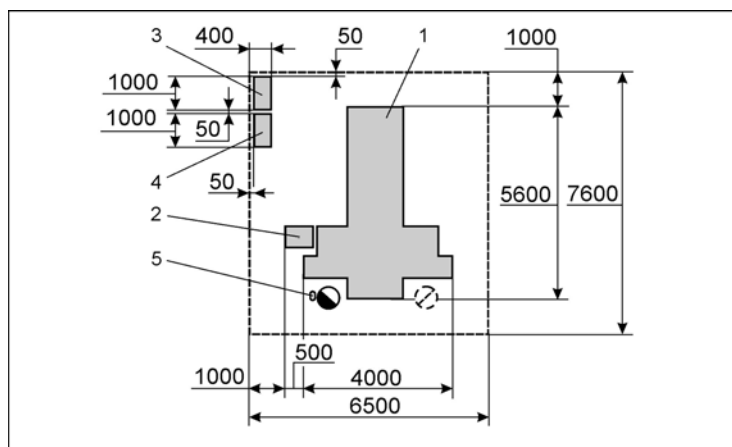


Рисунок 5 – План-схема установки

Джерело: розроблено авторами

- трикоординатного біпреса 1;
- станції гідроприводу 2;
- електрошафи 3;
- інструментальної тумбочки 4;
- двох переносних пультів керування.

**Висновки.** Виконано дослідження щодо моделювання деформації елементів шахтного кріплення під навантаженням із застосуванням розрахункового модуля SOLIDWORKS Simulation для визначення максимально допустимого зусилля демонтажу осей в шарнірних з'єднаннях. Показано, що навантаження шахтного кріплення зусиллям більшим 1000 кН приводить до втрати запасу міцності конструкції, що неприпустимо. Запропоновано ефективну технологію демонтажу осей в шахтному кріпленні під час ремонтних робіт. Розроблено концепцію оригінального спеціалізованого гідравлічного біпреса «Кіт-100» для демонтажу осей, що дозволяє замінити фізично важку та небезпечну працю оператора на більш легкий, механізований процес.

## Список літератури

1. Szurgacz D. Dynamic Analysis for the Hydraulic Leg Powerof a Powered Roof Support. *Energies*. 2021. 14 (18). 5715. <https://doi.org/10.3390/en14185715>
2. Szurgacz D., Borska B., Diederichs R., Zhironkin S. Development of a Hydraulic System for the Automatic Expansion of Powered Roof Support. *Energies*. 2022. 15(3), 680. <https://doi.org/10.3390/en15030680>
3. Wang G. F., Pang Y. H. Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application. *Journal of the China Coal Society*. 2015. Vol. 40, №1. P. 30–34.
4. Liang L., Tian J., Zheng H., Jiao S. A Study on Force Transmission in a Hydraulic Support under Impact Loading on Its Canopy Beam. *J. China Coal Soc.* 2015. Vol. 40. P. 2522–2527.
5. Zeng Q., Xu P., Meng Z., Ma C., Lei X. Posture and Dynamics Analysis of Hydraulic Support with Joint Clearance under Impact Load. *Machines*. 2023. Vol. 11, №1. P. 159. <https://doi.org/10.3390/machines11020159>
6. Михайлов А. Г., Михайлов А. А., Михайлова Е. А. Ионно-плазменные вакуумные покрытия – основа широкого повышения качества изделий машиностроения. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения: межд. сб. научн. трудов*. 2004. Вып. 28. С. 108-115.
7. Kennedy D., Xue Y., Mihaylova M. Current and Future Applications of Surface Engineering. *The Engineers Journal (Technical)*. 2005. Vol. 59. P. 287-292.
8. Татьяначенко А. Г., Каюн А. П., Лаппо И. Н. Технологические перспективы повышения эффективности эксплуатации шахтной крепи. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2010. №1. С. 20 – 29.
9. Камишацький О.Ф., Расцветаев В.О. Моделювання технологічних процесів. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології» / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Д.: НТУ «ДП». 2019. С. 48.
10. Методичні вказівки до виконання лабораторних і практичних робіт з курсу «Основи моделювання процесів в обробці тиском» для студентів освітньої програми «Прикладна механіка» денної і заочної форми навчання / уклад. : А. О. Окунь, С. О. Губський, В. Л. Чухліб, А. В. Ашкелянець, О. А. Юрченко. Харків : НТУ «ХПІ». 2021. С. 88.

## References

1. Szurgacz D. (2021). Dynamic Analysis for the Hydraulic Leg Powerof a Powered Roof Support. *Energies*. 14(18), 5715. <https://doi.org/10.3390/en14185715> [in English].
2. Szurgacz, D., Borska, B., Diederichs, R., Zhironkin S. (2022). Development of a Hydraulic System for the Automatic Expansion of Powered Roof Support. *Energies*, 15(3), 680. <https://doi.org/10.3390/en15030680> [in English].
3. Wang, G.F., Pang, Y.H. (2015). Relationship between hydraulic support and surrounding rock coupling and its application. *Journal of the China Coal Society*, Vol. 40, №1. P. 30–34 [in English].



4. Liang, L., Tian, J., Zheng, H., Jiao, S. (2015). A Study on Force Transmission in a Hydraulic Support under Impact Loading on Its Canopy Beam. *J. China Coal Soc.* Vol. 40. P. 2522–2527 [in English].
5. Zeng, Q., Xu, P., Meng, Z., Ma, C., Lei, X. (2023). Posture and Dynamics Analysis of Hydraulic Support with Joint Clearance under Impact Load. *Machines.* Vol. 11, №1. P. 159. <https://doi.org/10.3390/machines11020159> in English].
6. Mihajlov, A.G., Mihajlov, A.A. & Mihajlova, E.A. (2004). *Ionno-plazmennye vakuumnye pokrytiya – osnova shirokogo povysheniya kachestva izdelij mashinostroeniya [Ion-plasma vacuum coatings are the basis for a wide improvement in the quality of engineering products]*. Doneck: DonNTU [in Ukrainian].
7. Kennedy, D., Xue, Y., Mihaylova, M. (2005). Current and Future Applications of Surface Engineering. *The Engineers Journal (Technical)*. Vol. 59. P. 287-292 [in English].
8. Tatyanchenko, A. G., Kayun, A. P., Lappo, I. N. (2010). *Tehnologicheskie perspektivy povysheniya effektivnosti ekspluatatsii shahtnoj krepі [Technological prospects for increasing the efficiency of mine support operation]*. Visti Doneckogo gornichogo institutu [in Ukrainian].
9. Kamishackij, O.F. & Rascvyetayev, V.O. (2019). *Modelyuvannya tehnologichnih procesiv [Modeling of technological processes]*. Dnipro: Dniprovskaya politehnika [in Ukrainian].
10. Okun, A.O., Gubskij, S.O., Chuhlib, V.L., Ashkelyanec, A.V. & Yurchenko, O.A. (2021). *Osnovi modelyuvannya procesiv v obrobcі tiskom [Basics of modeling processes in pressure treatment]*. Harkiv: Harkivskij politehnichnij institut [in Ukrainian].

**Victor Bokov**, Prof., PhD tech. sci., **Oleh Sisa**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Mirzak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Teliuta**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Improvement of Technology for Dismantling Metal Structures of Mechanized Mine Supports**

During operation, the hinge connections of mine supports practically stop rotating. This is due to the fact that, as a result of the aggressive mine water and strong dustiness, the diametrical clearance of 1-2 mm between the axis and the bushing is tightly filled with oxides and coal dust, especially in the connections of the base. This circumstance leads to the fact that the axes (pins) in the hinges lose their mobility and require significant effort for their dismantling. To repair the mechanized mine support, it is necessary to dismantle the hinge connections, which are formed by axes and holes in levers (traverses), base ears, and overlaps. Currently, the dismantling of hinge connections of mine supports is carried out using manual impact tools.

This operation is extremely labor-intensive, physically heavy, and belongs to hazardous work. The goal of the study is to improve the working conditions of the operator during the dismantling process of axes in hinge connections of mine supports by using a mechanized specialized hydraulic press. To achieve the set goal, the following tasks must be solved: to determine the maximum permissible disassembly force of the axes, taking into account the strength of the load-bearing structure elements; to develop a concept of a mechanized hydraulic press, including the composition of the installation, the general technical description, the principle of operation, the kinematic scheme, and the tool.

Studies have been carried out on the deformation modeling of mine support elements under load using the SOLIDWORKS Simulation calculation module to determine the maximum permissible disassembly force of the axes. It has been shown that the disassembly load of the shaft support axis with a force of more than 1000 kN leads to the loss of the structural strength reserve, which is unacceptable. An effective technology for dismantling the axes of a mechanized mine support has been proposed. A concept of an original specialized hydraulic press "Kit-100" for dismantling axes has been developed, which allows replacing the physically heavy and dangerous work of the operator with a lighter, mechanized process.

**mechanized mine support, modeling, axis dismantling, hydraulic press, kinematic scheme, tool**

*Одержано (Received) 20.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 28.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 621.787.4

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.30-36](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.30-36)

**М.І. Черновол**, академік НААН України, проф., д-р техн. наук, **І.В. Шепеленко**, проф., д-р техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
e-mail: [kntucpfzk@gmail.com](mailto:kntucpfzk@gmail.com)

## Системний підхід до формування показників якості відновлених деталей

В роботі розглянуто технологічний процес відновлення деталей як систему взаємопов'язаних елементів, які можуть впливати на формування показників якості відновлених деталей. На етапі технологічного проектування виокремлені основні ієрархічні рівні, а технологічний процес відновлення в цілому представлений у вигляді функцій зв'язків між окремими елементами підсистеми. Це дозволило представити загальну структуру технологічного процесу відновлення зношених деталей як систему взаємозв'язків. З урахуванням особливостей функціонування системи запропоновано підхід, відповідно до якого всі елементи системи мають вплив до формування показників якості відновлених деталей. Встановлено функціональні зв'язки між показниками якості та елементами технологічного процесу на різних рівнях оцінювання. Показано шляхи забезпечення якості відновлених деталей на основних етапах життєвого циклу виробу.

**технологічний процес відновлення деталі, спосіб відновлення, якість відновлення, системний підхід, елементи системи**

**Постановка проблеми.** Життєвий цикл виробів машинобудування від ідеї їх створення до повної утилізації являє собою сукупність взаємопов'язаних процесів послідовної зміни стану деталі. Кожен з етапів життєвого циклу по-своєму визначає якість продукції. У загальному розумінні якість продукції – це сукупність властивостей цієї продукції, які визначають її придатність задовольняти певні потреби відповідно до призначення об'єкту [1].

На етапі експлуатації деталей їх життєвий цикл може бути продовжено за рахунок ремонту та відновлення зношених поверхонь. Тому відновлення деталей прийнято розглядати як комплекс операцій з відновлення справного або працездатного стану деталі та її технічного ресурсу [2].

Оскільки проблема відновлення деталей має комплексний характер, для її вирішення можливе застосування системного підходу, який передбачає методологічну орієнтацію вивчення, засновану на розгляді об'єкта у вигляді систем, тобто сукупності елементів, пов'язаних взаємодією, які через це виступають як єдине ціле по відношенню до навколишнього середовища [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технологічний процес відновлення деталей володіє всіма необхідними властивостями, які пред'являються до систем [4]:

- є цілісним комплексом взаємопов'язаних елементів, у ролі яких виступають деталь, технологічні операції, режими тощо;
- є елементом системи вищого порядку, зокрема виробничого процесу ремонту машин;
- елементи технологічного процесу можуть розглядатися як системи більш низького порядку (технологічна операція складається з таких взаємопов'язаних елементів: обладнання, пристосування, інструменту, деталі, переходу).

На думку авторів [5] найбільш відповідальний етап проектування технологічного процесу відновлення деталі – вибір оптимальної технології відновлення.

На сьогодні для підвищення довговічності деталі використовуються різноманітні технології зміцнення та модифікації поверхневого шару: фізико-хімічна обробка, термічна обробка, поверхнево-пластична обробка, нанесення покриттів різними способами та ін., які можна застосовувати при відновленні зношених поверхонь деталей [6]. Незважаючи на їх багаточисельність (тільки технологій поверхневого зміцнення більше двохсот [7]), не одна з них не є універсальною і у кожному конкретному випадку слід вибрати саме той метод обробки, який повною мірою забезпечує необхідну якість та є економічно доцільним [8]. В теорії та практики ремонтного виробництва відомі різні підходи щодо вибору способу відновлення деталей. В загальному випадку при виборі раціонального способу відновлення деталей прийнято використовувати наступні критерії: застосовуваності (технологічний критерій), довговічності та техніко-економічний [9]. Крім того, за даними [10], при виборі оптимальної технології відновлення деталей доцільно також здійснювати оцінку її економічної ефективності за собівартістю відновлення та зміною ресурсу відновленої деталі.

Разом з тим слід відмітити, що запропоновані методики та критерії розглядають тільки способи відновлення, які є тільки частинами технологічного процесу відновлення. Але технологічний процес відновлення набагато складніший. Його слід розглядати як взаємну сукупність різних технологічних методів обробки. Саме представлення технологічного процесу як систему в цілому дозволить встановити зв'язки між окремими її елементами та запропонувати шляхи підвищення якості відновлених деталей.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є представлення технологічного процесу відновлення як системи взаємозв'язків між окремими елементами, які дозволяють цілеспрямовано впливати на показники якості відновлених деталей.

**Виклад основного матеріалу.** У структурному відношенні технологічний процес відновлення деталі в загальному випадку може бути представлений як певним чином пов'язану сукупність способів усунення дефектів. При цьому на етапі технологічного проектування слід виділити чотири основні ієрархічні рівні (рис. 1).

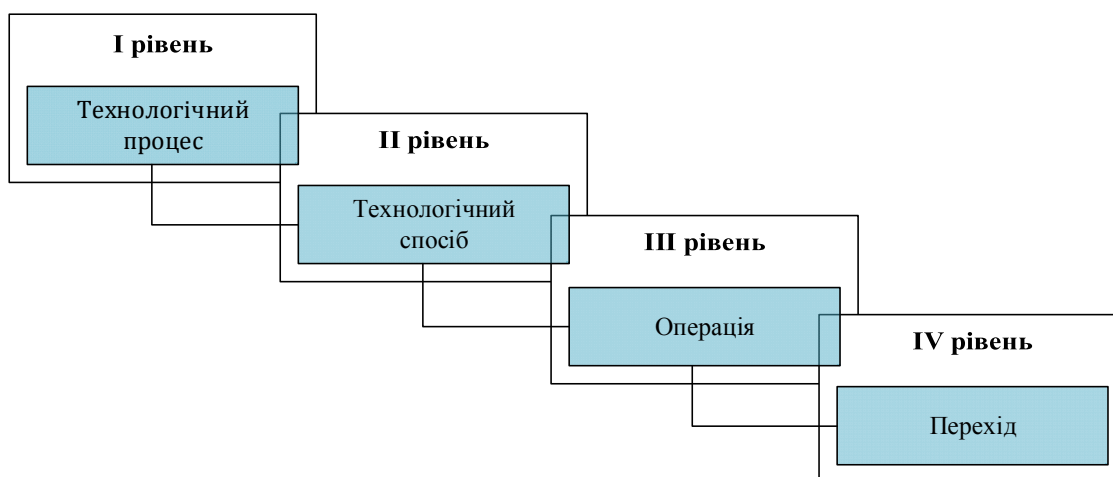


Рисунок 1 – Основні ієрархічні рівні технологічного проектування відновлення деталі  
Джерело: розроблено авторами

Кожен технологічний процес відновлення деталі та його складові можуть бути представлені у вигляді функцій зв'язку між підсистемами "вхід" і "вихід". Елементарними об'єктами "входу" є зношена деталь, матеріал металопокриття, технологічне обладнання, інструмент, оснащення. Елементарними об'єктами "процесу" виступають: процес відновлення в цілому, технологічний спосіб відновлення, окремі операції, переходи, прийоми тощо. На "виході" всієї системи маємо відновлену деталь.

На підставі такого підходу запропоновано загальну структуру технологічного процесу відновлення зношених деталей (рис. 2). При цьому слід розуміти, що зв'язки між окремими елементами системи для багатьох типів деталей набагато складніші. Як підсистеми мають виступати попередня механічна обробка, нанесення покриттів, термічна обробка, остаточна механічна обробка, зміцнювальна обробка тощо.

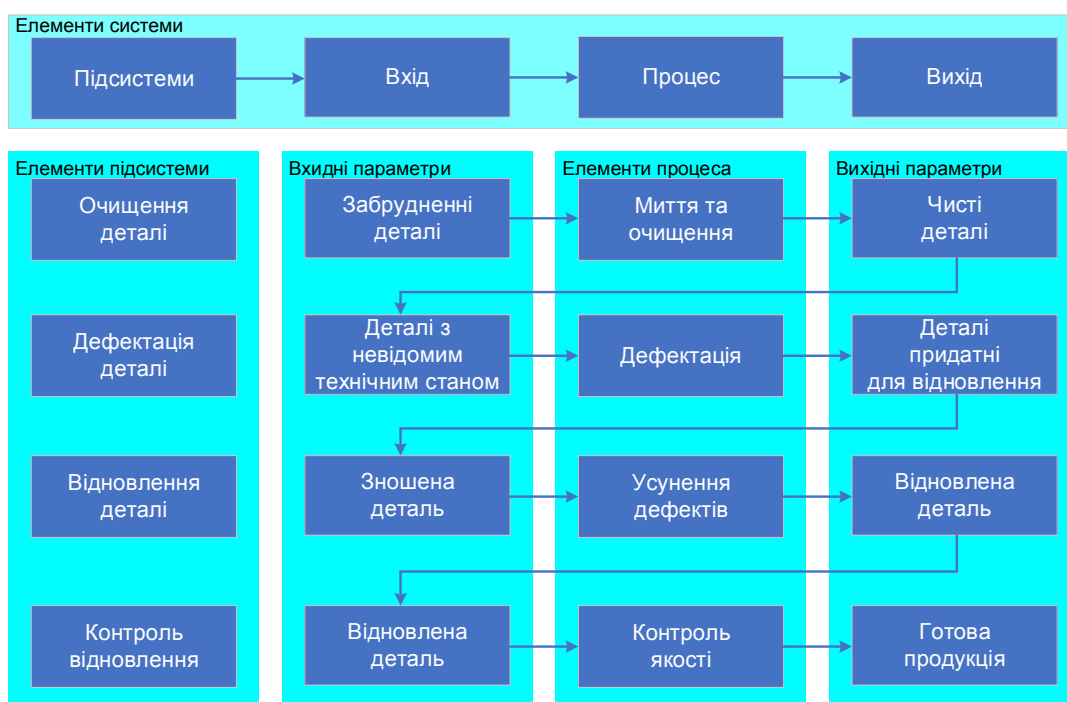


Рисунок 2 – Загальна структура технологічного процесу відновлення деталі

*Джерело: розроблено авторами*

Відповідно до наведеної схеми та згідно з відомим типовим технологічним процесом відновлення [4] зношена деталь спочатку надходить на очищення. Проходячи процес «Миття та очищення» на виході слід очікувати «Чисті деталі». На наступному етапі з метою визначення можливості відновлення «Деталі з невідомим технічним станом» надходить скрізь процес «Дефектація», на виході якої – «Деталі придатні для відновлення». Наступний елемент підсистеми – «Відновлення деталі».

Правильний вибір методу відновлення багато в чому визначає якість відновлених деталей, який контролюється на заключному етапі «Контроль відновлення». Тому, на виході цієї системи слід очікувати «Готова продукція» до експлуатації.

Зрозуміло, що запропонована структура технологічного процесу відновлення в загальному випадку описує послідовність виконання операцій та їх взаємозв'язок і може бути уточнена більш докладним описом технології в кожному конкретному випадку відновлення деталей. Але суть системи та рівень взаємозв'язків між елементами системи мають залишатися незмінними.

Управління якістю відновлення деталей вимагає чіткого уявлення цілісної структури такої системи. При цьому процес управління якістю виробів (відновлених

деталей) має охоплювати основні стадії існування виробів: дослідження і проектування технологічних процесів відновлення, а також реалізацію процесів відновлення (стадії виробництва) та експлуатацію відновлених деталей (споживання). Між основними стадіями існують також перехідні процеси: технологічна підготовка виробництва, зберігання і транспортування деталей, збирання зношених деталей тощо.

З урахуванням зазначених особливостей функціонування системи запропоновано наступний підхід до формування показників якості відновлених деталей (рис. 3).

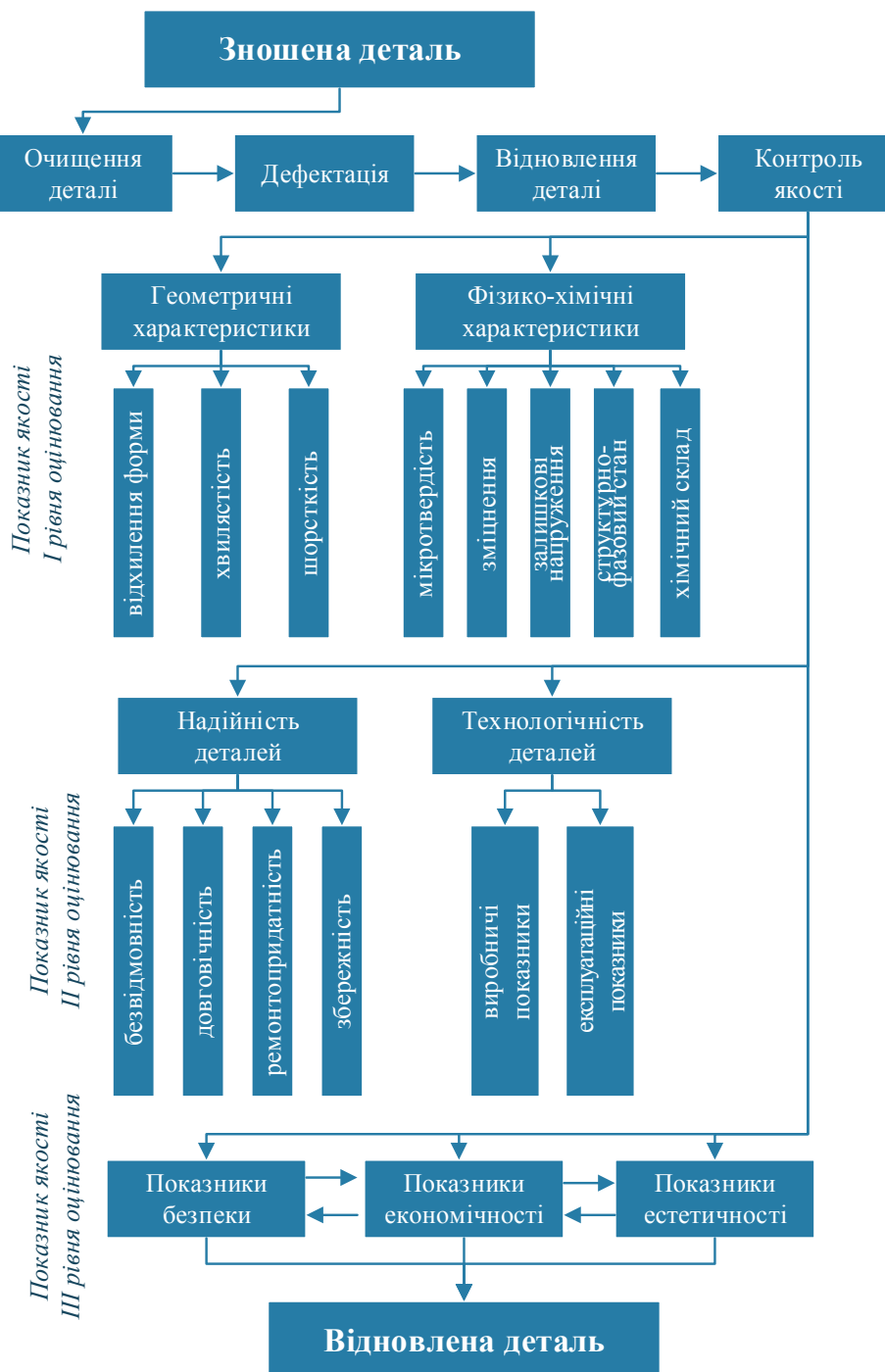


Рисунок 3 – Система технологічного формування показників якості відновлених деталей  
Джерело: розроблено авторами

Основний важіль управління системою забезпечення необхідних показників якості – це перш за все елементи технологічного процесу: способи, обладнання, матеріали, режими, оснащення тощо. За допомогою певних способів очищення, дефектації, наросування металу, механічної, термічної та зміцнювальної обробок, принципів базування, використання прогресивних матеріалів, раціональних режимів оброблення, необхідного технологічного оснащення спрямовано формуються показники якості I рівня оцінювання (показники призначення) і встановлюються функціональні зв'язки.

Показники II рівня призначення – надійності та технологічності деталі досягаються при встановленні більш складних функціональних зв'язків. У цьому разі показники призначення виступають у ролі чинників. За допомогою цих же зв'язків формуються показники III рівня оцінки – безпеки, економічності та естетичності.

Разом з тим, слід відзначити, що питання забезпечення якості деталей, в тому числі відновлених, слід комплексно вирішувати на етапах проектування, виготовлення (відновлення) та експлуатації виробів (рис. 4).

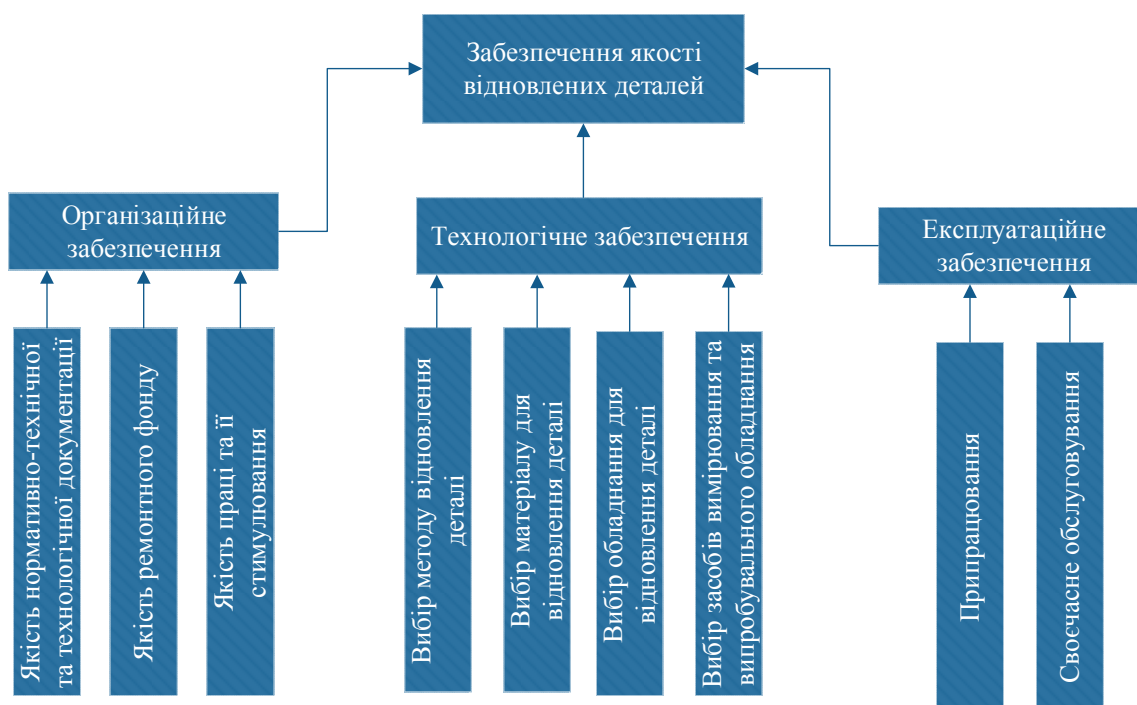


Рисунок 4 – Система забезпечення якості відновлених деталей

*Джерело: розроблено авторами*

Таким чином, представлений підхід до формування показників якості відновлених деталей дає змогу досліджувати причинно-наслідкові зв'язки між параметрами технологічних процесів і показниками якості деталей, що відновлюються, а також встановлювати шляхи підвищення якості відновлених деталей.

#### **Висновки:**

1. Запропонована загальна структура технологічного процесу відновлення деталей, яка крім послідовності виконання операцій та їх взаємозв'язку, представлена у вигляді функції зі зв'язками між окремими елементами підсистеми.

2. Представлено процес формування показників якості відновлених деталей як систему, в якій основний важіль управління – елементи технологічного процесу. Встановлено рівень взаємозв'язків між окремими показниками якості, які в цілому визначають якість продукції.

3. Показано шляхи забезпечення якості відновлених деталей на їх основних етапах життєвого циклу.

## Список літератури

1. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / Є.А. Фролов, С.І. Кравченко, С.В. Попов, С.М. Гнітько. Полтава, 2019. 201 с.
2. Стецько А. Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей: монографія. Львів: Видавнича компанія «АРС», 2013. 240 с.
3. Романенко В. А. Розвиток машинобудування в Україні: системний підхід. *Економіка України*. 2013. № 10. С. 56–66.
4. Черновол М.И. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники: учеб. пособие. Київ: УМК ВО, 1989. 259 с.
5. Лузан С.А. Критерии выбора способа восстановления деталей машин и определение рационального маршрута технологии. *Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка*. 2017. Вип.183. С.45–56.
6. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. Київ: Наукова думка, 2007. 558 с.
7. Солових Є.К. Науково-методологічні основи підвищення несучої здатності функціональних покриттів конструктивними та технологічними методами: автореф. дис. д-ра. техн. наук: 05.03.07. К., 2013. 36 с.
8. Alexander Permyakov, Yakiv Nemyrovskiy, Eduard Posviatenko and Ihor Shepelenko (2023). Methodology of technological design in the restoration of parts. *Modeling and Computer Engineering in Mechanical Engineering: Theory, Practice, and Innovation" (MCEME-2022): International Scientific and Theoretical Conference*. Vol. 1277 (28/09/2022 - 21/10/2022, Lviv). doi:10.1088/1757-899X/1277/1/012013. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1277/1/012013/meta> (дата звернення: 01.03.2023)
9. Шепеленко І.В., Красота М.В. Сучасні технології реновації деталей автомобільного транспорту. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали X міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. (14-15 квітня 2022 р.)*. Вінниця: ВНТУ, 2022. С.325–328.
10. Лузан С.О. Обґрунтування економічної доцільності і ефективності відновлюваного наплавлення деталей композиційними матеріалами. *Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів*. 2020. №22. С.272–280.

## References

1. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V. & Hnitko, S.M. (2019). Tekhnologichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia [Technological support for the quality of engineering products]. *Poltava*. 201. [in Ukraine].
2. Stetsko, A. Ye. (2013). Tekhnologichne zabezpechennia resursu roboty vyhotovlenykh i vidnovlenykh detalei [Technological support for the service life of manufactured and refurbished parts]. Lviv. Vydavnycha kompaniia ARS. 240. [in Ukraine].
3. Romanenko, V.A. (2013). Rozvytok mashynobuduvannia v Ukraini: systemnyi pidkhid [Development of machine building in Ukraine: a systematic approach]. *Ekonomika Ukrainy*. No 10. 56–66. [in Ukraine].
4. Chernovol, M.I. (1989). Vosstanovlenie i uprochnenie detalej selskohozyajstvennoj tehniky [Restoration and hardening of parts of agricultural machinery]. *Kiev, UMK VO*, 259. [in Russian].
5. Luzan, S.A. (2017). Kriterii vybora sposoba vosstanovleniya detalej mashin i opredelenie racionalnogo marshruta tehnologii [Criteria for selecting a machine part rebuilding method and defining a rational technology route]. *Visnik HNTUSG im. P.Vasilenka*. Vip.183. 45–56. [in Russian].
6. Yushchenko, K.A., Borysov, Yu.S., Kuznetsov, V.D. & Korzh, V.M. (2007). Inzheneriia poverkhni [Surface engineering]. *Kyiv, Naukova dumka*. 558. [in Ukraine].
7. Solovykh, Ye.K., (2013). Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennia nesuchoi zdatnosti funktsionalnykh pokryttiv konstruktyvnymy ta tekhnolohichnymy metodamy [Scientific and methodological bases of increasing the bearing capacity of functional coatings by constructive and technological methods]. *Avtoreferat dysertatsii doktora tekhnichnykh nauk*. Kyiv. 36. [in Ukraine].
8. Alexander Permyakov, Yakiv Nemyrovskiy, Eduard Posviatenko & Ihor Shepelenko (2023). Methodology of technological design in the restoration of parts. *Modeling and Computer Engineering in Mechanical Engineering: Theory, Practice, and Innovation" (MCEME-2022): International Scientific and Theoretical Conference*. Vol. 1277 (28/09/2022 - 21/10/2022, Lviv). doi:10.1088/1757-

- 899X/1277/1/012013. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1277/1/012013/meta> [in English].
9. Shepelenko, I.V. & Krasota, M.V. (2022). Suchasni tekhnologii renovatsii detalei avtomobilnoho transportu [Modern technologies for the renovation of motor vehicle parts]. Problems and prospects of the development of road transport: *X Mizhnarodna naukovo-tekhnichna internet-konferentsia (14-15 kvitnia 2022 r.) – X International science and technology Internet Conf* (pp.325–328). *Vynnytsia: VNTU*. [in Ukraine].
10. Luzan, S.O. (2020). Obgruntuvannya ekonomichnoi dotsilnosti i efektyvnosti vidnovliuvanoho naplavlennia detalei kompozytsiinymy materialamy [Substantiation of the economic feasibility and efficiency of restorative surfacing of parts with composite materials]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho lisovoho ta transportnoho kompleksiv. No 22. 272–280*. [in Ukraine].

**Mykhailo Chernovol**, Academician of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Prof., DSc.,  
**Ihor Shepelenko**, Prof., DSc.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **A Systematic Approach to Forming Quality Indicators for Refurbished Parts**

The paper considers the technological process of parts restoration as a system of interrelated elements that can influence the formation of quality indicators of restored parts. It is established that the technological process has all the necessary properties that are required for systems. However, modern methods and criteria used in the design of the technological process of parts recovery focus on the selection of the optimal recovery method, which is only part of the technological process. Therefore, the paper sets the goal of presenting the technological process of restoration as a system of interconnections between individual elements that allow to purposefully influence the quality indicators of restored parts.

The main hierarchical levels of technological design of part recovery are defined. In turn, the technological process of restoration as a whole is presented in the form of functions of connections between individual elements of the subsystem. This made it possible to present the overall structure of the technological process of restoring worn parts as a system. Taking into account the peculiarities of the system's functioning, an approach is proposed, according to which all elements of the system have an impact on the formation of quality indicators of the restored parts. The functional links between quality indicators and elements of the technological process at different levels of evaluation are established.

The main ways to ensure the required quality indicators through the elements of the technological process are determined: methods, equipment, materials, modes, equipment, etc. The proposed approach to the formation of quality indicators of remanufactured parts makes it possible to study the cause-and-effect relationships between the parameters of technological processes and quality indicators of remanufactured parts, as well as to establish ways to improve them. The ways to ensure the quality of remanufactured parts at the main stages of the product life cycle are shown.

**technological process of part restoration, restoration method, restoration quality, systematic approach, system elements**

*Одержано (Received) 16.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*



## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 681.2-5; 676.84.05

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.37-44](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.37-44)

**Н. М. Кандяк**, доц., канд. техн. наук, **А. Б. Коломієць**, доц., канд. техн. наук,  
**О. О. Котовський**, асп.

*Українська академія друкарства, м. Львів, Україна*

*e-mail: kandyak.nazar@gmail.com, kolanbor@gmail.com, os.kotovskiy@gmail.com*

## Засоби керування кроковим двигуном та вимірювання зусиль під час дослідження процесу згинання аркушевого матеріалу

Для дослідження явищ під час утворення об'ємної форми тари методом одночасного згинання клапанів розгортки з гофрованого картону створено стенд. Привод інструментам, що надається від крокового двигуна, може бути як рівномірним, так і за певними законами руху. Розглянуто електронні пристрої керування двигуном та вимірювальним модулем, а також спеціалізоване програмне забезпечення. Створено програму керування швидкістю вала двигуна під час робочого і зворотного ходу. **програмування, стенд, кроковий двигун, драйвер, керування, закон руху, вимірювання**

**Постановка проблеми.** Натепер гостро стоїть питання оперативного створення паковань і тари з можливістю швидкої доставки за місцем призначення. Крім того, висувається вимоги до матеріалу паковань і тари – їхня низька вартість та доступність в країні. Одним з матеріалів, що якнайкраще задовольняють цим вимогам є картон. Пакувальні матеріали на основі картону мають природній характер відтворення, наділені високими санітарно – гігієнічними властивостями та придатні для застосування сучасних технологій [1].

Для виготовлення транспортної тари застосовують багат шаровий матеріал – профільно-орієнтований (гофрований) картон. Наприклад, тришаровий гофрокартон складається з двох зовнішніх шарів плаского аркушевого картону та гофрованого шару між ними. Завдяки цьому він має високу міцність на стиск, стійкий до впливу ударних і вібраційних навантажень, вологи і жиру, може бути комбінованим з іншими матеріалами, його можна штабелювати [2].

Гофрокартон, що винайдений у XIX ст., широко застосовується у різних галузях, постійно виникають нові та вдосконалюються існуючі методи його використання. Одним з таких є процес утворення об'ємної форми або тари методом одночасного згинання клапанів розгортки з гофрованого картону. Для цього попередньо висічену розгортку з гофрованого картону встановлюють над «тунелем» з напрямними та інструментами, за допомогою пуансонів проштовхують у цей «тунель» [3]. В результаті згинання клапанів гофрованого картону утворюється пакування або тара зазвичай призматичної форми, готове до наповнення продукцією. Обладнання, що реалізує даний метод формування тари, має високий попит, воно високопродуктивне, має невеликі габарити і може бути встановлено як у приміщеннях, так і на складах.

**Аналіз останніх досліджень.** Явища у матеріалі і інструментах, що виникають під час одночасного згинання декількох площин (клапанів) такого складного матеріалу як гофрований картон, не були ґрунтовно досліджені до останнього часу. Конкурентна боротьба заважає фірмам-виробникам обладнання з Європи і США оприлюднювати

матеріали із визначення силових характеристик процесу утворення об'ємної форми (структури) картонних пакувань і тари. Відповідно, це ускладнює раціональний вибір конструкційних елементів та двигуна пристрою приводу інструментів (пуансонів).

Відомі поодинокі дослідження у цій царині, в основному у навчальних і наукових закладах скандинавських країн. Проведення всебічних ґрунтовних досліджень процесу допоможе виявити особливості, межі застосування матеріалів, раціональні форми інструментів, геометричні та кінематичні параметри привода.

Тому програма досліджень процесу згинання складного аркушевого матеріалу передбачає виявлення впливу головних факторів на якість отриманого згину та силові процеси під час утворення об'ємної структури. А саме: швидкість переміщення та закон руху (ЗПР) рухомих інструментів; відстань між рухомими і нерухомими інструментами у напрямку руху та їхніми боковими площинками; форми крайок згаданих інструментів; вплив напрямку волокон або гофри матеріалу, її кута до напрямку руху.

**Постановка завдання.** Для всебічного дослідження процесу згинання аркушевого матеріалу необхідно вивчити залежність енергосилових параметрів процесу від характеристик руху інструментів, привод яких здійснює кроковий двигун через ряд передач. Одним з головних аспектів виконання цього завдання є програмування руху валу крокового двигуна під час робочого і зворотного руху пуансонів з можливістю швидкої зміни закону руху, надання різних співвідношень і законів руху робочому та зворотному руху пуансонів.

**Виклад основного матеріалу.** У [2] вказано, що при важливості використання систем керування технологічними операціями механічна складова обладнання відіграє ключову роль. Тому попередньо було запропоновано та виконані аналітичні дослідження пристрою на основі механічного приводу з комбінованим кулачково-важільним механізмом.

Для перевірки відповідності отриманих математичних моделей і доповнення їх параметрами, що уточнюють результати обчислень з врахуванням матеріалу розгортки та умов її згинання, створено та удосконалений дослідний стенд [4], який імітує рух інструментів (формувальної колодки, пуансонів) від суто механічної системи. Фактично було досліджено працездатність прототипу пристрою на основі сервоприводу з програмною функцією «електронний кулачок».

Вимірювальний комплекс створеного дослідного стенда складається з тензометричної скоби, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та операційного підсилювача з програмованим коефіцієнтом підсилення (PGA — Programmable Gain Amplifier). Мікроконтролер зчитує та обробляє дані з АЦП, задає параметри роботи PGA із подальшою відправкою їх по цифровому інтерфейсу на зовнішній пристрій (персональний комп'ютер, планшет, смартфон, індикатор), де відображується процес роботи цифрового тензометричного датчика. Для відображення результатів в MS Excel створений макрос на мові VBA (Visual Basic for Applications) для кожної конкретної стадії дослідження згідно рекомендацій [5]. Попередньо створені програмні заготовки, які згодом редагувались для конкретного дослідження.

Загалом засоби керування двигуном привода та вимірювання зусиль об'єднані у окремий вузол, що складається з наступних елементів/модулів з врахуванням:

- драйверу крокового двигуна TB6560 (струм живлення 3А);
- мікроконтролеру Arduino Uno, що керує стендом;
- контролеру Arduino Nano з портом USB;
- аналого-цифровий перетворювач HX711;
- оптопара, через яку контролер задає початок роботи АЦП.

Тензометрична скоба перетворює величину деформації в електричний сигнал [6]. Обрано модель і характеристики тензометричної скоби (тензодатчика для ваг) YZC131 (рис. 1, а), призначену для вимірювання мас до 1кг. Технічні характеристики цього тензометричного датчика: імпеданс  $1000 \pm 50$  Ом; рекомендована напруга 5-10 В; розміри 80 12,7 12,7 мм; матеріал – алюміній; комплексна похибка 0,2% FS.

Перед проведенням кожної серії досліджень проводились тарування тензометричної скоби. Дані тарування записувались у програму мікроконтролера. Тарування проводилось наступним чином: один кінець датчика фіксувався нерухомо, а на інший кінець прикладалась відома сила тяжіння шляхом навантажень тягарців, а результати вимірювань заносились у таблицю.

Згідно схеми на рис. 1, б тензометрична скоба 1 приєднана до відповідних контактів АЦП 2 типу НХ711. Дані з АЦП 2 передаються мікроконтролером 3 згідно із протоколом передачі даних I2C (Inter-Integrated Circuit). До мікроконтролера 3 підключені, відповідно, контакти живлення GND і 5V та сигнальні контакти DT та SCK. Останні приєднані до контактів D5 та D4 мікроконтролера 3.

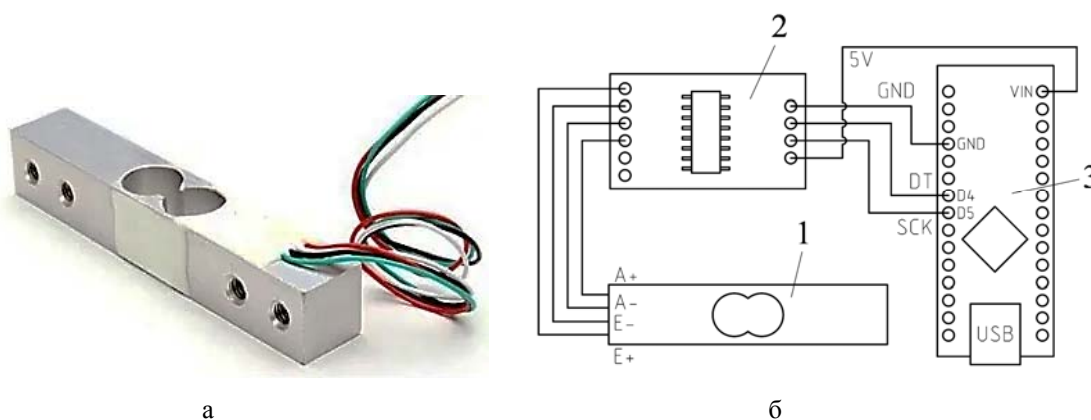


Рисунок 1 – Тензометричний датчик YZC131 (а) та вимірювальний модуль на основі АЦП НХ711 (б)  
Джерело: [6]

На рис. 2 показано світліну створеного вузла, що містить модулі керування двигуном та зчитування даних з тензометричної скоби, встановлених на задній стінці дослідного стенду.

Для програмування плати Arduino застосовувалось середовище Arduino IDE, як це розглянуто у [7, 8]. Середовище програмування Arduino складається з панелі меню, панелі інструментів, редактора скетчу, консолі та вікна повідомлень. Для завантаження програм і зв'язку середовище програмування підключається до апаратної частини Arduino.

Програми для Arduino пишуться на мові C++, доповненій простими і зрозумілими функціями для управління введенням/виведенням на контактах [9, 10].

Алгоритм програми для керування кроковим двигуном привода дослідного стенда представлений на рис. 3.

На початку здійснюється звернення до кінцевого датчика, щоб перевірити початкове положення каретки з інструментами (крок 1). У випадку необхідності корекції початкового положення  $S_0$  каретки включається двигун (крок 2). Двигун здійснює кроковий поворот валу (крок 3) до миті, доки не буде отримане підтвердження (крок 4) від кінцевого датчика про досягнення кареткою необхідного початкового положення  $S_0$ . Далі програма контролює положення кнопки включення (крок 5). У випадку її активації відбувається зчитування положень ручки вибору

режимів руху (крок 6) пульта керування стендом та табличних значень обраного ЗПР (рис. 4, б).

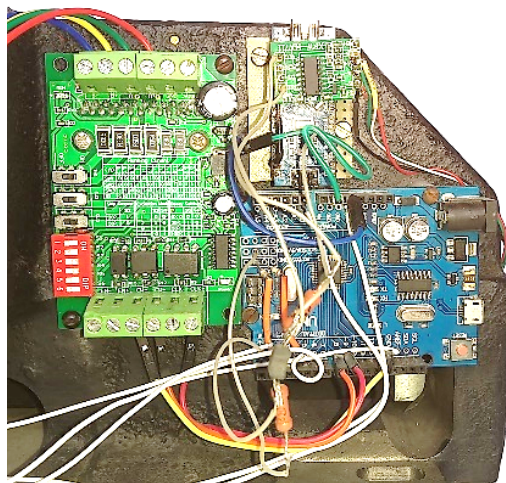


Рисунок 2 – Вузол з модулями керування двигуном та зчитування даних з тензOMETричної скоби, змонтований на дослідному стенді

*Джерело: розроблено авторами*

Двигун починає покроково відпрацьовувати три стадії прямого руху (крок 7) до миті, поки не буде виконано умову кроку 8 збігу поточного положення  $s_{np}$  каретки з пуансонами з крайнім положенням  $S_{max}$  їхнього переміщення у «тунель» між матрицями. Двигун зупиняється та починає відпрацьовувати кроки 9 і 10 трьох стадій руху у зворотному напрямку (реверсу), який здійснює покроково до досягнення умови кроку 10.

У кроці 11 здійснюється вимкнення двигуна від живлення для запобігання його перегріву. Привод переводиться у режим очікування і може бути активований повторним натиснення кнопки включення пульта керування стендом. Це дозволяє змінити умови руху каретки або повторити експеримент із попереднім набором параметрів.

Фрагменти програмного коду представлений далі на рис. 4. Програма керування кроковим двигуном дозволяє:

- запустити і вимкнути кроковий двигун;
- перевірити початкове положення  $S_0$  каретки з інструментами;
- встановити каретку з інструментами у положення початку руху;
- зчитати дані для подальшого руху згідно обраного режиму ЗПР з блоку табличних значень (рис. 4, б), величини робочого і зворотного ходів каретки з інструментами;
- керувати стадіями розгону, стабільного руху і гальмування для прямого руху каретки з інструментами;
- керувати стадіями розгону, стабільного руху і гальмування для зворотного руху каретки з інструментами;
- перейти у режим очікування дій користувача.

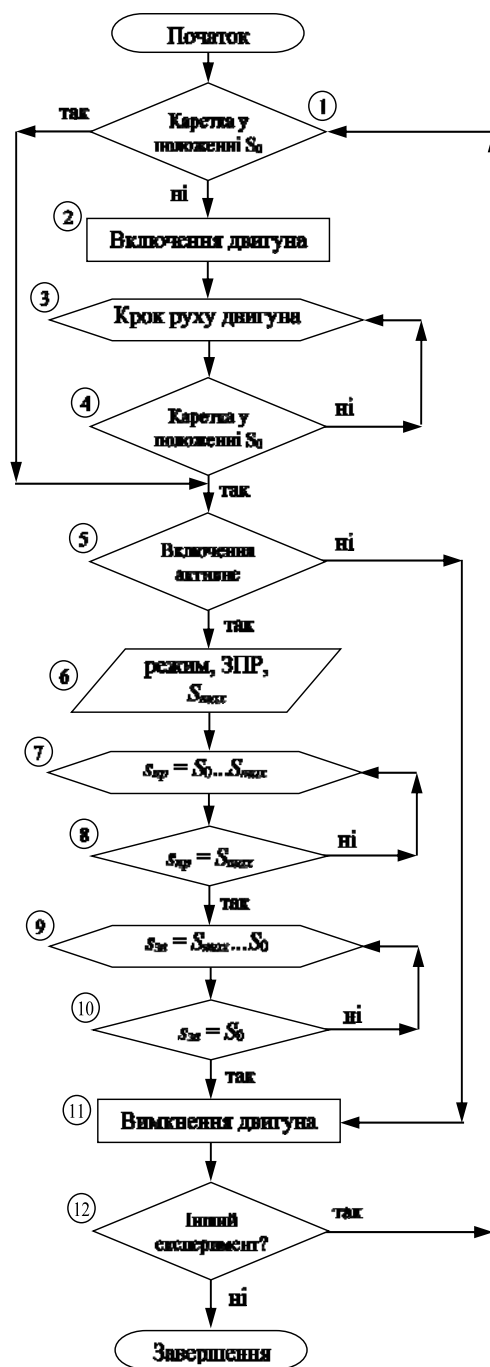


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму роботи програми керування кроковим двигуном привода дослідного стенда

Джерело: розроблено авторами

Розроблені вузол керування кроковим двигуном і вимірювання силових параметрів та програма, дозволили виконати декілька серій розширених експериментів [4]. Досліджено як рівномірний рух інструментів (пуансонів), так і рух за законами синусоїда (C0), косинусоїда (K0) та Шуна. Максимальна швидкість переміщення каретки з інструментами програмно задавалась від 40 до 120 мм/с (з можливістю збільшення до 150 мм/с). Максимальний повний робочий хід пуансонів був від 10 до 30 мм із можливістю зміни початкового положення відносно площини заготовки. Отримані параметри дозволили визначити раціональні режими одночасного згинання



## Список літератури

1. Шредер В.Л., Йованович К.С. Картон. Тара и упаковка. К. : ИАЦ «Упаковка», 1999. 192 с.
2. Регей І.І. Споживче картонне пакування. Матеріали, проектування, обладнання для виготовлення. Львів: УАД, 2011. 142 с.
3. Kolomiets A.B., Kotovskii O.O. Research of the cardboard tray and case volumetric forming process . *Theoretical foundations of modern science and practice*. Abstracts of XI International Scientific and Practical Conference. Melbourne, Australia. 2020. Pp.55-58. URL: <http://isg-konf.com> (дата звернення: 11.03.2023)
4. Kolomiets A.B., Kandiak N.M., Kotovskii O.O. Experimental stand for research of forming process of a printed carton packaging . *Поліграфічні, мультимедійні та веб-технології*: тези допов. IV Міжнародної науково-технічної конференції, 14-17 травня 2019р., м. Харків. Харків: «Друкарня Мадрид», 2019. Т1. С. 26-27.
5. Берндт Г., Каинка Б. Измерение, управление и регулирование с помощью макросов VBA в Word и Excel. К.: МК-Пресс; СПб: Корона-Век, 2008. 256 с.
6. Андреев А. Г., Львов Г. І., Щепкін О. В. Тензометрія: підручник. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. 232 с.
7. Candelas, F. A., García, G. J., Puente, S., Pomares, J., Jara, C. A., Pérez, J., Mira, D., & Torres, F. (2015). Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29), 105-110.
8. Blum J. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry, John Wiley & Sons, 2, 512 (2019). doi: 1119405378, 9781119405375.
9. An Arduino Investigation of Simple Harmonic Motion – The Physics Teacher 52, 157 (2014); <https://doi.org/10.1119/1.4865518>.
10. Maik Schmidt. Arduino: A Quick-Start Guide. *Pragmatic Bookshelf*, 2, 324 (2015). doi: 168050522X, 9781680505221.

## References

1. Shreder, V.L. & Yovanovych, K.S. (1999). *Karton. Tara y upakovka* [Cardboard. Container and packaging]. Kyiv : YATs «Upakovka» [in Ukrainian].
2. Rehei, I.I. (2011). *Spozhyvche kartonne pakovannia. Materialy, proektuvannia, obladnannia dlia vyhotovlennia* [Consumer cardboard packaging. Materials, design, manufacturing equipment]. Lviv: UAD [in Ukrainian].
3. Kolomiets, A.B. & Kotovskii, O.O. (2020). Research of the cardboard tray and case volumetric forming process. *Theoretical foundations of modern science and practice*: Abstracts of XI International Scientific and Practical Conference. Melbourne, Australia. (Pp.55-58). Retrieved from <http://isg-konf.com> [in English].
4. Kolomiets, A.B., Kandiak, N.M. & Kotovskii, O.O. (2019). Experimental stand for research of forming process of a printed carton packaging. *Printing, multimedia and web technologies*: IV Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsia (14-17 travnia 2019r., m. Kharkiv) – IV International Scientific and Technical Conference (Pp. 26-27). *Vol.1*. Kharkiv: «Drukarnia Madryd» [in English].
5. Berndt, H. & Kaynka, B. (2008). *Izmerenye, upravlenie y rehulyrovaniye s pomoshchuiu makrosov VBA v Word i Excel* [Measure, control and regulate with VBA macros in Word and Excel.]. Kiev: MK-Press; SPb: Korona-Vek [in Russian].
6. Andrieiev, A. H., Lvov, H. I. & Shchepkin, O. V. (2017). *Tenzometriia* [Tensometry]. Kharkiv : NTU «KhPI» [in Ukrainian].
7. Candelas, F. A., García, G. J., Puente, S., Pomares, J., Jara, C. A., Pérez, J., Mira, D., & Torres, F. (2015). Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29), 105-110 [in English].
8. Blum J. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry, John Wiley & Sons, 2, 512 (2019). doi: 1119405378, 9781119405375 [in English].
9. Calin Galeriu, Scott Edwards & Geoffrey Esper (2014). An Arduino Investigation of Simple Harmonic Motion . *The Physics Teacher*, 52, 157. <https://doi.org/10.1119/1.4865518> [in English].
10. Maik Schmidt. (2015). Arduino: A Quick-Start Guide. *Pragmatic Bookshelf*, 2, 324. doi: 168050522X, 9781680505221 [in English].

**Nazar Kandiak**, Assoc. Prof., PhD, **Andrii Kolomiets**, Assoc. Prof., PhD, **Ostap Kotovskii**, post-graduate  
*Ukrainian Academy of Printing, L'viv, Ukraine*

### **Means of Controlling a Stepper Motor and Measuring Forces During the Study of the Folding Process of Sheet Material**

The improvement of the equipment for the forming of the volumetric shape of packages and containers requires a detailed study of the phenomena in the folding process of sheet material with a complex structure (corrugated cardboard). A stand has been created to study process parameters, successful research on which should be provided by programmed control of tool movement and synchronous transfer of measured data to a computer for further processing.

Moving tools (punches) are driven by a stepper motor. The movement of the stepper motor shaft is programmed to obtain both a uniform movement and movement according to a certain law, which can be different for the working and reverse moves. Forces are measured by a strain gauge clamp, the signal from which is also transmitted to external devices for visualization and processing. The basis of the motor control and measurement unit is the Arduino Uno microcontroller, which, together with the Arduino Nano controller and the analog-to-digital converter, significantly expands the functionality of the stand. The diagram and operation of the created control and measurement unit is described. A special program has been created to study the geometric, kinematic and power parameters of the process, the possibility of quickly changing the law of motion, providing various ratios and laws of motion to the working and reverse motion of punches. The laws of motion for the motor shaft are presented in it in the form of matrices of values, which are accessed before starting the measurement from the stand control panel. The parameters of the process of simultaneous folding of corrugated cardboard, which were investigated using a stand, are described.

The developed measurement technique and means of controlling the movement of the stepper motor of the tool drive allowed to estimate the maximum effort, the nature of the change during the work cycle, to compare different types of material and folding modes. The result of determining the optimal parameters of the process of operational packaging & container formation is the creation of recommendations necessary for the design of modern energy-saving equipment.

**programming, stand, stepper motor, driver, control, law of motion, measurement**

*Одержано (Received) 23.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 29.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*



## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 691.615.1

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.45-55](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.45-55)

Г.Д. Портнов, доц., канд. техн. наук, В.В. Дарієнко, доц., канд. техн. наук,  
В.В. Пукалов, доц., канд. техн. наук

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
e-mail: budkom999@gmail.com

### Вибір параметрів ущільнення макета конструкції з ЛИСТОВИМ СКЛОМ

В роботі представлена методика обґрунтування вибору параметрів світлопрозорої конструкції, що включає прямокутну скляну пластину, пружне ущільнення та жорсткі рамки на основі дослідження моделі в середовищі ПК SOLIDWORKS. Показано, що параметри закріплення листового скла, включаючи характеристики ущільнення суттєво впливають на механічні властивості конструкції. Розроблена модель дозволяє оцінити напружено-деформований стан листового скла та динамічні властивості конструкції залежно від параметрів пружного ущільнення.

**листова скло, пружне ущільнення, 3D моделювання, критерії руйнування, напруження Мора – Кулона, модальний аналіз**

**Постановка проблеми.** Конструкції з листового скла включають пристрої закріплення з елементами ущільнення. Розрахунки таких конструкцій пов'язані зі значними труднощами математичного характеру, зумовленими як особливостями матеріалів, так і відсутністю математичних моделей закріплення скляних пластин в реальних умовах.

Випробування макетів конструкцій з підбором параметрів є витратними у зв'язку зі статистичною неоднорідністю механічних характеристик скла.

Для попереднього вибору основних параметрів знов розробленої конструкції доцільно використання розрахункових програмних комплексів [1].

Необхідна розробка методики використання розрахункових програмних комплексів для попереднього обрання конструкції закріплення листа скла з врахуванням основних параметрів ущільнення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розрахунки листового скла проводяться виходячи з уявлення скляного елемента як гнучкої пластинки, що працює на поперечний згин з великим прогином [3, 5, 6].

Деформація скляної пластини під впливом механічного навантаження носить нелінійний характер [10, 12, 15].

Спосіб закріплення пластини істотно впливає на характер і величину зусиль і деформацій, що виникають у ній [8, 9].

Теоретично розрізняють такі основні види закріплення пластини.

1. Шарнірне спирання пластини. Виключаються лінійні зміщення опорної кромки в серединній площині та в перпендикулярному до неї напрямку. Допускається поворот опертої зони пластини навколо осі, що збігається з лінією опорного контуру.

2. Вільне спирання. Виключається переміщення кромки пластини в напрямку перпендикулярному до серединній площини. Допускаються усунення в серединній площині і поворот опертої зони пластини навколо осей, що збігаються з опорною лінією.

3. Жорстке закріплення. Виключаються кутові та лінійні переміщення закріплених кромки.

Зазвичай листове скло кріплять до конструктивних елементів по чотирьох сторонах металевими опорними планками через гумові ущільнювальні прокладки. При теоретичних дослідженнях таке кріплення можна розглядати як спірання пластинки по чотирьох сторонах з частковим затисканням, що є комбінацією основних видів закріплення.

Питанням розрахунку пружно-защемлених опор тонкостінних елементів конструкцій та їх застосуванням присвячені роботи [4, 6, 8, 9].

Характер напруженого стану пластини залежить в основному від виду навантаження та характеру його розподілу, відношення довгої та короткої сторони до товщини листового скла, а також параметрів защемлення: характеру зв'язків, що утворюють опори та механічних властивостей матеріалів пластини та супорту [14, 15].

Оцінка напружено-деформованого стану конструкції ведеться за критеріями міцності, жорсткості та на підставі дослідження динамічних характеристик.

Розрахунки зводяться до обґрунтування вибору конструктивних параметрів листового скла, супорта та матеріалу гумового ущільнення.

Вибір параметрів конструкції ведеться з урахуванням напружено-деформованого стану конструкції, експлуатаційних, конструктивних (архітектурних) вимог та економічних показників.

У нормативній документації на листове скло відсутні чіткі вимоги щодо властивостей міцності, в ній наводяться тільки довідкові величини.

Основним методом визначення властивостей міцності листового скла є експериментальний, заснований на випробуванні дослідних зразків.

В даний час більшість дослідників вважають, що руйнування відбувається внаслідок досягнення в склі граничних значень напружень, що розтягують [14, 18].

Умови міцності:

$$\sigma_1 \leq \frac{[\sigma_1]}{k_1}, \quad (1)$$

де  $\sigma_1$  – максимальне нормальне напруження,

$[\sigma_1]$  – значення руйнівного максимального нормального напруження, отриманого при натурних випробуваннях,

$k_1$  – коефіцієнт запасу міцності.

У той же час зазначається, що скляна пластина при випробуванні знаходиться в складному напруженому стані і руйнування відбувається при досягненні граничних значень еквівалентних напружень [12, 18]. Для крихких матеріалів з різними властивостями розтягування та стиску в таких випадках використовується критерій напруження Мора-Кулона [11, 12].

Умови міцності:

$$\sigma_{FOS} \leq \frac{[\sigma_{FOS}]}{k_{FOS}}, \quad (2)$$

де  $\sigma_{FOS}$  – напруження Мора - Кулона,

$[\sigma_{FOS}]$  – значення руйнівного напруження Мора - Кулона, отриманого при натурних випробуваннях,

$k_{FOS}$  – коефіцієнт запасу міцності.

Важливим є питання локалізації максимальних напружень, пов'язаного з прогнозуванням характеру руйнації конструкції.

Експериментальні дослідження показують, що максимальне напруження може виникати як у кутових, так і середніх зонах пластинок з листового скла [8, 16, 18].

Допустима деформація конструкції регламентується галузевими стандартами.

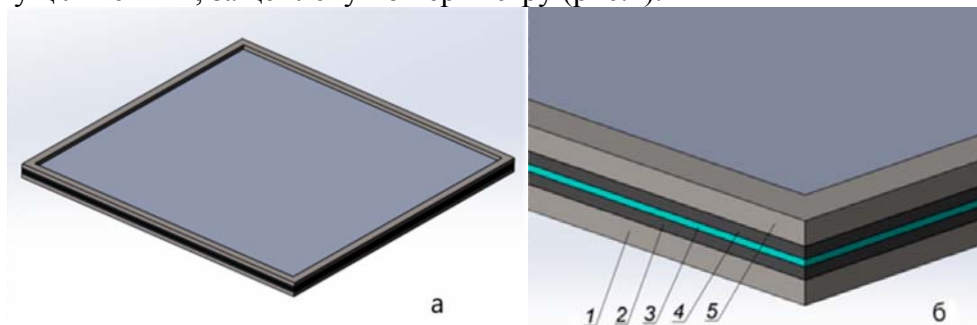
Необхідність розрахунку власних частот і відповідних їм форм коливань виникає під час аналізу динамічної поведінки конструкції під впливом змінних навантажень. Перевірка спектральних властивостей конструкції в робочому діапазоні частот зовнішніх впливів на стадії проектування дозволяє зменшити ймовірність появи резонансів у процесі експлуатації [2].

Теоретичне дослідження напружень та деформацій зводиться до розв'язання крайових задач для диференціальних рівнянь четвертого порядку вигнутої поверхні пластины. Рішення в аналітичній формі можливе лише в окремих випадках геометричного виду пластины та умов її закріплення на опорах [3, 5, 7].

Достовірні результати можуть бути отримані лише на підставі випробувань натурних варіантів конструкції. Для прямокутних пластин є виправданим використання розрахункових програмних комплексів для попереднього вибору параметрів натурального зразка за результатами дослідження моделі конструкції [13].

**Постановка завдання.** На прикладі конкретної конструкції розробити методику вибору основних параметрів гумового ущільнення конструкції з листового скла.

**Виклад основного матеріалу.** У цій роботі представлена методика дослідження в ПК SOLIDWORKS моделі конструкції, що включає прямокутну скляну пластину з гумовим ущільненням, защемлену по периметру (рис.1).



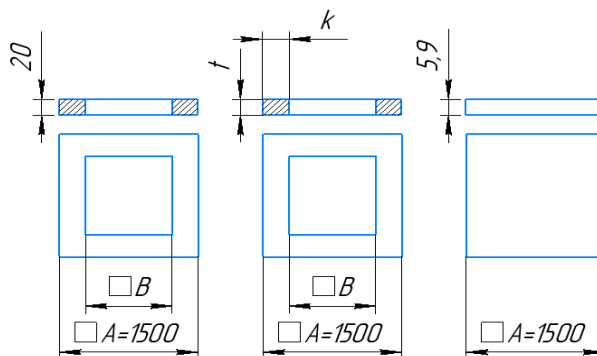
а – загальний вигляд; б – деталізація

1 – нижня рама; 2, 4 – гумова прокладка; 3 – лист скла; 5 – верхня рама

Рисунок 1 – Модель стенда для випробування листового скла рівномірно розподіленим навантаженням  
Джерело: розроблено авторами.

Методика дослідження містить наступні етапи: побудова моделі конструкції з урахуванням граничних умов закріплення пластины засобами SOLIDWORKS; нелінійний статичний аналіз і частотний аналіз моделі (виконуються в модулі SOLIDWORKS Simulation); зіставлення отриманих показників з вимогами технічного завдання на проектування конструкції; вибір матеріалу і геометричних параметрів ущільнення.

Розміри деталей моделі показані на рис.2.



а – нижня (верхня) рама; б – ущільнення; с – скляна пластина

Рисунок 2 – Ескізи деталей моделі

Джерело: розроблено авторами

Змінні параметри: розміри прямокутного поперечного перерізу стрічки ущільнення: ширини  $k$  і товщини  $t$ , а також його механічні характеристики.

Визначалися: максимальне нормальне напруження, максимальне напруження Мора - Кулону, локалізація їх значень відносно поверхні скляної пластини, максимальне переміщення вузла пластини, частоти власних коливань конструкції із площини пластини.

Зовнішнє навантаження – статичний тиск на поверхню пластини  $p = 25,6$  МПа.

Розміри скляної пластини та параметри зовнішнього навантаження обрані відповідно результатів натурних випробувань скляних пластин [18, 19].

Механічні характеристики матеріалу скляної пластини: модуль пружності

$$E_g = 70000 \text{ МПа}; \text{ коефіцієнт Пуассона } \mu_g = 0,2; \text{ масова щільність } \gamma_g = 2500 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} [12].$$

Вибір варіантів матеріалів гумового ущільнення, для дослідження, здійснювався з наступних міркувань.

1. Модуль пружності більшості марок гумових сумішей, що використовуються для ущільнення нерухомих з'єднань знаходиться в межах  $E_p = 2 \dots 6$  МПа [10].

2. Відносне стиснення гумової суміші різних сортів від 40 до 50%, тобто допустиме напруження стиснення ущільнення  $\sigma_{cp} \leq \frac{E_p}{2}$ ,

3. При стисканні обсяг гуми не змінюється: її коефіцієнт Пуассона становить  $\mu_g = 0,49$ .

$$4. \text{ Масова щільність } \gamma_r = 1280 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}.$$

Дослідження моделі (нелінійний статичний, частотний аналізи) виконані в модулі SOLIDWORKS Simulation за наступними налаштуваннями:

1. Тип дослідження: нелінійне статичне.

1.1 Часовий інкремент: «автоматично».

Параметри нелінійності: «використовувати склад для великого зсуву»; «параметр великої деформації» включений.

Обрання програми, що вирішує: «автоматично».

1.2 Деталі: рама – жорстке тіло; скляна пластина і гумова прокладка – такі, що деформуються.

1.3 Взаємодія компонентів: «глобальна» (В конструкції передбачається застосування клейової суміші).

1.4 Кріплення: «зафіксована геометрія» рам (рис.3)

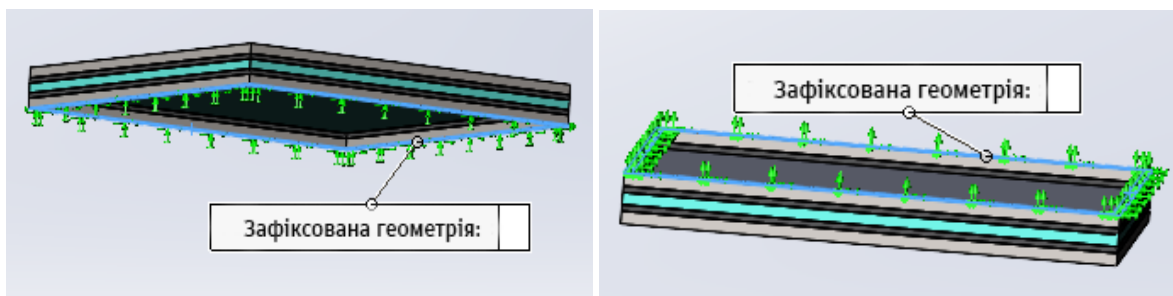


Рисунок 3 – Кріплення рам

Джерело: розроблено авторами

1.5 Зовнішнє навантаження: тиск на верхню поверхню скла за межами гумової прокладки (рис.4).

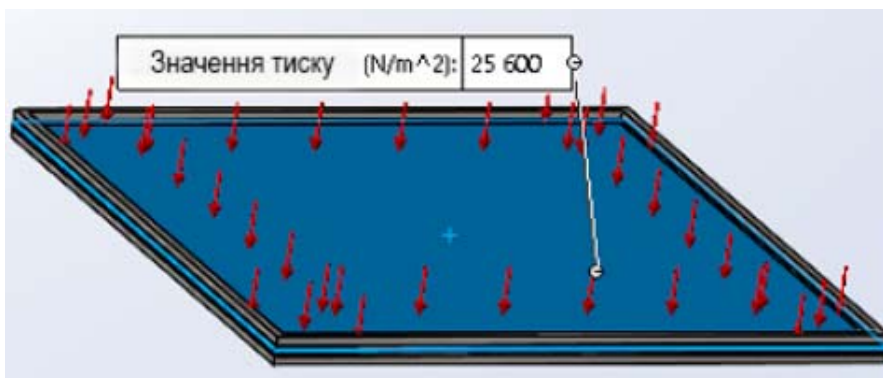


Рисунок 4 – Зовнішнє навантаження на скляну пластину

Джерело: розроблено авторами

1.6 Сітка: на основі змішаної кривизни.

2. Частотний аналіз.

2.1 Обрання програми, що вирішує: «автоматично».

2.2 Взаємодія компонентів: «глобальна».

2.3 Кріплення рам: «закріплена геометрія» (рис. 3).

2.2 Обрання навантаження: не враховувалося (враховується за необхідністю).

Нижче наведено послідовність попереднього вибору параметрів конструкції на основі дослідження моделі.

Графіки, що характеризують напружено – деформований стан (ПДВ) скляної пластини, побудовані для різних значень конструктивного параметра  $s$ , що характеризує ступінь використання світлопрозорої частини конструкції.

$$s = \frac{S_g - S_i}{S_g} \times 100[\%], \quad (3)$$

де  $S_g = A^2$  – загальна площа скляної пластини (рис.2);

$S_i = B^2$  – площа світлопрозорої частини конструкції.

1. Залежність максимального нормального напруження  $\sigma_1$  та напруження Мора – Кулона  $\sigma_{FOS}$ , а також максимального переміщення  $f$  у скляній пластині від товщини ущільнення  $t$  при різних значеннях параметра  $s$  для гумових сумішей з різними значеннями модуля пружності  $E_r$  представлена на рис. 5, 6 7.

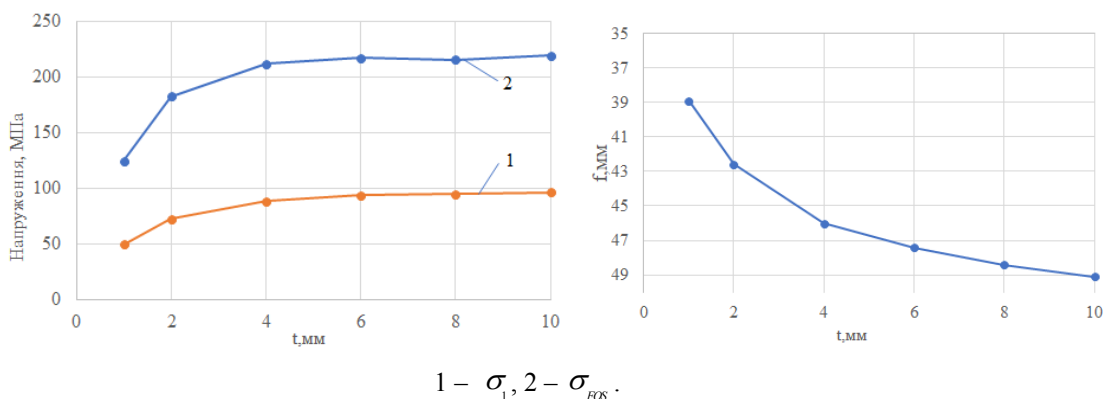


Рисунок 5 – НДС пластини при  $s = 2\%$ ;  $E_r = 6 \text{ МПа}$

Джерело: розроблено авторами

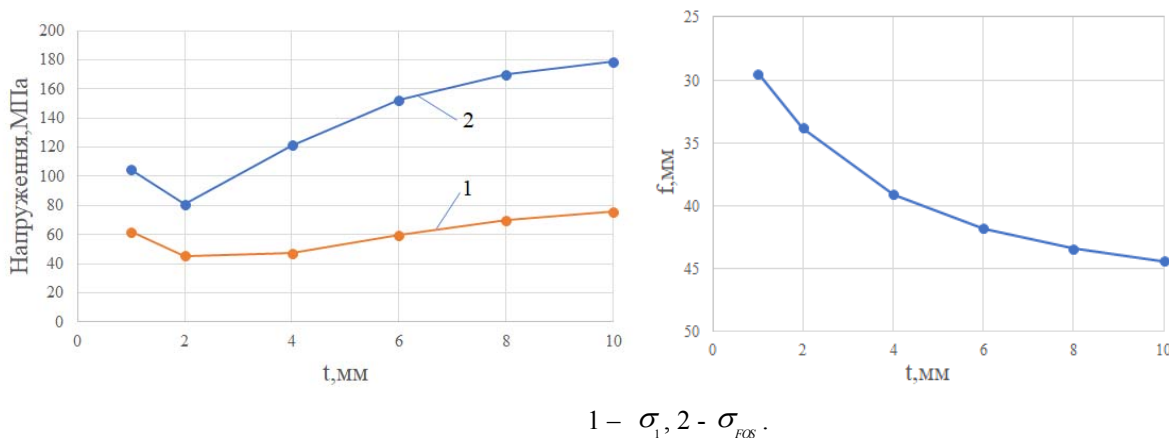


Рисунок 6 – НДС пластини при  $s = 4\%$ ;  $E_r = 6 \text{ МПа}$

Джерело: розроблено авторами

На НДС скляної пластини істотно впливають геометричні та механічні параметри ущільнення.

Напруження  $\sigma_1$  та  $\sigma_{FOS}$  корелюють за параметром  $t$ . Ступінь кореляції залежить від пружності ущільнення.

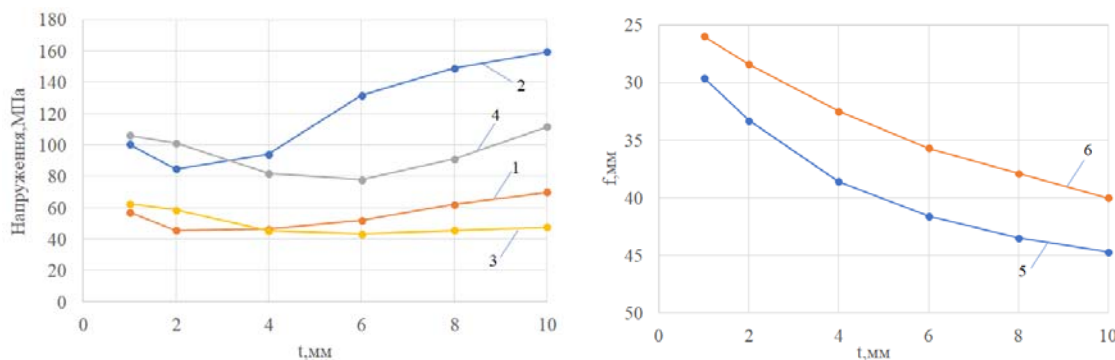


Рисунок 7 – НДС пластини при  $s = 6\%$ ;

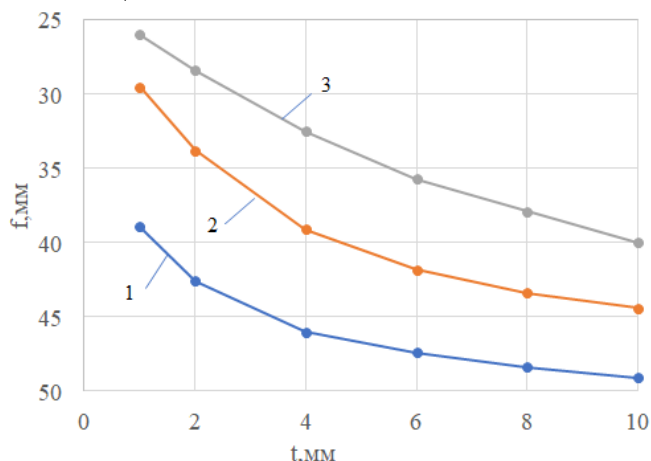
1 –  $\sigma_1, E_r = 2 \text{ МПа}$ ; 2 –  $\sigma_{FOS}, E_r = 2 \text{ МПа}$ ; 3 –  $\sigma_1, E_r = 6 \text{ МПа}$ ;

4 –  $\sigma_{FOS}, E_r = 6 \text{ МПа}$ ; 5 –  $E_r = 2 \text{ МПа}$ ; 6 –  $E_r = 6 \text{ МПа}$

Джерело: розроблено авторами

При малих значеннях товщини  $t \sim 2$  мм відбувається неприпустиме зминання країв ущільнення (стрибокподібна зміна напружень). Зі збільшенням  $t > 2$  мм напруження суттєво (до 40%) збільшуються (ламані криві 1, 2 рис.5, 6). Поведінка ламаних кривих 3, 4 (рис.7) ймовірно, обумовлена підвищеним впливом поперечної жорсткості перерізу ущільнення за умови глобального контакту поверхонь.

На рис.8 представлені залежності максимального переміщення  $f$  вузла пластини від товщини ущільнення  $t$  при  $E_r = 6$  МПа.

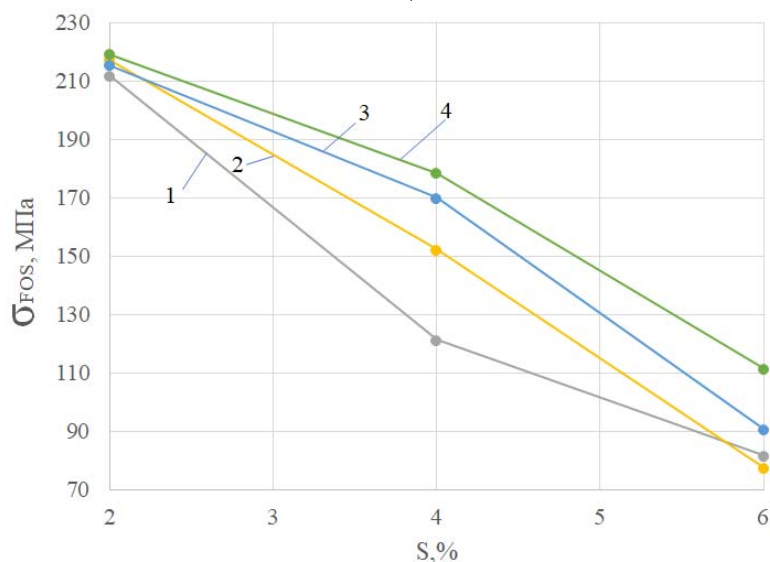


1 – s = 2%; 2 – s = 4%; 3 – s = 6%

Рисунок 8 – Залежність максимального переміщення  $f$  вузла пластини від товщини  $t$  ущільнення.  
Джерело: розроблено авторами

Більша жорсткість ущільнення зумовлює менші переміщення.

На рис.9 представлені дані залежності максимального напруження  $\sigma_{FOS}$ , що виникає у скляній пластині при різних значеннях ширини та товщини перерізу ущільнення з модулем пружності матеріалу  $E_r = 6$  МПа.



1 – t = 4мм; 2 – t = 6мм; 3 – t = 8мм; 4 – t = 10мм

Рисунок 9 – Максимальні значення напруження  $\sigma_{FOS}$  в пластині

Джерело: розроблено авторами

Найменші значення напруження виникають при більших значеннях  $s$ . Перспективним є розгляд ламаних кривих 1 і 2 для  $s = 4 \dots 6\%$ .

Локалізація максимальних значень напружень  $\sigma_1$  та  $\sigma_{FOS}$  у цих випадках різна (рис.10).

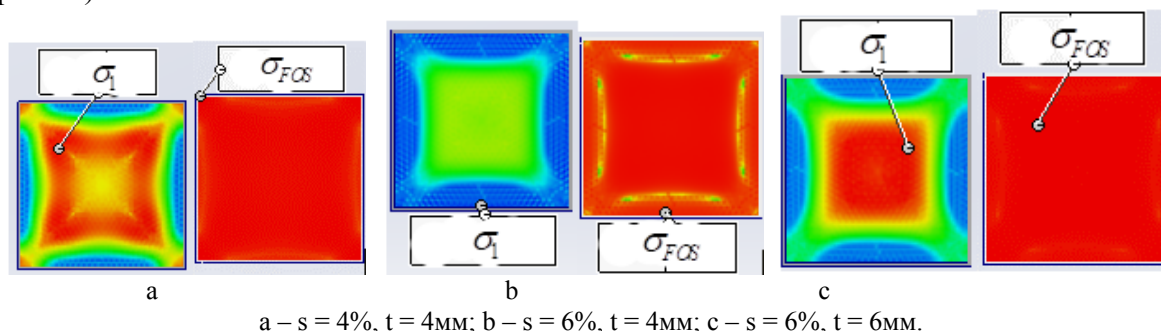
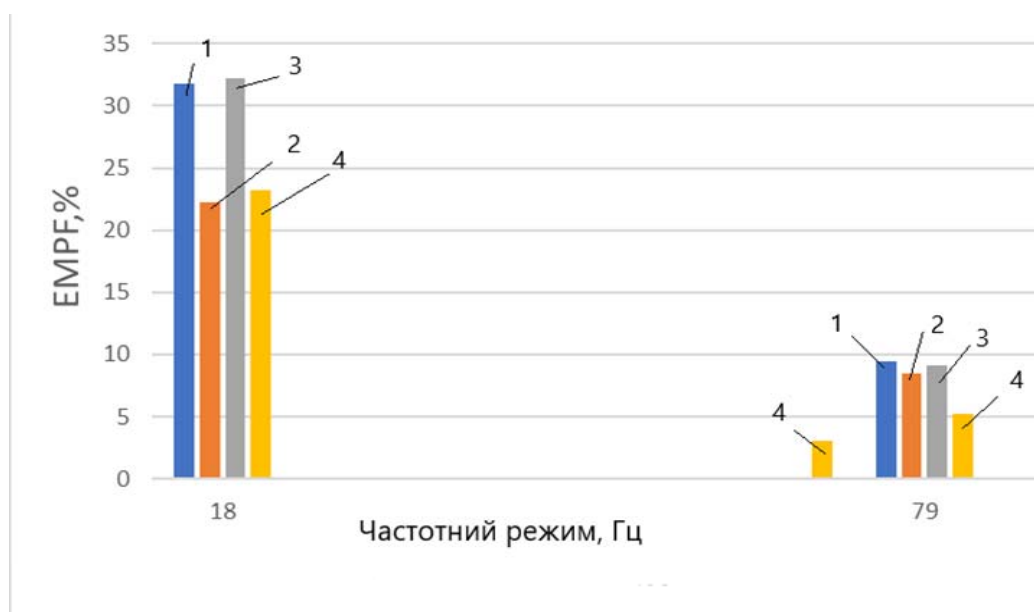


Рисунок 10 – Локалізація максимальних значень напружень  $\sigma_1$  та  $\sigma_{FOS}$

Джерело: розроблено авторами

2. Аналіз динамічної поведінки конструкції під впливом змінних навантажень показує частоти, у яких можливе виникнення резонансу.

На рис. 11 представлена гістограма масової участі нижніх десяти власних частот у коливальному процесі.



1 –  $s = 4\%$ ,  $t = 4\text{мм}$ ; 2 –  $s = 4\%$ ,  $t = 6\text{мм}$ ; 3 –  $s = 6\%$ ,  $t = 4\text{мм}$ ; 4 –  $s = 6\%$ ,  $t = 6\text{мм}$ .

Рисунок 11 – Гістограма масової участі обчислених мод

Джерело: розроблено авторами

Власні частоти конструкції повинні лежати поза діапазону частот зовнішніх впливів [16]:

$$f_i \notin [k_l f_{\min}^v, k_h f_{\max}^v], \tag{4}$$

де  $f_i$  -  $i$ -я – власна частота конструкції;

$f_{\min}^v, f_{\max}^v$  – нижня та верхня частота діапазону зовнішніх вібраційних впливів;



$k_l, k_h$  – коефіцієнти, прийняті в галузевих стандартах.

Для ущільнення параметрами  $s = 4\%$ ,  $t = 4\text{мм}$ ;  $E_r = 6\text{МПа}$  при  $k_l = 0,7$ ,  $k_h = 1,3$  для нижчих п'яти мод небезпечними є зовнішні вібраційні дії з частотою в діапазоні  $f_{\min}^v \geq 12,6\text{Гц}$ ;  $f_{\max}^v \leq 23,4\text{Гц}$ .

### Висновки:

1. Розроблена у середовищі SOLIDWORKS модель дозволяє оцінити напружено-деформований стан листового скла та динамічні властивості конструкції залежно від параметрів пружного ущільнення.

2. Параметри ущільнення суттєво впливають на механічні властивості конструкції.

3. Представлена методика дослідження дозволяє виробити рекомендації щодо вибору параметрів ущільнення макета конструкції з листовим склом з урахуванням оцінки граничних станів та конструктивних вимог.

### Список літератури

1. Баженов В. А., Перельмутер А. В., Шишов О. В. Будівельна механіка. Комп'ютерні технології : Київ : Каравела, 2009. 696 с.
2. Геворгян Г. З. Об изгибных колебаниях ортотропных полос переменной толщины с учётом поперечных эффектов при условиях упругой заделки. *Актуальные проблемы механики сплошной среды: труды IV междунар. конф.*, 21-26 сентября 2015 г., Цахкадзор, Армения, 2015. С. 129-133.
3. Визначення фізико-механічних властивостей скла на згин за допомогою двопараметричного розподілу Вейбулла / Демчина Б., Сурмай С., Ткач Р., Гула В. *Будівельні конструкції. Теорія і практика.* : зб. наук. праць. 2020. № 6. С. 94-113.
4. Киракосян Р. М. Упруго-зашемленна опора для осесимметрично изгибаемых круглых пластин. *Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред: труды VIII международной конференции, 22-26 сентября 2014г.*, Горис- Степанакерт, 2014. С. 261-265.
5. Киракосян Р. М. Об одной неклассической задаче изгиба упруго-зашемленной круглой пластинки. *Докл. НАН Армении.* 2015. Т.115. №4. С. 284-289.
6. Киракосян Р. М., Степанян С. П. Неклассическая задача изгиба ортотропной балки переменной толщины с упруго-зашемленной опорой. *Докл. НАН Армении.* 2014. Т.114. № 3. С. 205-212.
7. Киракосян Р. М., Степанян С. П. Устойчивость стержня при наличии упруго-зашемленной опоры. *Докл. НАН Армении.* 2014. Т.114. № 4. С. 309-315.
8. Kirakosyan M. Non-Classical Problem of a Bend Orthotropic Beams with the Elastic Clamped Support. *NAS RA Reports*, 2014. Volume 114. № 2. P. 101-107.
9. И. Киракосян Р. М., Степанян С. П. Задача изгиба упруго-зашемленной ортотропной круглой пластинки, опирающейся на упругом основании. *Докл. НАН Армении.* 2016. Т.116. №2. С. 120-127.
10. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: Справочник / А. А. Лебедев и др. Изд. 3-е изд., перераб. и доп.. К. : Издат. дом «Ин Юре», 2003. 539 с.
11. Писаренко Г. С. Избранные труды ; отв. ред. В. Т. Трощенко. Киев: Наук. думка, 2010. 727с.
12. Портнов Г. Д., Дарієнко В. В., Пукалов В. В. Модель стнда для дослідження конструкцій з листового скла. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* 2022. Вип. 6(37). С.331-343.
13. Родичев Ю. М. Конструкционная прочность хрупких неметаллических материалов. *Прочность материалов и конструкций* ; под ред. В. Т. Трощенко. Киев : Академперіодика, 2005. С. 955-992.
14. Родичев Ю. Оценка локальной прочности и повреждаемости хрупких материалов по параметрам статистического распределения экспериментальных данных. *Вісник Тернопільського національного технічного університету.* 2013. № 4. С. 161-173
15. Степанян С. П. Неклассическая задача изгиба балки линейно-переменной толщины при наличии упруго-зашемленной опоры. *Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред: труды VIII международной конференции, 22-26 сентября 2014 г.*, Горис-Степанакерт, 2014. С. 408-412.
16. Чихладзе Е. Д. Будівельна механіка : підручник. Харків : УкрДАЗТ, 2011. 320 с.
17. Razmik M. Kirakosyan, Seyran P. Stepanyan. On a Model of Elastic Clamped Support of Plate-Strip. *International scientific Journal, Modeling of Artificial Intelligence.* 2015. Vol.6. Is. 2, P. 67-74.

18. Zubkov V. Kondratieva N. Characteristics of calculation of flat glass in translucent structures. *Glass performance days 2008. Conference Proceedings*. New Delhi (India), 2008, December. P. 27-29.
19. Zubkov V. Kondratieva N. Flat glass strength in façade systems coverings and floorings of buildings and structures. *Glass. Façade. Energy*. Dusseldorf (Germany), 2010. P. 63-70.

## References

1. Bazhenov V.A., Perelmutter A.V & Shyshov O.V. (2009). *Budivelna mekhanika. Kompiuterni tekhnologii [Construction mechanics. Computer Technology]*. Kyiv : Karavela [in Ukrainian].
2. Gevorgyan, G. Z. (2015). Ob izgibnyh kolebaniyah ortotropnyh polos peremennoj tolshchiny s uchyotom poperechnykh effektov pri usloviyah uprugoj zadelki. [On bending vibrations of orthotropic strips of variable thickness with consideration of transverse effects under the conditions of elastic sealing]. *Actual problems of the mechanics of the continuous medium: IV Mezhdunarodna konferencia (21-26 sentjabrja 2015 g) – IV International Conference* (P. 129-133). Cahkadzor, Armeniya [in Russian].
3. Demchyna, B., Surmai, S., Tkach, R. & Hula, V (2020). Vyznachennia fizyko-mekhanichnykh vlastyivostei skla na zghyn za dopomohoiu dvoparametrychnoho rozpodilu Veibulla [Determination of the physical and mechanical properties of glass for bending using the two-parameter Weibull distribution]. *Book of Sciences, prats Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka- Collection of sciences, works Building constructions. Theory and practice, Vol. 6*, 94-113 [in Ukrainian].
4. Kirakosyan, P.M. (2014). Uprugo-zashchemlyonnaya opora dlya osesimmetrichno izgibaemykh kruglykh plastin [Elastic-clamped support for axisymmetrically bent round plates.]. *Problems of the dynamics of the interaction of deformable media: VIII Mezhdunarodna konferencia (22-26 sentjabrja 2014g.) - VIII International Conference* (P. 261-265). Goris- Stepanakert [in Russian].
5. Kirakosyan, P.M. (2015). Ob odnoj neklassicheskoy zadache izgiba uprugozashchemlyonnoy krugloj plastinki [On one non-classical problem of bending an elastically pinched circular plate] . *Dokl. NAN Armenii- NAS Armenia report, Vol.115, 4*, 284-289 [in Russian].
6. Kirakosyan, P.M. & Stepanyan, S.P. (2014). Neklassicheskaya zadacha izgiba ortotropnoj balki peremennoj tolshchiny s uprugozashchemlyonnoy oporoy [The non-classical problem of bending an orthotropic beam of variable thickness with an elastically clamped support]. *Dokl. NAN Armenii- NAS Armenia report, Vol. 114, №3*, 205-212 [in Russian].
7. Kirakosyan, P.M. & Stepanyan, S.P. (2014). Ustojchivost' sterzhnya pri nalichii uprugozashchemlyonnoy opory [Stability of the rod in the presence of an elastically pinched support]. *Dokl. NAN Armenii- NAS Armenia report, Vol. 114, № 4*, 309-315 [in Russian].
8. Kirakosyan, M. (2014). Non-Classical Problem of a Bend Orthotropic Beams with the Elastic Clamped Support. *NAS Armenia reports, Vol. 114, № 2*, P. 101-107 [in English].
9. I. Kirakosyan R. M. & Stepanyan S. P. (2016). Zadacha izgiba uprugozashchemlyonnoy ortotropnoj krugloj plastinki, opirayushcheysya na uprugom osnovanii [The problem of bending an elastically pinched orthotropic circular plate resting on an elastic base]. *Dokl. NAN Armenii- NAS Armenia report, Vol.116. № 2*, 120-127 [in Russian].
10. Lebedev, A.A., Koval'chuk, B.I., Giginyak, F.F. et al. (2003). *Mechanical properties of structural materials under complex stress*. (3d ed.) . Kiev: Izdat. dom «In Jure» [in Russian].
11. Pisarenko, G.S. (2010). *Izbrannye Trudy [Selected works]*. Kiev: Nauk. dumka [in Russian].
12. Portnov, H.D., Darienko, V.V. & Pukalov, V.V. (2022). Model stenda dlia doslidzhennia konstruksii z lystovoho skla [A model of a stand for the study of structures made of sheet glass]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky- Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences, Vol. 6 (37)*, 331-343 [in Ukrainian].
13. Rodychev, Yu.M. (2005). *Konstruksyonnaia prochnost khrupkykh nemetallycheskykh materyalov. Prochnost materyalov y konstruksii [Structural strength of brittle non-metallic materials. Durability of materials and structures]*. Kyev : Akadempyodyka [in Russian].
14. Rodichev, Yu. (2013). Ocenka lokal'noj prochnosti i povrezhdaemosti hrupkih materialov po parametram statisticheskogo raspredeleniya eksperimental'nyh dannyh [Evaluation of the local strength and damage of brittle materials according to the parameters of the statistical distribution of experimental data]. *Visnik Ternopil'skogo nacional'nogo tekhnichnogo universitetu – Bulletin of the Ternopil National Technical University, Vol. 4*, 161-173 [in Russian].
15. Stepanyan, S.P. (2014). Neklassicheskaya zadacha izgiba balki linejno-peremennoj tolshchiny pri nalichii uprugozashchemlyonnoy opory [The non-classical problem of bending a beam of linear-variable thickness in the presence of an elastically pinched support.]. *Problems of the dynamics of the interaction of deformable media: VIII Mezhdunarodnoj Konferencii (22-26 sentjabrja 2014 g) – VIII International Conference* (P. 408-412). Goris-Stepanakert [in Russian].

16. Chykhladze, E.D. (2011). *Budivelna mekhanika [Construction mechanics]* : Kharkiv : UkrDAZT, [in Ukrainian].
17. Razmik, M. Kirakosyan, Seyran P. Stepanyan. (2015). On a Model of Elastic Clamped Support of Plate-Strip. *International scientific Journal, Modeling of Artificial Intelligence, Vol.6, Issue 2*, P. 67-74 [in English].
18. Zubkov, V. & Kondratieva, N. (2008). Characteristics of calculation of flat glass in translucent structures. *Glass performance days 2008. Conference Proceedings*. New Delhi (India). P. 27-29. [in English].
19. Zubkov, V. & Kondratieva, N. (2010) Flat glass strength in façade systems coverings and floorings of buildings and structures. *Glass. Façade. Energy*. Dusseldorf (Germany). P. 63-70. [in English].

**Hennadii Portnov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Dariienko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pukalov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Selection of Sealing Parameters of the Structure Layout With Sheet Glass**

Sheet glass is used in the creation of transparent constructions of building structures, for glazing of airplanes, helicopters, boats, as a structural material for instrument and aggregate construction, production of technical products in mechanical engineering. Structures made of sheet glass include fastening devices with sealing elements. Calculations of such structures cause difficulties, which are associated with the imperfection of their mathematical models.

For the preliminary selection of the main parameters of the newly developed structures, it is advisable to use calculation software complexes with the preliminary development of the method of choosing the structure of fixing the glass sheet, taking into account the main sealing parameters according to the results of the study of the structure model. The nature of the stress state of the plate depends mainly on the type of load and the nature of its distribution, the ratio of the long and short sides to the thickness of the sheet glass, as well as the clamping parameters. The assessment of the stress-strain state of the structure is carried out according to the criteria of strength, rigidity and based on the study of dynamic characteristics. The calculations are reduced to justifying the choice of structural parameters of sheet glass, caliper and rubber sealing material, taking into account the stress-deformed state of the structure, operational, structural requirements and economic indicators.

The paper presents a methodology for substantiating the selection of the parameters of a transparent structure, which includes a rectangular glass plate, elastic sealing and rigid frames based on model research in the SOLIDWORKS PC environment. It is shown that the parameters of fixing the sheet glass, including the sealing characteristics, significantly affect the mechanical properties of the structure. The developed model makes it possible to estimate the stress-deformed state of sheet glass and the dynamic properties of the structure depending on the parameters of the elastic seal.

**sheet glass, elastic sealing, 3D modeling, failure criteria, Mohr-Coulomb stress criterion, modal analysis**

*Одержано (Received) 16.02.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 02.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**І.А. Карпюк**, доц., канд. техн. наук, **В.М. Карпюк**, проф., д-р техн. наук, **А.І. Костюк**, доц., канд. техн. наук, **Р.В. Глібоцький**, асп., **О.О. Постернак**, доц., канд. техн. наук  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна*  
e-mail: [irina.carpyuk@gmail.com](mailto:irina.carpyuk@gmail.com), [v.karpiuk@ukr.net](mailto:v.karpiuk@ukr.net), [isi@ogasa.org.ua](mailto:isi@ogasa.org.ua),  
[romich.gl@gmail.com](mailto:romich.gl@gmail.com), [alex.bk@ukr.net](mailto:alex.bk@ukr.net)

## Деформативність та тріщиностійкість пошкоджених балок з базальтопластиковою арматурою, підсилених вуглепластиковим полотном

В роботі наведені результати досліджень деформативності та тріщиностійкості доведених у попередніх випробуваннях до граничного стану (ULS) базальтобетонних балок, підсилених зовнішнім фіброармованим пластиком (CFRP). Ці дані представлені у вигляді експериментально – статистичних залежностей основних параметрів працездатності дослідних зразків від конструктивних чинників та рівнів малоциклового повторного навантаження.

Найбільший вплив на деформативність матеріалів та дослідних зразків – пошкоджених базальтобетонних балок, підсилених вуглепластиком, мають: величина відносного прольота зрізу ( $a/h_0$ ), потім – клас бетону (С) і ,наостанок, коефіцієнт поперечного армування ( $\rho_{fv}$ ) їхніх приопорних ділянок.

**пошкоджені базальтобетонні балки; підсилення приопорних ділянок вуглепластиковими сорочками; підкріплення нижніх розтягнутих зон вуглепластиковими полотнами; деформативність бетону, арматури і фіброармованого пластика; тріщиностійкість балок; експериментально-статистичні залежності**

**Постановка завдання.** Енергоефективні, екологічні та економічні прогінні бетонні конструкції з базальтопластиковою арматурою і підвищеною стійкістю до негативного впливу оточуючого середовища є незамінними у гідротехнічному і транспортному будівництві, при зведенні прогонових будов мостів, очисних споруд, об'єктів хімічної та харчової промисловості, будівель спеціального призначення та у фундаментобудуванні.

Розповсюджені методи підсилення шляхом збільшення розмірів конструкції за рахунок приєднання додаткових елементів, сорочок із бетону або розчину, застосування затяжок зі створенням в них попереднього напруження [1], приєднання металевих пластин у зоні дії максимальних згинальних моментів не позбавлені таких недоліків: збільшення ваги конструкцій та трудомісткості виконання робіт, ускладнення підсилення при складній формі поперечного перерізу тощо.

Підсилення основних несучих конструкцій зовнішніми фіброармованими пластиками з вуглецевими, арамідними, поліефірними і скляними волокнами виявилось достатньо ефективним за рахунок їхньої високої міцності, стійкості до агресивних впливів оточуючого середовища, легкості повторення любых форм елемента, малої трудомісткості виконання робіт на будівельній площадці.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У праці [2] розглянута поведінка залізобетонних балок, підсилених вуглепластиковими волокнами, з використанням різних методів підсилення. Дванадцять залізобетонних балок було випробувано на чотириточковий вигин під навантаженням. Одна з цих балок була позначена як

еталонна балка, сім інших балок були підсилені вуглепластиковим полотном (CFRP), а решту чотири балки були підсилені ламелями із вуглепластику з використанням методів зовнішнього армування у канавках (EBROG) та без них (EBR). Результати випробувань показали, що міцність на згин і жорсткість дослідних зразків, підсилених методами EBR та EBROG, збільшилися в порівнянні з контрольною непідсиленою балкою, відповідно, на 25-48 % і 32-77 %. При цьому, режим руйнування балок у цих методах змінювався з відшарування вуглепластика у методі EBR до його розриву у методі EBROG. Проте, у зазначених дослідженнях мова не йде про підсилення пошкоджених залізобетонних балок, а також про методи їх розрахунку при проектуванні підсилення.

В експериментально-аналітичному дослідженні [3] розглядається підсилення на вигин пошкоджених вогнем бетонних балок, підсилених вуглепластиковими листами. У даній праці вивчали реакцію на вигин простих та фібробетонних зразків – балок зі склопластиковою стержневою арматурою (GFRP), підсилених вуглепластиковими листами (CFRP) після пожежі. Дослідні змінні в 10 залізобетонних балках зі склопластиковою арматурою включали температуру впливу (20, 400 і 600 °C), відсотковий вміст сталеві в обсязі (0 і 1 %), коефіцієнт армування розтягнутої зони стержнями GFRP (0,00314 і 0,00872), лист вуглепластику. Після проведення чотириточкового експерименту з квазістатичного згину не нагрітих і нагрітих балок було оцінено кілька параметрів, включаючи пластичність, характер утворення тріщин та режим руйнування, а також діаграми навантаження – прогини балок. Результати випробування показали, що підсилення балок на вигин з використанням листів вуглепластика покращило несучу здатність дослідних зразків – балок за згин і це покращення вказаних характеристик стало більш помітним зі збільшенням температурного впливу. Для оцінки результатів досліджень був застосований метод секційного аналізу, який дозволив авторам запропонувати аналітичну модель, яка адекватно відображає їх. Разом з тим, викликає сумнів той факт, що за допомогою всього 10 залізобетонних балок авторам вдалося дослідити вплив такої великої кількості факторів без застосування математичної теорії планування експерименту.

Автори [4] досліджували несучу здатність залізобетонних балок різної висоти на зсув, підсилені гібридними смугами вуглепластику та сталевими хомутами. Був здійснений нелінійний скінчено-елементний аналіз поведінки при зсуві вказаних балок. Первинні скінчено-елементні моделі були відкалібровані та перевірені шляхом порівняння їхньої реакції на навантаження – прогини, розтріскування та руйнування з експериментальними даними. Результати досліджень показали, що зміна ширини окремої смуги вуглепластика при збереженні постійної загальної ширини не істотно впливає на поведінку дослідної балки. Збільшення міцності бетону на стиск покращує міцність зчеплення з вуглепластиковою смугою, що призводить до підвищення несучої здатності балок, в цілому. Зміна кута орієнтації смуг вуглепластика до 45° мала незначний вплив на несучу здатність балок на зсув. Внесок смуг вуглепластика був більш вираженим по мірі збільшення висоти балки. Порівняння результатів показало, що внутрішньо інтегровані смуги вуглепластика призводять до більшого підвищення міцності на зсув залізобетонних балок, ніж зовнішнє підсилення вуглепластиковими композитами.

У роботі розглянуті зв'язувальні властивості поверхні CFRP – бетон при комбінованому тривалому навантаженні та сульфатній ерозії. У практичній інженерії підсилені конструкції часто піддаються впливу тривалого навантаження та агресивному впливу оточуючого середовища. Авторами були запроєктовані та виготовлені 27 двосторонніх зразків бетону, армованого вуглепластиком, та були

проведені випробування їх при комбінованій дії тривалого навантаження та сульфатних циклів сухий – вологий. Було вивчено вплив днів ерозії та тривалих рівнів навантаження на режими руйнування, несучу здатність, напруження та деформації, а також криві «зв'язки – прослизання (проковзування)» армованих конструкцій. Грунтуючись на результатах, режим руйнування армованої конструкції поступово змінюється від руйнування по бетону при зрушенні до порушення зчеплення між вуглепластиком і поверхнею бетону. Граничне навантаження та крива «напруження - деформації» вуглепластику показали загальну тенденцію до зниження, а ступінь деградації підвищився зі збільшення рівня навантаження. За допомогою індуктивного аналізу отриманих даних для вказаних умов роботи була запропонована модель «зчеплення – ковзання» межі розділу, що враховує комбінований ефект зазначених чинників та адекватно їх відображає. Проте, для практичного проектування, очевидно, потрібно було б вказати коефіцієнти умов роботи зазначеного з'єднання в тих чи інших умовах.

В праці [6] описана поведінка залізобетонних балок, підсилених на згин алюмінієвими пластинами, приклеєними зовні. В ній вказано, що композитні матеріали, які використовуються для підсилення балкових конструкцій, мають також деякі недоліки. Основним недоліком композитів FRP, на думку авторів, є те, що вони являються крихкими матеріалами А пластини з алюмінієвого сплаву (АА) є пластичними матеріалами, що є бажаним для підсилення залізобетонних балок. Були виготовлені чотири балки і три із них були підсилені на згин пластинами АА. Пластини покривали 90 % прольоту балок. У двох балках пластини АА на кінцях були закріплені за допомогою одного і двох шарів ламінату з полімеру, армованого вуглецевими волокнами (CFRP). Контрольна балка не була підсилена і використовувалася у якості еталонної для вимірювання продуктивності підсилених балок із закріпленням АА і без них. Балки випробовували до руйнування за чотириточковою схемою. Були побудовані криві «навантаження – прогин» та криві «навантаження – деформація», а також розраховані показники пластичності випробуваних балок. Було відмічено, що підсилені балки показали підвищення несучої здатності до 40 % та пластичності до 55 % порівняно з контрольною балкою. Проте, пластичність відмови підсилених балок з двома шарами U-подібних обгортки дещо зменшилася (на 5 %) у порівнянні з контрольною балкою. Отже, пластини АА можуть використовуватися для підвищення згинальних характеристик залізобетонних балок. Проте, порівняльних характеристик підсилення згинальних елементів пластинами АА і композитними матеріалами, а також методики проектування такого підсилення у даній роботі не наведено.

У роботі [7] розглядаються динамічні та статичні міжфазні сполучні властивості вуглепластику та бетону при циклічному заморожуванні - відтаванні. Відзначається, що завершені динамічні та статичні одноразові випробування за зсув 144 зразків бетону, армованого вуглепластиковим полотном, підданих циклом заморожування 3 відтаванням. Загалом було випробувано 32 групи зразків з різними класами міцності, кількістю циклів заморожування - відтавання та швидкостями навантаження. Відповідні динамічні та статичні властивості міжфазного зчеплення були ретельно проаналізовані на основі характеристик руйнування, розподілу деформацій на поверхні вуглепластика, міжфазних напружень зсуву, міжфазного середнього пікового напруження зсуву, міжфазної енергії руйнування, міжфазної міцності на зсув, ефективною довжини склеювання кривих ковзання. Це дослідження показало, що стійкість бетону до циклів заморожування з відтавання була найважливішим фактором, який впливає на статичні та динамічні властивості поверхні розділу вуглепластик - бетон, а вплив замерзання та відтавання - на погіршення якості бетону був більш

серйозним, ніж ефект ерозії клейового шару. Подальший аналіз показав, що динамічні властивості інтерфейсу CFRP - бетон знижуються зі збільшенням кількості циклів заморожування – відтавання. Нарешті, удосконаленим методом скінчених елементів з використанням моделей пластичності бетону (CDP) була запропонована методика виявлення процесу пошкодження інтерфейсу CFRP - бетон. Проте, конкретні пропозиції щодо урахування вказаних пошкоджень у розрахунках підсилених конструкцій у роботі відсутні.

Автори [8] здійснили нелінійне скінчено-елементне моделювання залізобетонних плит, підслених смугами вуглепластику, за дії ударного навантаження (підданих вибуховим навантаженням) для оцінки ефективності використання смуг вуглепластику (CFRP) у якості зовнішньої арматури (EBR) для захисту вказаних плит від вибуху. Метою статті була розробка окладних числових моделей для прогнозування поведінки і реакції вказаних конструкцій на вибух на фазах надходження та відскоку ударної хвилі. При моделюванні бетону використовували модель пластичного матеріалу, яка урахує вплив швидкості деформування матеріалу та здатна прогнозувати появу тріщин. Модель пружнопластичного матеріалу та модель еластичного матеріалу застосовуються для моделювання сталеві арматури та смуг вуглепластику, відповідно. Інтерфейс зв'язку між бетоном та смугою з вуглепластику моделюється з використанням спеціального алгоритму контакту, що включає вплив швидкості деформації на межі розділу між бетоном та смугою вуглепластику з критеріями руйнування. Результати моделювання підтверджуються експериментальними даними. Модель матеріалу бетону дає гарний прогноз реакції залізобетонної плити на вибух із EBR і без нього. Збільшення кількості смуг вуглепластику зменшує максимальні прогини посередині прольоту плит та деформації у сталевій арматурі та у смугах вуглепластику. Автори даної роботи показали якісну картину напружено-деформованого стану звичайних та підслених вуглепластиковими смугами залізобетонних плит під впливом вибухів, розробили відповідні скінчено-елементні моделі. Проте, конкретних пропозицій щодо розрахунку та проектування вказаних плит з урахуванням впливу вибухів вони не надали.

У праці [9] описане посилення залізобетонних балок на згин методом NSM - GFRP з використанням інноваційної системи анкерування. Автори систематизували існуючі методи поверхневого монтажу (NSM) та зовнішнього з'єднання (EB) з використанням композитів з армованого скловолокном або вуглецевим волокном полімеру (GFRP або CFRP), які використовуються для підсилення залізобетонних балок з дефектами. Тим не менш залізобетонні балки, підслені обома методами, схильні до руйнування композитних матеріалів FRP. У даній статті описується запропонована авторами інноваційна система анкерування NSM для підсилення залізобетонних балок, яка включає L- подібний анкер зі склопластику (L- анкер), U - подібні смуги з вуглепластику (U - смуга) та подвійну пластину (DP - анкер). Розроблена авторами методика зміщення називається NLUD. Сім залізобетонних балок були виготовлені та випробувані за чотириточковою схемою на згин. Експерименти показали, що залізобетонні балки, підслені методом NLUD, були спроможні сприйняти значно більші згинальні навантаження. Техніка NLUD виявилася спроможною запобігати порушенню зчеплення склопластикових стержнів підслених залізобетонних балок. Проте, у даній праці не наведено конкретних пропозицій щодо проектування зазначеної системи NLUD.

У статті [10] автори вважають, що найбільш важливим параметром граничного стану (SLS) працездатності залізобетонних (RC) балок являється їхня тріщиностійкість. До неї відноситься: ширина розкриття тріщин, їх розподіл по поверхні, навантаження,

при якому виникає максимальна ширина розкриття тріщини. Це особливо важливо при опорі балки зсуву. В указаній статті описані нові дані про тріщиностійкість балок (RC) прямокутного перерізу. Змінними параметрами зсуву були: відносний проліт зрізу  $a/d$  - 1,0; 1,5; 2,0 та підсилення опорних зон балок фібробетоном (FRCM). Було виготовлено 8 дослідних зразків - балок для експериментальних досліджень: 6 балок - без зміцнення, але з різними прольотами зсуву і 2 балки з композитною системою підсилення. При зменшенні інтервалу зсуву на 25 % максимальна ширина розкриття критичної тріщини зменшується на 7 % і на 40 % при зменшенні інтервалу зсуву на 50 %. Зовнішнє підсилення системи зменшило максимальне розкриття тріщини на 73 %: з 0.75 до 0.43 мм. Разом з тим, автори статті не надали конкретних пропозицій щодо урахування відкритого ними явищами при проектуванні вказаних конструкцій.

У роботі [11] автори пропонують використовувати армовані вуглецевим волокном полімери (FRP) для зміцнення залізобетонних конструкцій, оскільки вони мають високу корозійну стійкість до агресивних впливів факторів навколишнього середовища, високу жорсткість та міцність і малу вагу порівняно з іншими матеріалами.

Недоліком такого підсилення є його висока вартість. Проте, вона компенсується зменшенням витрат часу і праці при його здійсненні, відсутністю потреби використання дорогого обладнання та демонтажу конструкції. В роботі представлені результати експериментів: 6 залізобетонних колон, зміцнених смугами CFRP Sika Carbodur S512 шириною 50 мм. Було виготовлено: 2 непідсилені контрольні зразки, 2 зразки, підсилені без початкового навантаження, та 2 зразки, зміцнені при їхньому навантаженні до рівня 50 % від руйнівного. Аналіз результатів показав, що найбільшу несучу здатність, мали зразки, підсилені без початкового навантаження, яка, в середньому, перевищувала несучу здатність контрольних зразків в 1,5 разів. Несуча здатність зміцнених при навантаженні колон збільшилася в 1,3 рази за рахунок тристороннього обтиснення. Очевидно, що виявлений ефект обидвома доцільно ураховувати при проектуванні зазначеного підсилення, приймаючи до уваги ступінь силових чи корозійних пошкоджень.

Аналіз наведених та інших літературних джерел показує, що основні принципи розрахунку бетонних конструкцій з FRP збережені такими ж, як і для залізобетонних елементів з урахуванням лінійної роботи арматури. Специфіка роботи конструкції з FRP ураховується введенням спеціальних понижуючих коефіцієнтів умов роботи і нормуванням характеристик матеріалів. Формули для визначення розрахункових параметрів конструкцій з FRP. в цілому, повторюють формули для конструкцій зі сталеву арматурою. Проте, конструктивні вимоги у більшості випадків прийняті більш обережними порівняно із залізобетонні конструкціями.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає в експериментально-теоретичному вивченні деформативності та тріщиностійкості пошкоджених у попередніх дослідженнях [12] і доведених до граничного стану (ULS) бетонних балок з базальтопластиковою арматурою, підсилені вуглепластиковими сорочками на приопорних ділянках і вуглепластиковими полотнами у нижній розтягнутій зоні за дії малоциклового повторного навантаження високих рівнів з розробкою експериментально - статистичних залежностей впливу дослідних чинників на вказані вихідні параметри другої групи граничних станів (SLS), а також в поповненні даних до єдиної розрахункової моделі деформативності та тріщиностійкості вказаних конструкцій.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Завдання досліджень:

- підготувати поверхні пошкоджених наскрізними силовими тріщинами і



доведених до руйнування за похилих тріщинами бетонних балок з BFRP [15] та здійснити їх підсилення вуглепластиковим полотном Sika®Wrap®-230C (CFRP) з використанням двокомпонентної смоли Sikadur-300 у нижніх розтягнутих зонах та на зруйнованих пропорних ділянках за встановленою технологією;

- виконати експериментальні дослідження несучої здатності підсилених вуглепластиковим полотном (CFRP) раніше пошкоджених наскрізними нормальними і похилими тріщинами бетонних балок з BFRP за дії малоциклового знакоповторного ступенево зростаючого поперечного навантаження аж до їх руйнування:

- встановити характер деформування, тріщиноутворення та руйнування дослідних елементів і запропонувати експериментально-статистичні залежності несучої здатності підсилених вуглепластиком (CFRP) нормальних і похилих перерізів доведених до руйнування бетонних балок з BFRP

- оцінити вплив конструктивних чинників на деформативність та тріщиностійкість пошкоджених базальтобетонних балок, підсилених вуглепластиком та підготувати вихідні дані до єдиної розрахункової моделі деформативності та тріщиностійкості вказаних елементів.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Методика проведених експериментів та обладнання

Методика випробування непошкоджених бетонних балок з BFRP та їх конструкція представлена в [15].

Для досягнення поставленої мети раніше були реалізовані дві серії натурних дослідів [15] з однопрогінними балками, армованими BFRP, за дії статичного малоциклового повторного навантаження високих рівнів згідно держбюджетних тем 0108U000559, 0121U114597 з використанням ротатабельного плану-експерименту Бокса-Бенкіна В<sub>3</sub>. У цих перших двох серіях у якості дослідних обрані наступні фактори (конструктивні чинники), які змінювалися на трьох рівнях (табл. 1): X<sub>1</sub> – відносний проліт зрізу або зсуву (віддаль від опори до зосередженої сили), a/h<sub>0</sub> = 1, 2, 3 при h<sub>0</sub> = d = 175 мм; X<sub>2</sub> – клас бетону С, МПа: С16/20, С30/35, С40/50; X<sub>3</sub> – коефіцієнт поперечного армування непошкоджених базальтобетонних балок ρ<sub>fw</sub> (АКБ-800): 0,0029; 0,0065; 0,0115. Коефіцієнти верхнього і нижнього поздовжнього армування ρ<sub>n</sub> = ρ'<sub>n</sub> = 0,0176 з розрахунковими прольотами L<sub>0</sub> = 9h<sub>0</sub> = 1575 мм і шириною b = 100 мм.

У першій серії дослідів непошкоджені балки були випробувані на дію ступенево зростаючого одноразового статичного (І. Карпюк, А. Tselikova), а у другій – малоциклового повторного навантаження (І. Карпюк, А. Khudobych).

Оскільки реальний коефіцієнт робочого армування ρ<sub>n</sub> = 0,0176 перевищував граничне значення ρ<sub>nb</sub> = 0,0041; 0,0056; 0,0085 для трьох використаних названих класів бетону (С16/20, С30/35, С40/50), то руйнування дослідних зразків – балок відбувалося не по розтягнутій базальтопластиковій арматурі, а по стиснутій зоні бетону. Ураховуючи те, що поперечні стержні BFRP із-за високої деформативності спроможні були сприймати напруження σ<sub>fw</sub> = 0,1f<sub>fk</sub> у балках з великими (a/d=3) прольотами зсуву і σ<sub>fw</sub> = 0,15f<sub>fk</sub> у зразках із середнім (a/d=2) прольотами зсуву, то їх руйнування відбулося від роздроблення або зсуву стиснутої зони над вершиною небезпечної похилої тріщини (рис. 1) з надмірним їх розкриттям при навантаженнях, що перевищували експлуатаційний рівень (η ≥ 0,65F<sub>ult</sub>). Повна картина тріщиноутворення, деформування і дані руйнування балок з BFRP представлені в [15].

Пошкоджені після випробувань бетонні балки з BFRP були підсилені (рис. 1) знизу у розтягнутій зоні на всю їхню довжину (1575 мм) і ширину ( $b=100$  мм) та на приопорних ділянках у вигляді замкнутих сорочок довжиною, відповідно, 150, 300 і 450 мм вуглепластиковим полотном Sika®Wrap®-230C, приклеєного двокомпонентною смолою Sikadur-300 за встановленою технологією [16] з попередньою підготовкою поверхні дослідних зразків – балок і використанням дрібнозернистих полімерцементних ремонтних сумішей для зароблення вибоїн, каверн і надмірно розкритих тріщин.

Після повної полімеризації двокомпонентної смоли раніше пошкоджені, а потім підсилені вуглепластиком бетонні балки з базальтопластиковою арматурою повторно були випробувані на дію ступенево зростаючого знакопостійного малоциклового поперечного навантаження до руйнування. Кількість повторних навантажень на даній ступені, як правило, не перевищувала 10 і зростала до тих пір, поки не наставала стабілізація деформацій у бетоні, елементах підсилення та балках, вцілому. На завершальному етапі випробувань за нестабілізованих деформацій підсилених балок знімали з них вимірювальні прилади і доводили їх до руйнування.

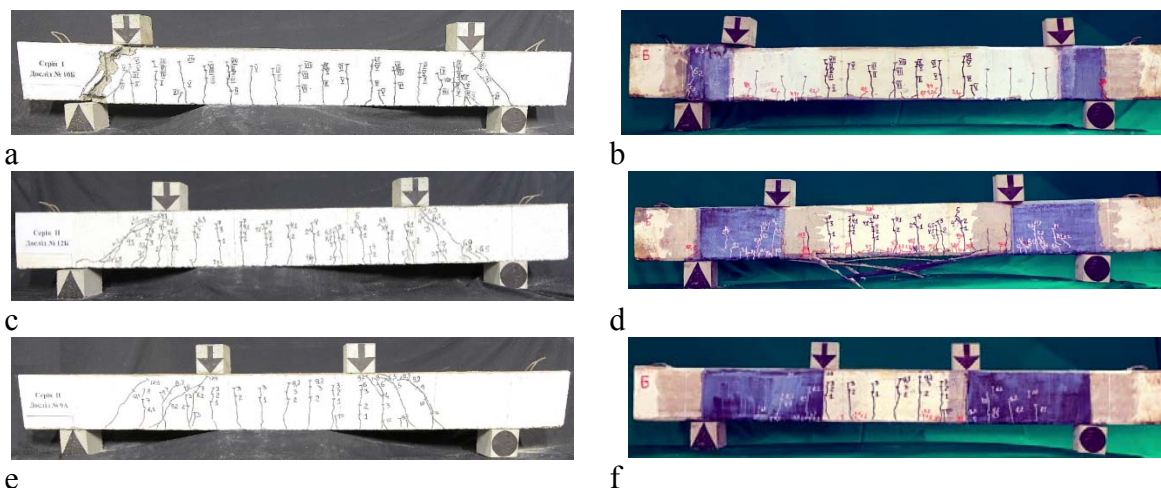


Рисунок 1 – Характер тріщиноутворення та руйнування бетонних балок з BFRP до (а, с, е) і після (b, d, f) їх підсилення вуглепластиковим полотном у нижній розтягнутій зоні та на приопорних ділянках з малим, середнім та великим прольотами зсуву

*Джерело: розроблено авторами*

Руйнування дослідних підсилених базальтобетонних балок з великими ( $a/d=3$ ) і середніми ( $a/d=2$ ) прольотами зсуву відповідало напружено-деформованому стану майже збалансованого нормального поперечного перерізу, який характеризувався досягненням у зовнішньому вуглепластиковому шарі підсилення CFRP критичних деформацій і напружень розриву, а у стиснутій зоні бетону – закритичних (на низпадній ділянці діаграми « $\sigma_c - \epsilon_c$ ») деформацій і напружень. Зазначене руйнування дослідних балок з великими і середніми прольотами зсуву починалося з розриву зовнішньої арматури CFRP і супроводжувалося різким підвищенням напружень у розтягнутій базальтопластиковій арматурі BFRP, розтріскуванням та розшаруванням захисного шару бетону і надмірним неконтрольованим збільшенням прогинів.

Руйнування балок з малими ( $a/d=1$ ) прольотами зсуву супроводжувалося подальшим розкриттям раніше утворених похилих тріщин і розривом замкнутих вуглепластикових сорочок на бічних гранях їхніх приопорних ділянок та різким збільшенням прогинів, зумовлених, насамперед, деформаціями взаємного зсуву окремих частин дослідних зразків (рис. 1)

## Результати дискусії

Під час випробування бетонних балок з BFRP процес деформування та утворення нормальних та похилих тріщин відбувався прогнозовано: першими утворювалися нормальні тріщини у зоні «чистого згину» (рис. 1) та під зосередженими силами на рівнях навантаження  $\eta = 0,15 \dots 0,25$  від руйнівного, а перші похилі тріщини з являлися на приопорних ділянках при рівнях навантаження  $\eta = 0,40 \dots 0,60$ . З ростом величини внутрішніх зусиль утворювалися нові тріщини, збільшувалася довжина і ширина розкриття існуючих тріщин [13], а подальший їхній розвиток визначала кількість поздовжнього робочого армування.

Деформативність матеріалів дослідних зразків-балок

Деформації бетону стиснутої зони, розтягнутої робочої базальтопластикової (BFRP) арматури та зовнішньої вуглепластикової обійми (CFRP) підсилення пошкоджених (ULS) дослідних балок на експлуатаційному рівні малоциклового повторного навантаження ( $\eta_1 = 0,65F_{ult}$ ) (табл. 1) виражається:

$$\hat{Y}(\varepsilon_{cf_1}^{ref,\eta_1} \cdot 10^5) = 107 + 20x_1 - 3x_2 + 12x_3 + 3x_1^2 - 8x_1x_2, \nu = 6,0\% \quad \text{за даними [12]} \quad (1)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_{cf_{fx}}^{\eta_1} \cdot 10^5) = 194 + 38x_1 - 13x_2 + 9x_3 - 13x_1x_2, \nu = 5,3\% ; \quad (2)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_{f_1}^{ref,\eta_1} \cdot 10^5) = 510 + 77x_1 + 68x_2 + 32x_3 - 17x_1^2 - 46x_2^2 - 15x_3^2, \nu = 5,5\% \quad \text{за даними [12]}; \quad (3)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_f^{\eta_1} \cdot 10^5) = 503 + 101x_1 + 33x_2 + 34x_3 + 21x_1x_2 + 19x_1x_3, \nu = 5,1\% ; \quad (4)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_{f_{fx}}^{\eta_1} \cdot 10^5) = 601 + 122x_1 + 33x_2 + 41x_3 + 23x_1x_2 + 20x_1x_3, \nu = 4,9\% . \quad (5)$$

Таблиця 1 – Експериментальні значення відносних деформацій бетону стиснутої зони ( $\varepsilon_c$ ) $10^{+5}$ , розтягнутої робочої базальтопластикової арматури ( $\varepsilon_f$ ) $10^{+5}$  та зовнішньої вуглепластикової обійми ( $\varepsilon_{f_{fx}}$ ) $10^{+5}$  підсилених після отриманих пошкоджень (ULS) дослідних балок за малоциклового повторного навантаження.

№ досліду	План експерименту			На експлуатаційному рівні ( $\eta_1=0,65F_{ult}$ )					Перед руйнуванням ( $\eta_2=0,95F_{ult}$ )								
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\varepsilon_{cf_{fx}}^{\eta_1}$	$\hat{Y} \varepsilon_{cf_{fx}}^{\eta_1}$ (2)	$\varepsilon_f^{\eta_1}$	$\hat{Y} \varepsilon_f^{\eta_1}$ (4)	$\varepsilon_{f_{fx}}^{\eta_1}$	$\hat{Y} \varepsilon_{f_{fx}}^{\eta_1}$ (5)	$\hat{Y} \varepsilon_{cf_1,ult}^{ref,\eta_2}$ (6) [12]	$\varepsilon_{cf_{fx},ult}^{\eta_2}$	$\hat{Y} \varepsilon_{cf_{fx},ult}^{\eta_2}$ (7)	$\hat{Y} \varepsilon_{cf_1,ult}^{ref,\eta_2}$ (8) [12]	$\varepsilon_{f,ult}^{\eta_2}$	$\hat{Y} \varepsilon_{f,ult}^{\eta_2}$ (9)	$\varepsilon_{f_{fx},ult}^{\eta_2}$	$\hat{Y} \varepsilon_{f_{fx},ult}^{\eta_2}$ (10)
1	+	+	+	225	215	737	711	845	840	182	255	241	889	1001	1039	1221	1229
2	+	+	-	183	197	578	604	723	718	148	227	241	795	919	883	1043	1051
3	+	-	+	277	267	630	604	733	728	216	315	301	691	920	883	1053	1061
4	+	-	-	239	249	471	497	611	606	182	287	301	597	690	727	873	883
5	-	+	+	155	165	455	429	515	510	148	183	169	665	628	627	741	749
6	-	+	-	157	147	373	399	473	468	114	159	169	571	583	583	691	699
7	-	-	+	155	165	430	404	495	490	134	174	185	467	589	591	701	709
8	-	-	-	157	147	348	374	453	448	100	199	185	373	548	547	651	659
9	+	0	0	222	232	630	604	728	723	182	293	279	832	883	883	1049	1056
10	-	0	0	166	156	376	402	484	479	124	171	185	608	587	587	697	704
11	0	+	0	191	181	562	536	639	634	152	218	250	777	783	783	930	932
12	0	-	0	197	207	444	470	573	568	162	302	288	579	687	687	826	828
13	0	0	+	193	203	563	537	637	642	174	291	277	770	785	785	937	937

14	0	0	-	198	185	443	469	555	560	140	263	277	676	685	685	823	823
15	0	0	0	193	194	516	503	606	601	157	280	277	745	735	735	879	880
$\sum(y_i - \bar{y})^2$				1485	9213	375	2564	2794	23505	5484	631						
$\sigma = \sqrt{\sum(\dots)^2/14}$				10.3	25.65	5.18	13.53	14	40.98	19.79	6.7						
$\nu = (\sigma/b_0)100, \%$				5.3	5.1	0.9	8.6	5.1	5.5	2.7	0.8						

Джерело: розроблено авторами

При рівні малоциклового повторного навантаження  $\eta_2 = 0,95F_{ult}$  вказані деформації бетону (табл. 2), робочої базальтопластикової арматури BFRP та вуглепластикової обійми (CFRP) підсилення пошкоджених балок набувають виду:

$$\hat{Y}(\varepsilon_{cf_1}^{ref, \eta_2} \cdot 10^5) = 157 + 29x_1 - 5x_2 + 17x_3 + 4x_1^2 - 12x_1x_2, \nu = 6,6\% \quad \text{за даними [12]} \quad (6)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_{cf_{fx}}^{\eta_2} \cdot 10^5) = 277 + 47x_1 - 19x_2 - 45x_1^2 - 8x_2^2 - 11x_1x_2, \nu = 5,1\% ; \quad (7)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_{f_1, ult}^{ref, \eta_2} \cdot 10^5) = 745 + 112x_1 + 99x_2 + 47x_3 - 25x_1^2 - 67x_2^2 - 22x_3^2, \nu = 5,5\% \quad \text{за даними [12]}; (8)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_f^{\eta_2} \cdot 10^5) = 735 + 148x_1 + 48x_2 + 50x_3 + 30x_1x_2 + 28x_1x_3, \nu = 2,7\% ; \quad (9)$$

$$\hat{Y}(\varepsilon_{f_{fx}}^{\eta_2} \cdot 10^5) = 880 + 176x_1 + 52x_2 + 57x_3 + 32x_1x_2 + 32x_1x_3, \nu = 4,8\% . \quad (10)$$

Аналіз залежностей (1) і (6) показує, що деформації бетону в еталонних балках [12] на експлуатаційному рівні ( $\eta_1 = 0,65F_{ult}$ ) навантаження розташовуються на догірній висхідній ділянці діаграми « $\sigma_c - \varepsilon_c$ », а перед їх руйнуванням ( $\eta_2 = 0,95F_{ult}$ ) на тій же ділянці діаграми, але ближче до її вершини. При цьому, найбільший вплив на вказані деформації бетону мала величина відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (37%).

Деформації стиснутого бетону у підсиленних вуглепластиком балках при експлуатаційному рівні навантаженням (2) збільшилися в 1,8 разів порівняно з еталонними зразками і досягли вершини діаграми деформування бетону, а перед їхнім руйнуванням ( $\eta_2 = 0,95F_{ult}$ ) - (7) ця тенденція (в 1,8 разів) збереглася. При цьому, деформації стиснутого бетону на завершальному етапі роботи дослідних зразків-балок перед розривом зовнішнього шару вуглепластика підсилення відповідали деформаціям на низпадних ділянках діаграм « $\sigma_c - \varepsilon_c$ », що свідчить про повне і раціональне використання міцнісних властивостей бетону і зовнішнього вуглепластикового підсилення.

Залежність деформацій бетону еталонних і підсиленних фіброармаванним вуглепластиком дослідних бетонних балок з BFRP на експлуатаційному ( $\eta_1 = 0,65F_{ult}$ ) рівні навантаження та перед їх руйнуванням може бути представлена рис. 2, 3.

Деформації робочої арматури в еталонних і підсиленних вуглепластиком балках, а також зовнішньому фіброармаваному шарі при експлуатаційному рівні навантаження ( $\eta_1 = 0,65F_{ult}$ ), позначенні, відповідно,  $\varepsilon_{f_1}^{ref, \eta_1}$ ,  $\varepsilon_{f_1}^{\eta_1}$ ,  $\varepsilon_{f_{fx}}^{\eta_1}$  можна представити експериментально - статистичними залежностями (3), (4) і (5), а аналогічні деформації з індексом  $\eta_2$  перед їх руйнуванням – виразами (8), (9) і (10).

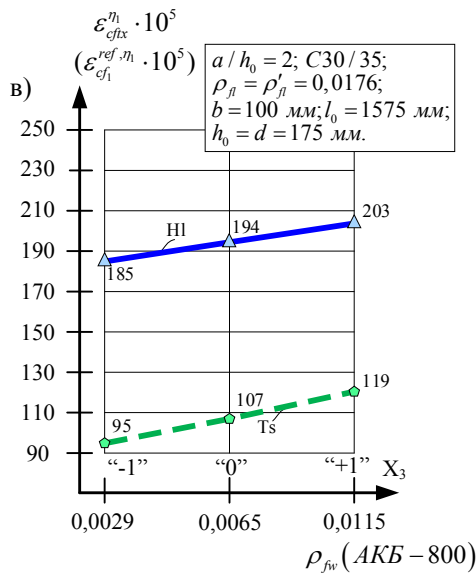
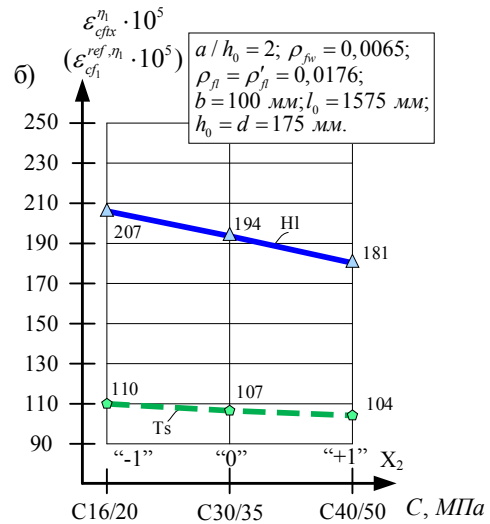
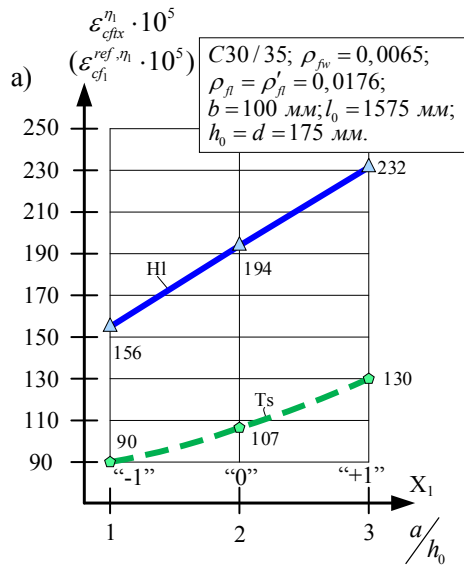
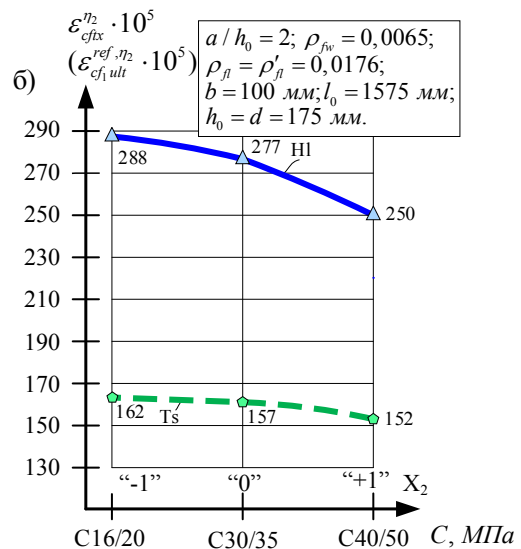
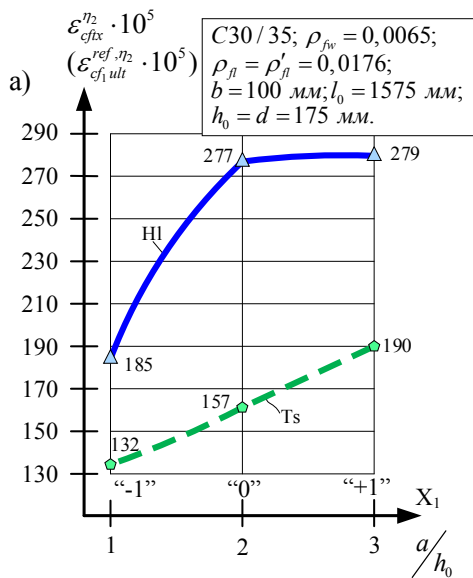


Рисунок 2 – Вплив відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону С (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fw}$  (в) на величину відносних деформацій бетону стиснутої зони дослідних балок на експлуатаційному рівні ( $\eta_1 = 0,65F_{ult}$ ) за малоциклового повторного навантаження

Джерело: розроблено авторами



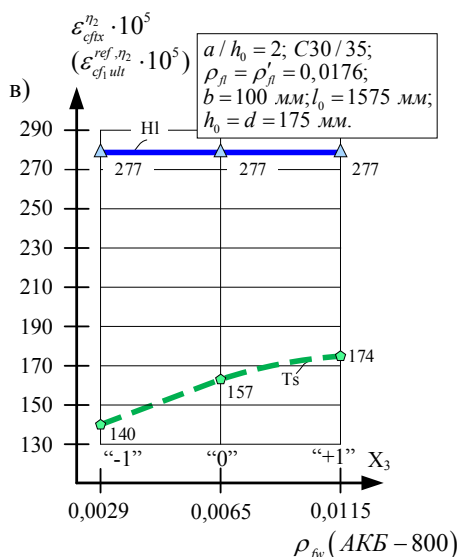
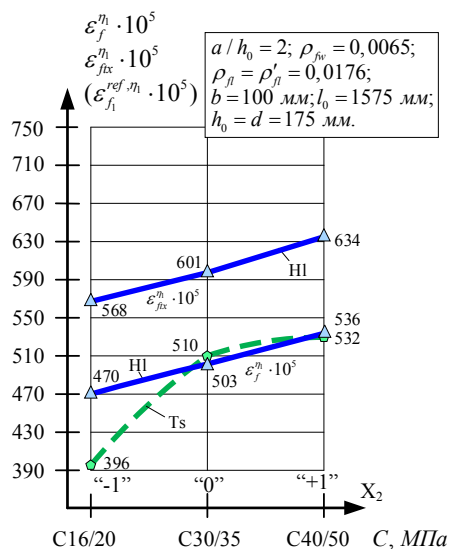
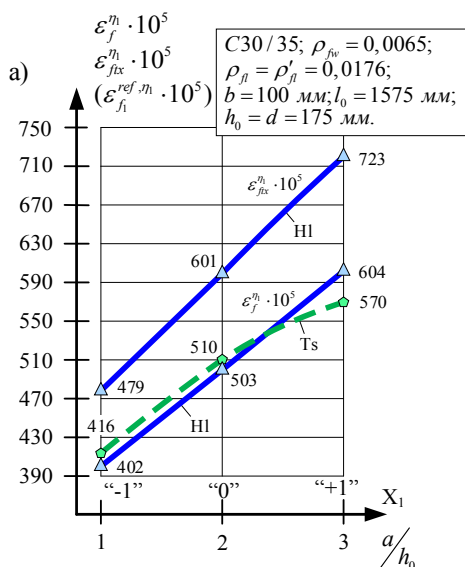


Рисунок 3 – Вплив відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону С (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fv}$  (в) на величину відносних деформацій бетону стиснутої зони дослідних балок перед руйнуванням ( $\eta_2=0,95F_{ult}$ ) за малоциклового повторного навантаження

Джерело: розроблено авторами

Слід зазначити, що прирости деформацій базальтопластикової робочої арматури в еталонних і підсиленних вуглепластиком балках, а також в шарі фіброармованого вуглепластикового підсилення на протязі всього періоду випробувань являлися прямо пропорційними зовнішньому ступенево зростаючому малоциклового знакопостійному навантаженню. Тобто, в BFRP в еталонних і підсиленних балках, а також в зовнішньому шарі вуглепластика (CFRP) підтвердився лінійний зв'язок між напруженнями і деформаціями. При цьому, розподіл лінійних деформацій по висоті нормальних перерізів носить лінійний характер і підтверджується гіпотеза плоских перерізів (Бернуллі).

Аналіз залежностей (3), (4), (5) та (8), (9), (10) показує, що вони є подібними між собою на всіх етапах навантаження, включаючи експлуатаційний рівень та перед руйнуванням дослідних зразків (рис. 4, 5).



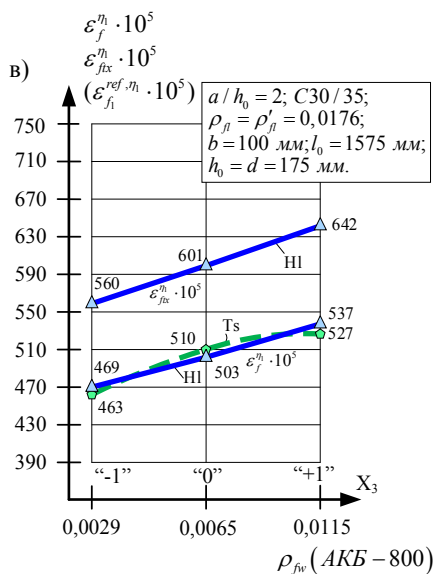


Рисунок 4 – Вплив відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону С (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fw}$  (в) на величину відносних деформацій розтягнутої робочої базальтобетонної (BFRP) арматури та зовнішньої вуглепластикової обойми (CFRP) дослідних балок на експлуатаційному рівні ( $\eta_1 = 0,65F_{ult}$ ) за малоциклового повторного навантаження  
Джерело: розроблено авторами

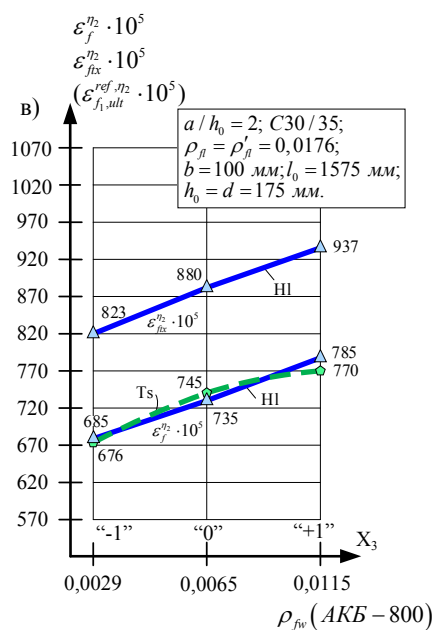
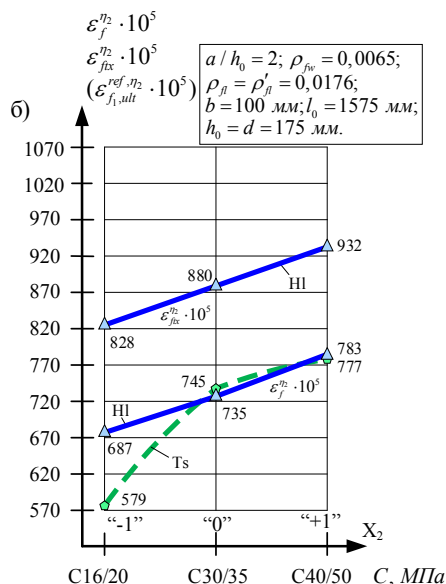
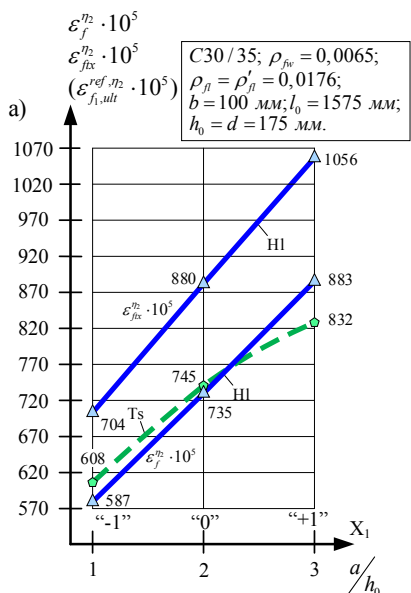


Рисунок 5 – Вплив відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону С (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fw}$  (в) на величину відносних деформацій розтягнутої робочої базальтобетонної (BFRP) арматури та зовнішньої вуглепластикової обойми (CFRP) дослідних балок перед руйнуванням ( $\eta_2 = 0,95F_{ult}$ ) за малоциклового повторного навантаження  
Джерело: розроблено авторами

Аналіз вказаних залежностей показує, що найбільший вплив на них (рис. 6, 7) має величина відносного прольоту зрізу (від 30 до 40 % перед руйнуванням), далі – клас бетону (від 13 до 27 %) і, наостанок, - кількість поперечної арматури (від 12 до 14 %) порівняно із середніми їхніми значеннями при збільшенні зазначених чинників в межах заданого планом експерименту діапазону їх зміни.

В окремих публікаціях, зокрема [10] вказано, на необхідність обмежити деформації зовнішнього фіброармуючого пластика BFRP величиною  $400 \cdot 10^{-5}$  для забезпечення сумісної роботи бетону і підсилюючого фібропластикового елемента. У виконаних дослідженнях перед руйнуванням (розривом) елемента підсилення  $\varepsilon_{f_{tx,ult}}^{\eta_2}$  змінювалися в межах від  $651 \cdot 10^{-5}$  до  $1221 \cdot 10^{-5}$ . При цьому, бетон захисного шару розривався вуглепластиком на окремі частки без відшарування від елемента підсилення аж до його розриву у всіх дослідних зразках – балках, що свідчить про дотримання технології підсилення та якість виконаних робіт. Виходячи із цього, обмеження деформацій  $\varepsilon_{f_{tx,ult}} \leq 400 \cdot 10^{-5}$  вважаємо недостатньо обґрунтованим.

Прогини еталонних бетонних балок з BFRP  $f_{f_1, \eta_1}^{ref}$  і  $f_{f_{tx, \eta_1}}$  підсилених вуглепластиковими (CFRP) обіймами пошкоджених базальтобетонних зразків-балок на експлуатаційному рівні навантаження ( $\eta_1 = 0,65 F_{ult}$ ) можуть бути представлені наступними залежностями (табл. 2):

$$\hat{Y}(f_{f_1, \eta_1}^{ref}) = 10,20 + 0,91x_1 + 1,04x_2 + 0,73x_3 - 0,74x_1^2, \text{ мм, } \nu = 5,3\% \quad \text{за даними [12]} \quad (11)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_1, \eta_1}^{ref}}{l_0}\right) \cdot 10^{-3} = 6,48 + 0,58x_1 + 0,66x_2 + 0,46x_3 - 0,47x_1^2; \quad (11a)$$

$$\hat{Y}(f_{f_{tx, \eta_1}}) = 11,53 + 1,46x_1 + 0,29x_2 + 0,70x_3 - 0,30x_1^2, \text{ мм, } \nu = 6,0\%; \quad (12)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_{tx, \eta_1}}}{l_0}\right) \cdot 10^{-3} = 7,32 + 0,93x_1 + 0,18x_2 + 0,44x_3 - 0,19x_1^2; \quad (12a)$$

Перед руйнуванням еталонних і дослідних зразків-балок ( $\eta_2 = 0,95 F_{ult}$ ) їхні прогини характеризуватимуться виразами:

$$\hat{Y}(f_{f_1, \eta_2}^{ref}) = 14,28 + 1,34x_1 + 1,46x_2 + 1,01x_3 - 1,03x_1^2, \text{ мм, } \nu = 5,6\% \quad \text{за даними [12]} \quad (13)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_1, \eta_2}^{ref}}{l_0}\right) \cdot 10^{-3} = 9,07 + 0,85x_1 + 0,93x_2 + 0,64x_3 - 0,65x_1^2; \quad (13a)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_1, \eta_2}^{ref} \cdot M_{ult}}{E_c \cdot I_{ref}}\right) \cdot 10^6 = 111 + 11x_1 + 9x_2 + 15x_3 - 7x_2^2 - 4x_3^2, \nu = 6,1\%; \quad (13b)$$

$$\hat{Y}(f_{f_{tx, \eta_2}}) = 16,72 + 2,06x_1 + 0,47x_2 + 0,80x_3 - 1,27x_1^2, \text{ мм, } \nu = 4,9\% \quad \text{за даними [12]} \quad (14)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_{tx, \eta_2}}}{l_0}\right) \cdot 10^{-3} = 10,62 + 1,31x_1 + 0,30x_2 + 0,51x_3 - 0,81x_1^2; \quad (14a)$$

$$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_{tx, \eta_2}} \cdot M_{ult}}{E_c \cdot I_{ref}}\right) \cdot 10^6 = 175 + 23x_1 - 9x_2 + 9x_3 - 14x_1^2 + 12x_2^2, \nu = 5,1\%; \quad (14b)$$



Таблиця 2 – Експериментальні значення прогинів еталонних (ref) та пошкоджених (ULS) бетонних балок з BFRP, підсилених вуглепластиковим полотном (CFRP), за малоциклового знакоповторного навантаження.

№ досліджу	План експерименту			На експлуатаційному рівні ( $\eta_1=0,65F_{ult}$ )		Перед руйнуванням ( $\eta_1=0,95F_{ult}$ )							
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$f_{fix,\eta_1}$ мм	$\hat{Y}(f_{fix,\eta_1})$ мм (12)	$\hat{Y}(f_{f_1,ref})$ мм, (11)	$\hat{Y}(f_{f_1,ref})$ мм, (13)	$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_1,ref} \cdot M_{ult}}{E_c \cdot I_{ref}}\right)$ $\times 10^6$	$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_1,ref} \cdot M_{ult}}{E_c \cdot I_{ref}}\right)$ $\times 10^6$ (13,6)	$f_{fix,\eta_2}$ мм,	$\hat{Y}(f_{fix,\eta_2})$ мм, (14)	$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_1,ref} \cdot M_{ult}}{E_c \cdot I_{ref}}\right)$ $\times 10^6$	$\hat{Y}\left(\frac{f_{f_1,ref} \cdot M_{ult}}{E_c \cdot I_{ref}}\right)$ $\times 10^6$ (14,6)
1	+	+	+	14.0	13.68	12.1	17.1	123	135	19.3	18.78	195	196
2	+	+	-	12.2	12.28	10.7	15.0	99	105	17.0	17.18	177	178
3	+	-	+	13.2	13.10	10.1	14.1	112	117	17.9	17.84	217	214
4	+	-	-	11.4	11.70	8.6	12.1	84	87	15.5	16.24	196	196
5	-	+	+	10.4	10.76	10.3	14.4	106	113	13.9	14.66	152	150
6	-	+	-	9.5	9.36	8.9	12.4	78	83	13.1	13.06	134	132
7	-	-	+	10.1	10.18	8.2	11.5	92	95	13.5	13.72	166	168
8	-	-	-	9.1	8.78	6.8	9.4	65	65	12.7	12.12	146	150
9	+	0	0	12.7	12.69	10.4	14.5	123	122	17.5	17.51	183	184
10	-	0	0	9.8	9.77	8.6	11.9	87	100	13.4	13.39	140	133
11	0	+	0	11.9	11.82	11.2	15.7	123	113	17.1	17.19	177	178
12	0	-	0	11.3	11.24	9.2	12.8	85	95	16.1	16.25	197	196
13	0	0	+	12.2	12.23	10.9	15.3	126	122	17.6	17.52	183	184
14	0	0	-	10.7	10.83	9.5	13.3	88	92	15.9	15.92	166	166
15	0	0	0	11.6	11.53	10.2	14.3	111	111	16.7	16.72	175	175
$\sum(y_i - \bar{y})^2$				4.46	4.1161	11.24	699	1.376	47				
$\sigma = \sqrt{\sum(\dots)^2 / 14}$				0.565	0.542	0.896	7.07	0.31	1.83				
$v = (\sigma / b_0) 100, \%$				4.9	5.3	6.3	6.4	1.9	1.0				

Джерело: розроблено авторами

Як видно із залежностей (11), (12), прогини і еталонних, і підсилених вуглепластиком базальтобетонних балок при експлуатаційному рівні навантаження, в середньому, досягають 1/150 прольоту внаслідок підвищеної деформативності армуючих матеріалів, що потрібно урахувати при обранні області застосування вказаних конструкцій.

Аналіз представлених залежностей показує, що усі розглянуті конструктивні чинники мають вплив на величину прогинів бетонних еталонних і підсилених пошкоджених балок з армуючими матеріалами FRP. При цьому, прогини еталонних балок на експлуатаційному рівні навантаження та перед їх руйнуванням в найбільшій степені (20 %, рис. 6, 7) залежать від класу бетону С, потім (18 %; 19 %) – від величини відносного прольоту зсуву  $a/d$  і, наостанок, кількості поперечного армування  $\rho_{fv}$  (14%).

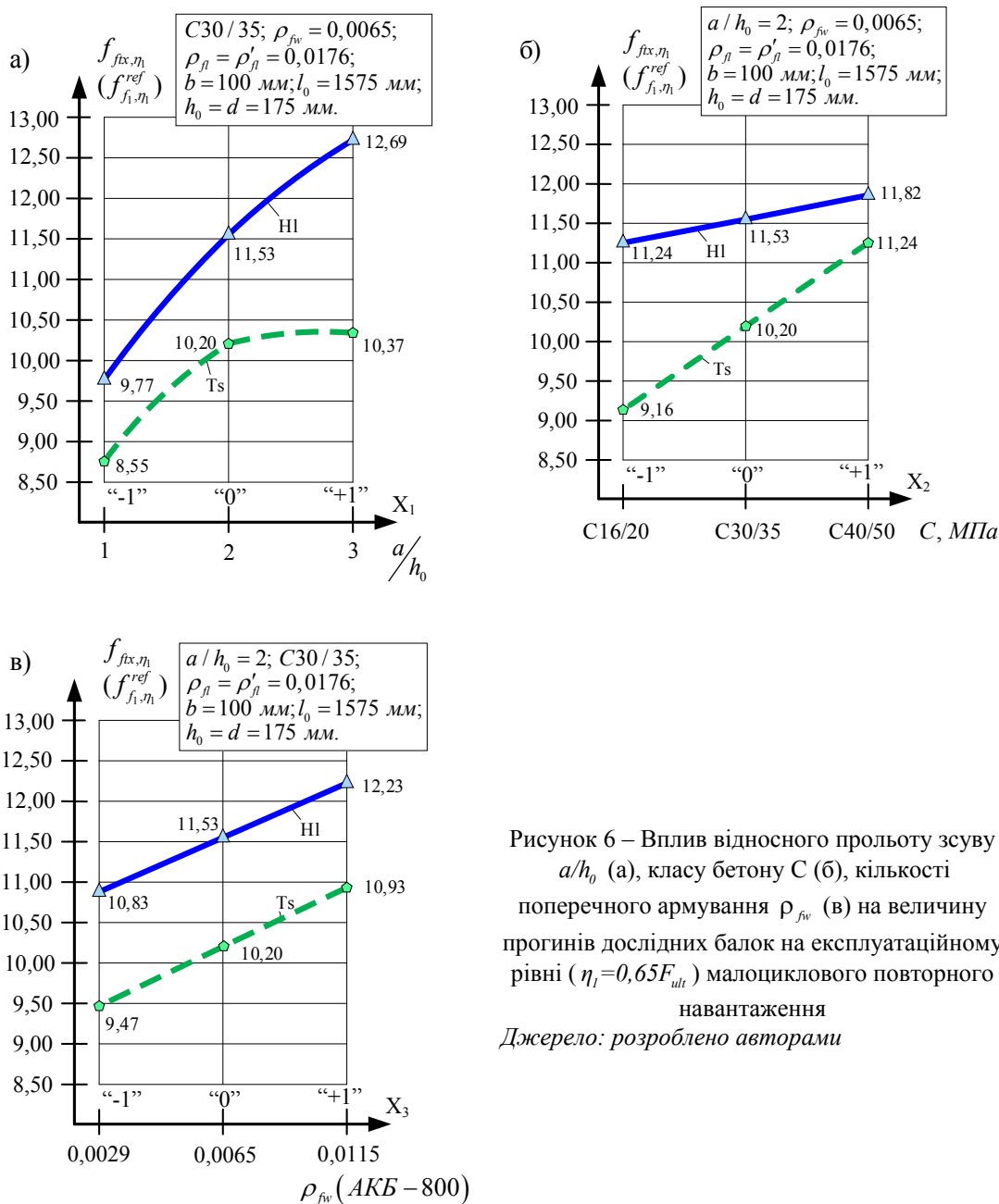


Рисунок 6 – Вплив відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону С (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fw}$  (в) на величину прогинів дослідних балок на експлуатаційному рівні ( $\eta_i = 0,65F_{ult}$ ) малоциклового повторного навантаження  
Джерело: розроблено авторами

Зі збільшенням величини цих чинників зростає вплив згинального моменту, а також несучої здатності дослідних елементів і, відповідно, стріла їх прогинів. Для можливості порівняти отримані результати досліджень з даними інших авторів натуральні значення прогинів дослідних зразків привели до відносних їх значень (11,а), (12,а), (13, а), (14, а), тобто віднесених до довжини їхнього прольоту.

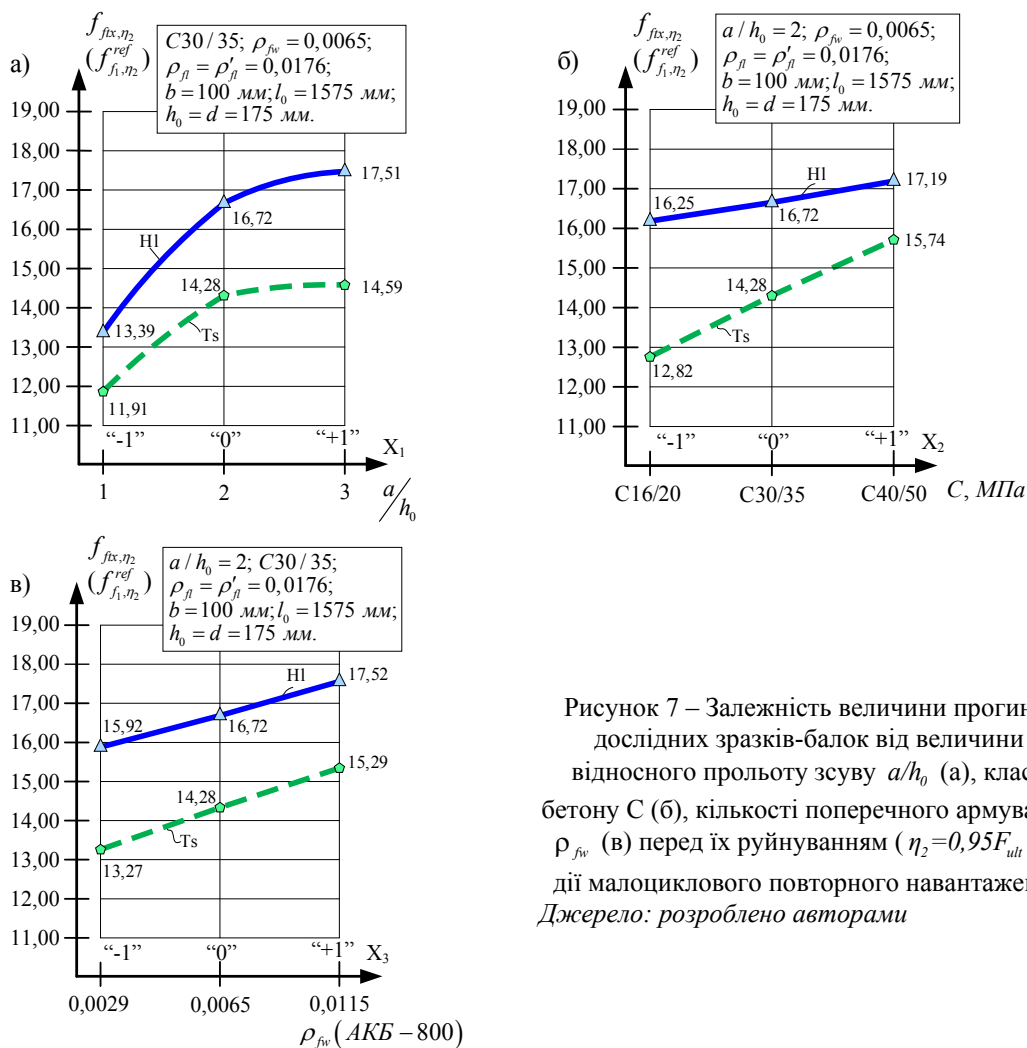


Рисунок 7 – Залежність величини прогинів дослідних зразків-балок від величини відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону  $C$  (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fw}$  (в) перед їх руйнуванням ( $\eta_2 = 0,95F_{ult}$ ) за дії малоциклового повторного навантаження  
Джерело: розроблено авторами

Оскільки дослідні еталонні та підсилені вуглепластиком зразки - балки продемонстрували різну несучу здатність та стрілу прогинів, то для можливості їх порівняння і оцінювання впливу зазначених конструктивних чинників на них, а також співставлення отриманих даних з результатами досліджень інших авторів в роботі представлені прогини, приведені до міцнісних і деформативних властивостей бетону ( $E_c$ ), геометричних характеристик поперечних перерізів ( $I_{red}$ ), а також зовнішнього навантаження ( $M_{ult}$ ), виражені безрозмірними залежностями (13, б) і (14, б).

Прогини еталонних і підсилених вуглепластиком балок перед руйнуванням досягали, в середньому, 1/100 від довжини прольоту, на що потрібно зважати при проектуванні реальних будівельних конструкцій. Очевидно що цю проблему можна було б вирішити шляхом застосування попередньо напруженої неметалевої композитної арматури.

**Ширина розкриття нормальних тріщин**

Представлену в табл. 3 ширину розкриття нормальних тріщин в розтягнутій зоні “чистого згину” еталонних базальтобетонних балок та підсилених вуглепластиковим полотном пошкоджених бетонних балок з BFRP при експлуатаційному рівні навантаження ( $\eta_1 = 0,65F_{ult}$ ) можна виразити наступними експериментально-статичними залежностями:

$$\hat{Y}(W_{kf_1,\eta_1}^{ref}) = 0,35 + 0,06x_1 + 0,10x_2 + 0,05x_3 + 0,02x_1x_3, \text{ мм, } \nu = 11,5\%; \text{ за даними [12] (15)}$$

$$\hat{Y}(W_{kfix,\eta_1}) = 0,40 + 0,10x_1 + 0,03x_2 + 0,03x_3 - 0,05x_1^2 + 0,02x_2^2 - 0,02x_3^2, \text{ мм}, \nu = 5,3\%;$$

за даними [12] (16)

Напередодні руйнування ( $\eta_2 = 0,95F_{ult}$ ) ширина розкриття нормальних тріщин в еталонних базальтобетонних та підсилених вуглепластиковим полотном пошкоджених бетонних балок з BFRP можна представити:

$$\hat{Y}(W_{kf_1,\eta_2}^{ref}) = 0,51 + 0,04x_1 + 0,13x_2 + 0,07x_3, \text{ мм}, \nu = 11\%; \text{ за даними [12] (17)}$$

$$\hat{Y}(W_{kfix,\eta_2}) = 0,52 + 0,04x_1 + 0,03x_2 + 0,02x_3 - 0,03x_1^2 + 0,02x_2^2, \text{ мм}, \nu = 5,7\%. (18)$$

Таблиця 3 – Основні параметри працездатності дослідних зразків-балок за другою групою граничних станів

№ досліду	План експерименту			На експлуатаційному рівні ( $\eta_1=0,65F_{ult}$ )			Перед руйнуванням ( $\eta_2=0,95F_{ult}$ )			Примітки
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	$\hat{Y}(W_{kf_1,\eta_1}^{ref})$ (15)	$W_{kf_1,\eta_1}^{ref}$	$\hat{Y}(W_{kfix,\eta_1})$ (16)	$\hat{Y}(W_{kf_1,\eta_2}^{ref})$ (17)	$W_{kf_1,\eta_2}^{ref}$	$\hat{Y}(W_{kfix,\eta_2})$ (18)	
1	+	+	+	0,58	0,50	0,51	0,75	0,57	0,60	
2	+	+	-	0,44	0,45	0,45	0,61	0,55	0,56	
3	+	-	+	0,38	0,43	0,45	0,49	0,53	0,54	
4	+	-	-	0,24	0,40	0,39	0,35	0,50	0,50	
5	-	+	+	0,42	0,28	0,31	0,67	0,55	0,52	
6	-	+	-	0,32	0,25	0,25	0,53	0,45	0,48	
7	-	-	+	0,22	0,25	0,25	0,41	0,43	0,46	
8	-	-	-	0,12	0,20	0,19	0,27	0,40	0,42	
9	+	0	0	0,41	0,45	0,45	0,55	0,52	0,53	
10	-	0	0	0,29	0,25	0,25	0,47	0,44	0,45	
11	0	+	0	0,45	0,45	0,45	0,64	0,57	0,57	
12	0	-	0	0,25	0,43	0,39	0,38	0,51	0,51	
13	0	0	+	0,40	0,38	0,41	0,58	0,53	0,54	
14	0	0	-	0,30	0,35	0,35	0,44	0,50	0,50	
15	0	0	0	0,35	0,40	0,40	0,51	0,55	0,52	
$\sum (y_i - \bar{y})^2$				0,0227	0,0099		0,0439	0,0062		
$\sigma = \sqrt{\sum (...)^2 / 14}$				0,040	0,027		0,056	0,021		
$\nu = (\sigma / b_0) 100, \%$				11,5	6,6		11,0	4,0		

Джерело: розроблено авторами

Аналіз представлених експериментально-статистичних залежностей показав, що середня ширина розкриття нормальних тріщин в еталонних і підсилених вуглепластиком зразках – балках при експлуатаційному рівні навантаження та перед їх руйнуванням майже однакова і складає, відповідно, 0,35-0,40 мм та 0,51-0,52 мм.

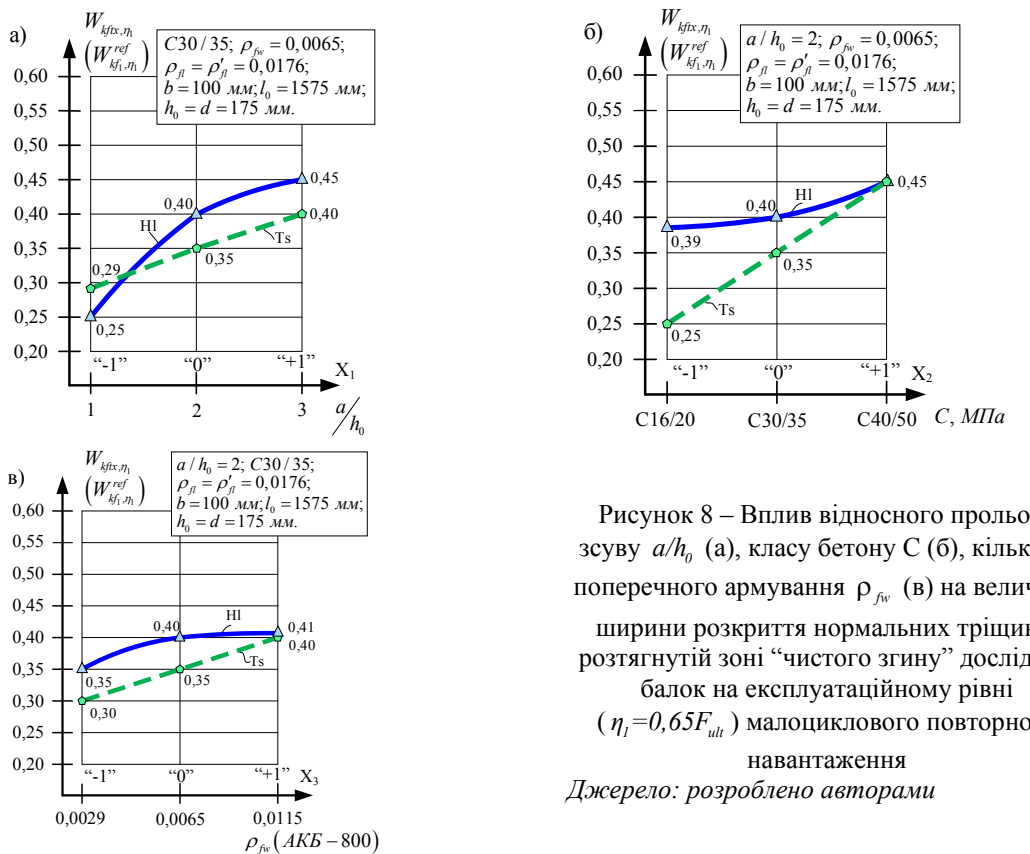


Рисунок 8 – Вплив відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону  $C$  (б), кількості поперечного армування  $\rho_{fv}$  (в) на величину ширини розкриття нормальних тріщин в розтягнутій зоні “чистого згину” дослідних балок на експлуатаційному рівні ( $\eta_1 = 0,65F_{ult}$ ) малоциклового повторного навантаження  
Джерело: розроблено авторами

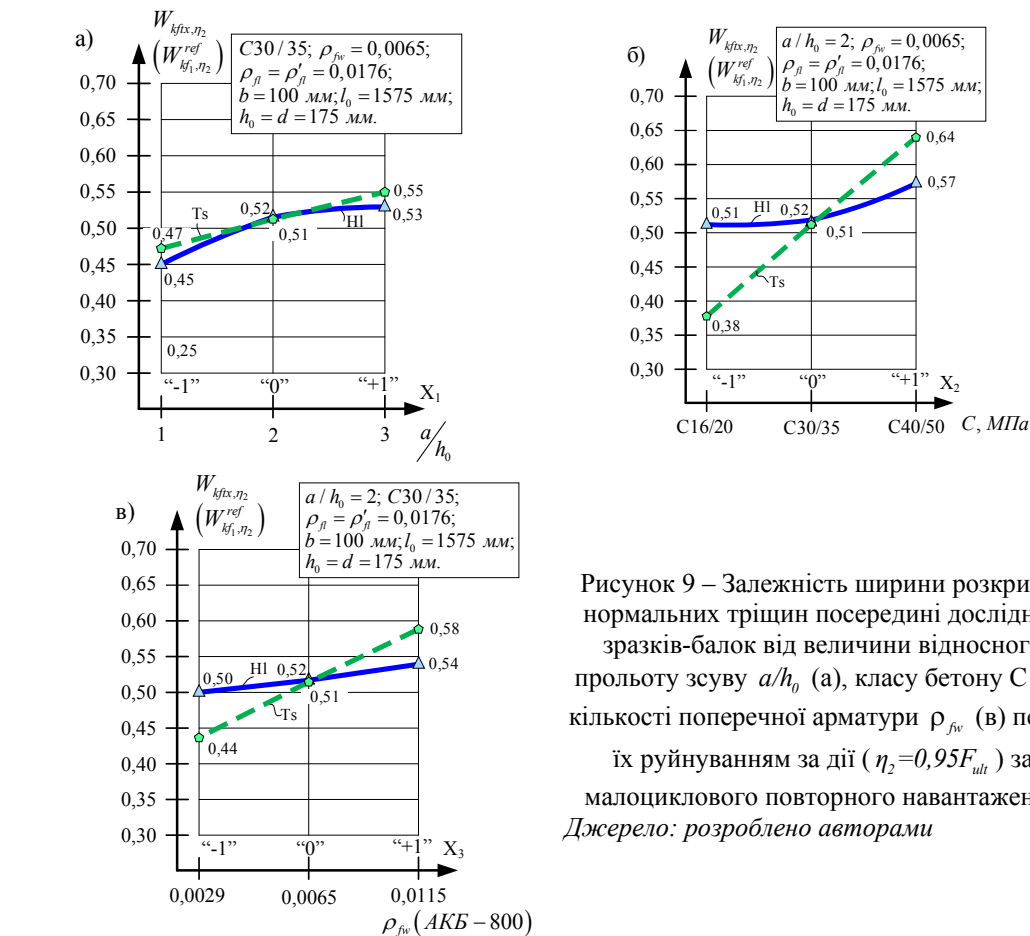


Рисунок 9 – Залежність ширини розкриття нормальних тріщин посередині дослідних зразків-балок від величини відносного прольоту зсуву  $a/h_0$  (а), класу бетону  $C$  (б), кількості поперечної арматури  $\rho_{fv}$  (в) перед їх руйнуванням за дії ( $\eta_2 = 0,95F_{ult}$ ) за малоциклового повторного навантаження  
Джерело: розроблено авторами

Вплив конструктивних чинників на обох рівнях є позитивним: з їхнім збільшенням ширина розкриття нормальних тріщини збільшувалася. При цьому, найбільший вплив мав клас бетону (відповідно, 57 і 51 %) в еталонних балках. Такий вплив дослідних чинників на даний вихідний параметр є прогнозованим. Характерно, що залежності (16) і (18) є нелінійними і відповідають збільшеним на коефіцієнт зміцнення  $k_{fx/f}^{amp}$  навантаженням.

### Висновки:

1. Проведені експериментально-теоретичні дослідження підтвердили доцільність та можливість використання фіброармованих пластиків (CFRP) для підсилення зовнішніх пошкоджених силовими тріщинами і доведених до граничних станів за першою (ULS) та другою (SLS) групами армованих конструкцій за встановленою технологією [14]. При цьому збільшення міцнісних характеристик дослідних зразків-балок відбувалося за рахунок більш повного комплексного використання міцнісних і деформативних властивостей фібропластикових композитів, зокрема вуглепластикового полотна і базальтопластикової арматури, а також стиснутого бетону.

2. Максимальні деформації крайніх фібр стиснутого бетону дослідних базальтобетонних балок при експлуатаційному рівні навантаження  $\varepsilon_{cfx}^{\eta_1}$ , знаходилися на дочірній ділянці діаграми деформування « $\sigma_c - \varepsilon_c$ » і коливання в межах  $(90...130) \cdot 10^{-5}$ , а перед руйнуванням –  $(140...174) \cdot 10^{-5}$ . Після підсилення пошкоджених балок вуглепластиком вказані деформації бетону при рівнях їх навантаження  $\eta_1 = 0,65F_{ult}$  і  $\eta_2 = 0,95F_{ult}$  змінювалися відповідно, від  $(147...267) \cdot 10^{-5}$  до  $(169...301) \cdot 10^{-5}$  і розташовувалися як у вершині зазначеної діаграми, так і на її низпадній ділянці. При цьому, найбільш впливовим виявився чинник  $X_1$ , (відносний проліт зрізу  $a/h_0$ ): зі збільшенням  $a/h_0$  від 1 до 3  $\varepsilon_{cfx}^{\eta_1}$  збільшувалися на 39%, а  $\varepsilon_{cfx}^{\eta_2}$  – на 34%.

3. При експлуатаційному рівні навантаження ( $\eta_1$ ) максимальні деформації розтягнутої арматури  $\varepsilon_f^{\eta_1} = (402...711) \cdot 10^{-5}$ , а перед руйнуванням дослідних зразків  $\varepsilon_f^{\eta_2}$  змінювалися в межах  $(547...1039) \cdot 10^{-5}$ . Відповідні відносні деформації зовнішнього фіброармованого вуглепластика становили:  $\varepsilon_{fx}^{\eta_1} = (479...840) \cdot 10^{-5}$  і  $\varepsilon_{fx}^{\eta_2} = (659...1229) \cdot 10^{-5}$ . При цьому, найбільший вплив на вказані деформації мав також відносний проліт зрізу ( $a/h_0$ ). При його збільшенні від 1 до 3 вказані вихідні параметри збільшувалися, відповідно, на 40...40 % на рівні малоциклового навантаження  $\eta_1$  і 50...40 % при  $\eta_2$ .

4. Характер деформацій бетону, розтягнутої базальтопластикової арматури і зовнішнього фіброармованого вуглепластика відповідав гіпотезі плоских перерізів (Бернуллі). У балках з великими ( $a/h_0 = 3$ ) і середніми ( $a/h_0 = 2$ ) прольотами зрізу нормальні перерізи в зонах “чистого згину” виявилися майже збалансованими і їхнє руйнування відбувалося при одночасному досягненні закритичних деформацій у бетоні стиснутої зони та у фіброармованому вуглепластику.

5. Разом з підвищенням несучої здатності, в середньому, на 36% підсиленних вуглепластиковим полотном пошкоджених силовими тріщинами дослідних зразків-балок їхні прогини збільшувалися на 13 % при експлуатаційному рівні ( $\eta_1$ ) і на 17% - перед руйнуванням ( $\eta_2$ ). При цьому, середні прогини при  $\eta_1$  досягають  $l_0/140$ , а при  $\eta_2 - l_0/95$ .

## Список літератури

1. I. Karpiuk, D. Danilenko, V. Karpiuk, A. Danilenko, T. Lyashenko Bearing capacity of damaged reinforced concrete beams strengthened with metal casing. *Acta Polytechnica*. 61(6):703–721, 2021. <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/7020>
2. R.J. Abed, M.A. Mashrei, A.A. Sultan Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer using different strengthening techniques. *Advances in Structural Engineering*. Vol. 25(2), 355-373, 2022. <https://doi.org/10.1177/13694332211049992>
3. Hamed Jafarzadeh, Mahdi Nematzadeh, Flexural strengthening of fire-damaged GFRP-reinforced concrete beams using CFRP sheet: Experimental and analytical study. *Composite Structures*, Vol. 288, 115378, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115378>
4. Mohammad A. Alhassan, Rajai Z. Al-Rousan, Ibrahim S. Alomari, Layla Amaireh, Shear response of RC beams encompassing hybrid CFRP strips and steel stirrups: Beam depth effect. *Structures*, Vol. 38, 781–796, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.043>
5. Ahmed S.D. AL—Ridha, Kamal Sh. Mahmoud, Ali F. Atshan, Effect of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates on behaviour of flexural strength of steel beams with and without end anchorage plates. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 49, Part 7, 2778-2785, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.313>
6. Zhang Jiawei, Li Hang, Liu Shengwei, Zhang Xiangyan, Yang Chenghong, Zhang Rongling, Bond behavior of the CFRP-concrete interface under combined sustained load and sulfate erosion. *Structures*. Vol. 35, 551-564, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.029>
7. Jamal A. Abdalla, Rami A. Hawileh, Hayder A. Rasheed, Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure using Externally Bonded Aluminum Alloy Plates, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 37, 652—659, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.134>
8. Zhen—wen Zhang, Zi—hua Zhang, Xuan Wang, Chun—heng Zhou, Dynamic and static interfacial bonding properties of CFRP—concrete subjected to freeze—thaw cycles. *Structures*. Vol. 37, 947-959, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.049>
9. Azer Maazoun, Stijn Matthys, Oussama Atoui, Bachir Belkassem, David Lecompte, Finite element modelling of RC slabs retrofitted with CFRP strips under blast loading, *Engineering Structures*, Vol. 252, 113597, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113597>
10. Alan Saeed Abdulrahman, Mohamed Raouf Abdul Kadir, Behavior and flexural strength of fire-damaged high-strength reinforced rectangular concrete beams with tension or compression zones exposed to fire repaired with CFRP sheets, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 15, 2021, e00779, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00779>
11. Y. Blikharskyy, R. Khmil, and Z. Blikharskyy, Research of RC columns strengthened by carbon FRP under loading, in MATEC Web of Conferences, 2018, vol. 174, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817404017>
12. Karpiuk V., Tselikova A., Khudobych A., Karpiuk I., Kostyuk A. Study of strength, deformability property and crack resistance of beams with BFRP. *Eastern - European journal of enterprise technologies*. Харків, Vol. 4/7 (106), 42-53, 2020. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/209378/211998>
13. K. V. Karpiuk, Yu. Syomina., D. Antonova Calculation Models of the Bearing Capacity of Span Reinforced Concrete Structures Support Zones. *Materials Science Forum: Actual Problems of Engineering Mechanics*. Vol. 968, 209-226, 2019. <https://www.scientific.net/MSF.968.209>
14. Organization Standard. Reinforcement of reinforced concrete structures with Sika® composite materials. STO13613997-001-2011. Moscow: TsNIIPromzdaniy OJSC, Zika.

## References

1. Karpiuk, I. , Danilenko, D. , Karpiuk, V. , Danilenko, A. & Lyashenko, T. (2021). Bearing capacity of damaged reinforced concrete beams strengthened with metal casing. *Acta Polytechnica*, 61(6). P. 703–721, <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/7020> [in English].
2. Abed, R.J. , Mashrei, M.A. & Sultan, A.A. (2022). Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer using different strengthening techniques. *Advances in Structural Engineering*. Vol. 25(2), 355 - 373, <https://doi.org/10.1177/13694332211049992> [in English].
3. Hamed Jafarzadeh, Mahdi Nematzadeh, (2022). Flexural strengthening of fire—damaged GFRP—reinforced concrete beams using CFRP sheet: Experimental and analytical study. *Composite Structures*, Vol. 288, 115378. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115378> [in English].
4. Mohammad A. Alhassan, Rajai Z. Al-Rousan, Ibrahim S. Alomari & Layla Amaireh. (2022). Shear response of RC beams encompassing hybrid CFRP strips and steel stirrups: Beam depth effect.

- Structures*, Vol. 38, 781-796, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.043> [in English].
5. Ahmed S.D. AL-Ridha, Kamal Sh. Mahmoud & Ali F. Atshan, (2022). Effect of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) laminates on behaviour of flexural strength of steel beams with and without end anchorage plates, *Materials Today. Proceedings*, Vol. 49, Part 7, 2778-2785, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.313> [in English].
  6. Zhang Jiawei, Li Hang, Liu Shengwei, Zhang Xiangyan, Yang Chenghong & Zhang Rongling (2022). Bond behavior of the CFRP-concrete interface under combined sustained load and sulfate erosion. *Structures*, Vol. 35, 551-564, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.11.029> [in English].
  7. Jamal A. Abdalla, Rami A. Hawileh & Hayder A. Rasheed (2022). Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure using Externally Bonded Aluminum Alloy Plates. *Procedia Structural Integrity*, Vol. 37, 652-659, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.134> [in English].
  8. Zhen—wen Zhang, Zi-hua Zhang, Xuan Wang, Chun-heng Zhou. (2022). Dynamic and static interfacial bonding properties of CFRP–concrete subjected to freeze–thaw cycles. *Structures*, Vol. 37, 947—959, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.049> [in English].
  9. Azer Maazoun, Stijn Matthys, Oussama Atoui, Bachir Belkassem & David Lecompte. (2022). Finite element modelling of RC slabs retrofitted with CFRP strips under blast loading. *Engineering Structures*, Vol. 252, 113597, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113597> [in English].
  10. Alan Saeed Abdulrahman & Mohamed Raouf Abdul Kadir. (2021). Behavior and flexural strength of fire-damaged high-strength reinforced rectangular concrete beams with tension or compression zones exposed to fire repaired with CFRP sheets. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 15, e00779, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00779> [in English].
  11. Blikharskyy, Y., Khmil, R. & Blikharskyy, Z. (2018). Research of RC columns strengthened by carbon FRP under loading. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 174, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817404017> [in English].
  12. Karpiuk, V., Tselikova, A., Khudobych, A., Karpiuk, I. & Kostyuk, A. (2020). Study of strength, deformability property and crack resistance of beams with BFRP. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. Vol. 4/7 (106), 42-53, <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/209378/211998> [in English].
  13. Karpiuk, K.V., Syomina, Yu. & Antonova, D. (2019). Calculation Models of the Bearing Capacity of Span Reinforced Concrete Structures Support Zones. *Materials Science Forum: Actual Problems of Engineering Mechanics*. Vol. 968, 209 - 226, <https://www.scientific.net/MSF.968.209> [in English].
  14. Organization Standard. Reinforcement of reinforced concrete structures with Sika® composite materials. STO13613997-001-2011. Moscow: TsNIIPromzdaniy OJSC, Zika [in English].

**Irina Karpiuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Vasily Karpiuk**, Prof., DSc., **Anatoly Kostyuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Roman Hlibotskyi**, post-graduate, **Oleksandr Posternak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, Ukraine*

### **Deformability and Crack Resistance of Damaged beams with Basalt-plastic Reinforcement Reinforced WITH carbon-Plastic Sheet**

The aim of this article is to introduce the results of experimental and theoretical studies on the deformability and crack resistance of damaged concrete beams reinforced with basalt-plastic reinforcement and strengthened with carbon-fiber jackets in the support regions.

The paper presents the results of studies of the deformability and crack resistance of basalt-concrete beams, brought to the boundary state (ULS) in previous tests, reinforced with external fiber-reinforced plastic (CFRP). These data are presented in the form of experimental statistical relationships of the main parameters of the performance of the prototypes from design factors and levels of low-cycle repeated load. The greatest influence on the deformability of materials and test samples - damaged basalt concrete beams, reinforced with carbon fiber, have: the value of the relative span of the cut ( $a/h_0$ ), then - the class of concrete (C) and, finally, the coefficient of transverse reinforcement ( $\rho_{fv}$ ) of their supporting areas.

The conducted experimental and theoretical studies confirmed the expediency and possibility of using fiber-reinforced plastics (CFRP) for strengthening external structures damaged by force cracks and brought to limit states according to the first (ULS) and second (SLS) groups of reinforced structures according to the established technology.

**damaged basalt concrete beams, reinforcement of supporting areas with carbon fiber shirts, reinforcement of the lower stretched zones with carbon plastic sheets, deformability of concrete, reinforcement and fiber-reinforced plastic, crack resistance of beams, experimental and statistical dependencies**

*Одержано (Received) 20.02.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 16.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*



**В.А. Пашинський**, проф., д-р техн. наук, **М.В. Пашинський**, канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*  
*e-mail: pva.kntu@gmail.com*

## Методика визначення кліматичних навантажень за даними регіональної мережі метеостанцій

Методика визначення навантажень і впливів на будівельні конструкції за даними локальної мережі метеостанцій удосконалена шляхом уведення запасів, що враховують випадковий розкид даних найближчих метеостанцій. Визначені доцільні розміри локальної мережі метеостанцій. Обґрунтована можливість відображення територіальної мінливості характеристичних значень снігового та вітрового навантаження рівняннями площини, єдиними для усієї території області. У якості прикладу отримані такі рівняння для п'яти областей України.

**кліматичні навантаження, метеорологічні дані, територіальні зміни**

**Постановка проблеми.** При проектуванні несучих будівельних конструкцій враховуються навантаження від снігу, вітру, ожеледі, а також вплив температури повітря. Характеристичні значення цих навантажень встановлені за результатами спостережень на метеостанціях та представлені в ДБН В.1.2-2:2006 "Навантаження і впливи" у вигляді карт територіального районування. Для деяких територій ці карти створюють значні запаси, а в окремих випадках занижують характеристичні значення навантажень. З метою уточнення навантажень, особливо при розрахунках конструкцій, що перебувають в експлуатації, підлягають відновленню чи ремонту, доцільно визначати характеристичні значення кліматичних навантажень за даними метеостанцій, розташованих поблизу від будівельного об'єкта.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомі способи територіального районування, а також визначення розрахункових параметрів навантажень і впливів в заданій географічній (проектній) точці за даними найближчих метеостанцій проаналізовані в роботах [1...4]. Показано, що використання даних однієї метеостанції, розміщеної поблизу проектною точки, дає значні випадкові похибки. Проаналізований в [5] метод площинної інтерполяції дає значний розкид результатів унаслідок суб'єктивного вибору інтерполяційного трикутника. Використання дисперсійного аналізу для прийняття рішення щодо можливості об'єднання даних декількох найближчих метеостанцій вимагає наявності вибірок даних або їх статистичних характеристик, що не завжди можливо. Проаналізований в [2, 8] метод згладжування характеристичних значень навантаження з експоненціальною ваговою функцією, яка зменшує значимість метеостанцій по мірі віддалення від проектною точки, дає достатньо точні та стійкі результати. Його недоліком є необхідність виконання досить громіздких обчислень для кожної нової проектною точки.

Метод площинної апроксимації, запропонований в [6], базується на наближеному відображенні територіальних змін розрахункового параметра в околі проектною точки рівнянням площини. Ця площина проводиться методом найменших квадратів з урахуванням даних усіх метеостанцій, достатньо близьких до проектною точки. У статті [7] виявлена можливість використання однієї апроксимуючої площини для визначення розрахункових параметрів температури повітря для усієї території

Кіровоградської області. Такий підхід істотно спрощує проєктні розрахунки, оскільки коефіцієнти апроксимуючої формули визначаються один раз, а необхідні кліматичні параметри для довільної точки області обчислюються за вже відомим рівнянням площини з наперед визначеними коефіцієнтами. Актуальними залишаються питання методики формування локальної мережі метеостанцій, забезпечення необхідних запасів та аналізу точності визначення навантажень за єдиним для усієї території області рівнянням площини.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає в адаптації методу площинної апроксимації для визначення характеристичних значень ваги снігового покриву та вітрового тиску в проєктній точці за даними локальної мережі метеостанцій. При цьому необхідно розробити спосіб забезпечення заданих запасів визначення характеристичних значень, а також проаналізувати можливість використання єдиного рівняння площини для усієї території кожної з адміністративних областей України.

**Виклад основного матеріалу.** Початкові дані для дослідження запозичені з роботи [8], де вони використовувалися для територіального районування України за характеристичними значеннями снігового та вітрового навантаження. Метеорологічна мережа охоплює метеостанції, розміщені на висоті до 340 м над рівнем моря. Для кожної з 172 рівнинних метеостанцій наявні характеристичні значення ваги снігового покриву  $S_0$  та вітрового тиску  $W_0$ , що відповідають періоду повторюваності 50 років.

Суть запропонованого в [6] методу площинної апроксимації полягає в тому, що тенденція територіальних змін навантаження наближено описується площиною, побудованою методом найменших квадратів за даними метеостанцій, розміщених поблизу проєктної точки. Характеристичне значення  $S_0$  чи  $W_0$  для обраної проєктної точки обчислюються з рівняння апроксимуючої площини, яка відображає зміни навантаження в околі проєктної точки. В роботах [5, 6, 7] це рівняння представлене в узагальненому вигляді

$$Z = A + B \cdot X + C \cdot Y, \quad (1)$$

де  $X$ ,  $Y$  – географічні координати проєктної точки чи метеостанції (східна довгота й північна широта в градусах);

$A$ ,  $B$ ,  $C$  – коефіцієнти, визначені методом найменших квадратів.

Визначення коефіцієнтів  $A$ ,  $B$ ,  $C$  реалізоване в середовищі Microsoft Excel з використанням функції "Пошук рішення". У якості цільової функції використовується сума квадратів відхилень характеристичних значень для усіх метеостанцій, включених до локальної мережі, від апроксимуючої площини (1). Розроблений розрахунковий бланк містить базу даних з обраного навантаження для усіх 172 рівнинних метеостанцій України, засоби для формування локальної мережі метеостанцій в околі обраної проєктної точки та формули для обчислення характеристичного значення навантаження в проєктній точці за результуючим рівнянням (1).

На результат визначення характеристичних значень навантаження в заданій проєктній точці істотно впливає розмір локальної мережі метеостанцій. Очевидно, що збільшення радіуса охоплення метеостанцій підвищує достовірність результату площинної апроксимації за рахунок зростання обсягу врахованих метеорологічних даних. З іншого боку, на території значного розміру тенденція територіальних змін навантаження може істотно відхилитися від площини, що призведе до зростання похибок при використанні рівняння (1).

Раціональний розмір локальної мережі метеостанцій для обчислення характеристичних значень снігового й вітрового навантаження встановлено таким же чином, як і при дослідженні параметрів температури повітря в роботі [7]. Для аналізу

обрані три проєктні точки з різних географічних зон України, а саме: Лубни Полтавської області, Нижні Сірогози Херсонської області та Ямпіль Хмельницької області. Для кожного з цих міст виконані обчислення характеристичних значень снігового та вітрового навантаження методом площинної апроксимації при значеннях радіуса зони локальної мережі: 50, 75, 100, 150, 200 км. Зростання кількості врахованих метеостанцій при збільшенні радіуса зони локальної мережі відображене в таблиці 1. В таблиці відсутні характеристичні значення навантажень та показники точності їх визначення для проєктної точки Нижні Сірогози при радіусі зони локальної мережі 50 км, бо в таку зону потрапили лише дві метеостанції, за даними яких неможливо провести апроксимуючу площину.

Таблиця 1 – Зведені результати розрахунків з визначення снігового навантаження

Навантаження	Радіус локальної мережі, км	Кількість врахованих метеостанцій			Характеристичні значення, Па			Показники точності		
		Ямпіль	Лубни	Нижні Сірогози	Ямпіль	Лубни	Нижні Сірогози	Ямпіль	Лубни	Сірогози
Снігове	50	3	3	2	1236	2125		6,18	0,02	
	75	4	7	3	1272	1741	865	14,47	9,10	0,00
	100	10	9	8	1357	1694	812	15,18	13,08	12,07
	150	17	22	21	1328	1593	840	12,83	15,09	15,93
	200	31	36	31	1290	1593	851	14,34	12,75	17,69
Вітрове	50	3	3	2	418	312		2,74	4,33	
	75	4	7	3	418	314	517	2,38	11,11	15,17
	100	10	9	8	425	311	429	9,45	10,03	18,74
	150	17	22	21	412	323	405	13,26	14,99	16,93
	200	31	36	31	397	324	407	14,30	16,66	18,62

Джерело: розроблено авторами

За даними таблиці 1 на рисунку 1 побудовані залежності характеристичних значень снігового й вітрового навантажень від радіуса зони локальної мережі метеостанцій. При малих розмірах локальної мережі метеостанцій характеристичні значення можуть бути достатньо випадковими, а при радіусі зони локальної мережі у 100...150 км вони явно стабілізуються.

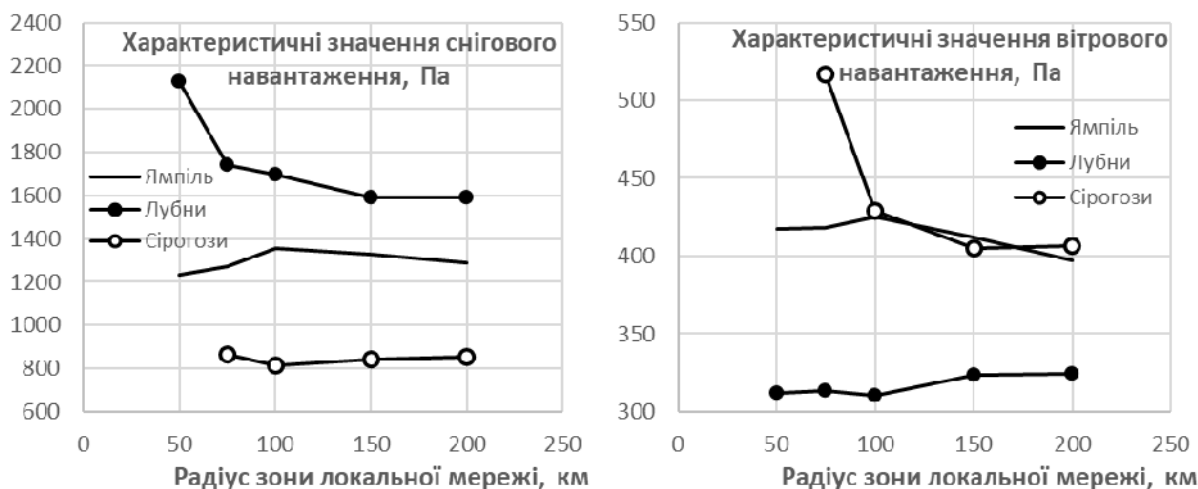


Рисунок 1 – Залежності характеристичних значень кліматичних навантажень від радіуса зони локальної мережі метеостанцій

Джерело: розроблено авторами

Узагальненим показником точності площинної апроксимації є стандарти відсотків відхилень характеристичних значень навантажень, обчислених за формулою (1), від фактичних даних для кожної метеостанції з локальної мережі. З таблиці 1 видно, що при малих розмірах локальної мережі похибки апроксимації є незначними і навіть можуть бути нульовими у випадку використання лише трьох метеостанцій, коли площина (1) проходить точно за наявними даними. З ростом локальної мережі відхилення фактичних даних від апроксимуючої площини (1) істотно зростають. При радіусі зони локальної мережі 100...150 км стандарти похибок апроксимації практично стабілізуються на рівні 13...19%.

Проведений аналіз дозволяє за наявною мережею із 172 метеостанцій України для визначення характеристичних значень снігового та вітрового навантаження рекомендувати використання локальних мереж метеостанцій, розміщених у зоні з радіусом 100...150 км довкола проектної точки. В роботі [7], де аналогічним способом досліджувалися параметри температури повітря, рекомендовано формувати локальні мережі з метеостанцій, розміщених в радіусі 200...250 км від проектної точки. Таку відмінність можна пояснити різною щільністю базової мережі метеостанцій. У нашому дослідженні використано дані 172 метеостанцій на території України, а в роботі [7] – 57 метеостанцій, дані для яких наявні в стандарті з будівельної кліматології [9]. Зменшення радіуса зони локальної мережі в 1,7...2,0 рази зменшує охоплену площу в 3...4 рази, що приблизно відповідає відношенню загальної кількості метеостанцій  $172 / 57 = 3,0$ . Отже, вирішальним фактором для вибору розміру локальної мережі метеостанцій можна вважати кількість врахованих метеостанцій.

Описана вище процедура площинної апроксимації реалізує метод найменших квадратів, а тому приблизно для половини метеостанцій результати площинної апроксимації (1) забезпечують запас надійності, а для іншої половини ці результати є меншими від фактичних даних метеостанцій. Карти територіального районування в нормах [10] розробленні таким чином, щоб районні характеристичні значення навантажень перевищували фактичні дані переважної більшості метеостанцій. В [11] показано, що забезпеченість територіального районування кліматичних навантажень в ДБН [10] (частка метеостанцій, для яких районні характеристичні значення перевищують фактичні дані) складає 0,7...0,9. Отже, районні значення кліматичних навантажень встановлені в запас надійності для 70...90% метеостанцій.

Для забезпечення аналогічних запасів при використанні методу площинної апроксимації слід урахувати випадковий розкид даних окремих метеостанцій відносно апроксимуючої площини. Апроксимуючу площину (1) потрібно підняти на величину імовірного перевищення осередненого навантаження, що дає наступну залежність:

$$Z = A + B \cdot X + C \cdot Y + t_{\beta} \cdot S_B, \quad (2)$$

де  $t_{\beta}$  – аргумент функції нормального розподілу, що відповідає заданій забезпеченості  $\beta$  результату визначення навантаження (зокрема, при  $\beta = 0,9$   $t_{\beta} = 1,28$ );

$S_B$  – стандарт вибірки відхилень фактичних даних метеостанцій від площини (1), який можна отримати через цільову функцію апроксимації, рівну сумі квадратів відхилень фактичних даних від апроксимуючої площини (1).

В середовищі Microsoft Excel розроблено розрахунковий бланк для визначення характеристичних значень снігового та вітрового навантажень (ваги снігового покриву та максимального тиску вітру) в довільній географічній точці України за наявними даними для 172 рівнинних метеостанцій. Для цього необхідно задати географічні координати (східну довготу та північну широту в градусах) проектної точки, сформувати локальну мережу метеостанцій та виконати обчислення коефіцієнтів рівняння апроксимуючої площини (2) з використанням функції "Пошук рішення".

Розроблена методика використана для отримання рівнянь типу (2), які описують територіальну мінливість характеристичних значень ваги снігового покриву та максимального тиску вітру на території п'яти адміністративних областей України. З метою отримання рівнянь, які описують зміни снігового та вітрового навантаження по усій території області, проектні точки вибрані приблизно в центрах цих областей. Радіус зони локальної мережі, рівний 150 км, дозволив повністю охопити території кожної з областей та додатково врахувати дані найближчих метеостанцій. Наведені в таблиці 2 результати виконаних обчислень для кожної з областей містять: кількість метеостанцій  $N$  в локальній мережі, коефіцієнти  $A$ ,  $B$ ,  $C$  формул (1) і (2) та стандарти  $S_B$  відхилень характеристичних значень від апроксимуючої площини (1). В останніх стовпцях таблиці наведені показники запасів та точності формули (2): середній відсоток запасу  $M_{\Delta}$ , стандарт відсотків відхилень фактичних значень від площини (1), який характеризує імовірні похибки визначення характеристичних значень, а також фактична забезпеченість  $\beta$  прогнозних значень за формулою (2). Показники точності визначені відносно формули (2) при заданій забезпеченості районування  $\beta = 0,9$ .

Таблиця 2 – Результати площинної апроксимації характеристичних значень ваги снігового покриву та вітрового тиску

Навантаження	Області України	N	Коефіцієнти формули (2)				Показники запасу, %		
			A	B	C	$S_B$	$M_{\Delta}$	$S_{\Delta}$	$\beta$
Снігове	Волинська	11	0,2	139,4	-45,5	170,9	20,8	16,4	0,909
	Запорізька	15	0,0	126,2	-70,9	300,9	43,8	39,8	0,867
	Кіровоградська	20	-7063,3	-109,5	244,6	138,9	16,3	16,1	0,950
	Одеська	13	-0,3	-210,6	156,2	195,6	29,7	24,8	0,864
	Сумська	14	-0,3	-49,8	68,0	245,0	19,8	16,2	0,857
Вітрове	Волинська	11	0,0	-1,4	8,9	80,3	28,9	26,3	0,818
	Запорізька	15	-734,0	11,3	16,7	102,8	35,4	28,6	0,933
	Кіровоградська	20	2271,7	-0,2	-38,8	61,4	23,1	21,2	0,950
	Одеська	13	0,6	57,8	-28,2	59,2	21,5	18,2	0,864
	Сумська	14	0,6	-8,0	12,5	77,9	32,9	27,9	0,929

Джерело: розроблено авторами

З таблиці 2 видно, що середні запаси формули (2) в усіх випадках перевищують запаси карт територіального районування ДБН [10], які за даними [11] складають  $M_{\Delta} = 5,3\%$  для ваги снігового покриву та  $M_{\Delta} = 17,4\%$  для вітрового тиску. Фактично отримані рівні забезпеченості формули (2)  $\beta = 0,857...0,950$  близькі до заданого значення  $\beta = 0,9$ . Детальний аналіз результатів розрахунків показав, що формула (2) з коефіцієнтами з таблиці 2 може занижувати характеристичні значення навантажень для окремих метеостанцій в межах 10%.

Наведені в таблиці 2 стандарти  $S_{\Delta}$  відсотків відхилень фактичних даних від апроксимуючої площини вказують на можливий розкид даних та імовірні запаси формули (2). В роботі [8] показано, що для карти територіального районування ДБН [7] за вагою снігового покриву цей показник дорівнює  $S_{\Delta} = 17,4\%$ , а для карти районування за максимальним тиском вітру  $S_{\Delta} = 16,9\%$ . З таблиці 2 видно, що отримані стандарти  $S_{\Delta}$  в основному перевищують відповідні показники для карт ДБН [7]. Для снігового навантаження таке перевищення спостерігається в Запорізькій та в Одеській області, а для вітрового тиску – в усіх п'яти розглянутих областях України.

З метою зменшення розкиду даних та імовірних запасів зроблена спроба розділити територію Запорізької області на дві зони з різними географічними умовами. До південної приморської зони віднесені адміністративні райони: Веселівський, Мелітопольський, Якимівський, Приазовський, Приморський та Бердянський. Проектна точка для визначення коефіцієнтів формул (1) і (2) обрана поблизу с. Новоспаське. До північної зони віднесені усі інші 14 районів з проектною точкою поблизу с. Омельник. Радіус зони локальної мережі зменшено до 100 км. Результати виконаних обчислень наведені в таблиці 3, структура якої аналогічна таблиці 2.

Таблиця 3 – Результати площинної апроксимації характеристичних значень ваги снігового покриву та вітрового тиску в районах Запорізької області

Навантаження	Райони області	N	Коефіцієнти формули (2)				Показники запасу, %		
			A	B	C	$S_B$	$M_{\Delta}$	$S_{\Delta}$	$\beta$
Снігове	Північні	9	-0,3	-95,6	97,6	185,3	22,2	21,4	1,000
	Приморські	8	0,0	86,1	-43,3	145,9	20,1	18,2	0,875
Вітрове	Північні	9	0,6	113,2	-74,9	81,1	26,7	22,5	0,889
	Приморські	8	-9418,6	83,5	146,3	71,7	24,5	23,5	1,000

Джерело: розроблено авторами

Дані таблиці 3 вказують на істотне зростання точності апроксимації в результаті розділення території Запорізької області на дві зони. Стандарти відсотків відхилень  $S_{\Delta}$  дещо перевищують відповідні значення для карт районування ДБН [7], але стали явно меншими від значень з таблиці 2. Це вказує на можливість уточнення результатів площинної апроксимації за рахунок поділу територій адміністративних областей на зони з різними кліматичними умовами. З таблиці 2 видно, що такий поділ є найбільш актуальним для Запорізької та Одеської областей, на клімат південних частин яких впливає близькість моря.

#### Висновки:

1. Характеристичні значення кліматичних навантажень в заданій географічній точці можна обчислювати за рівнянням площини, яке встановлюється методом найменших квадратів за даними локальної мережі метеостанцій регіону та відображає тенденцію територіальних змін навантаження в околі обраної проектної точки. Розроблена методика дозволяє визначати характеристичні значення в запас надійності з заданою забезпеченістю.

2. Вирішальним фактором для вибору радіусу зони локальної мережі метеостанцій є кількість врахованих метеостанцій. Для використаної в дослідженні метеорологічної мережі із 172 метеостанцій на території України рекомендується формувати локальну мережу в радіусі 100...150 км від проектної точки.

3. На прикладі п'яти адміністративних областей з різних географічних зон України підтверджена можливість отримання розрахункових формул, які дозволяють визначати характеристичні значення навантажень для усієї території області. Зменшенню імовірних похибок визначення характеристичних значень навантажень сприяє поділ території області на частини з істотно різними кліматичними умовами.

4. За розробленою методикою можна встановити залежності для визначення характеристичних значень кліматичних навантажень і впливів для територій усіх адміністративних областей України.

## Список літератури

1. Regionalization of the climatic areas of Qazvin Province using multivariate statistical methods / Fatemeh Shahriar, Majid Montazeri, Mehdi Momeni, Alireza Freidooni . *Modern Applied Science* . 2015. Vol. 9, No 2. P. 123-138. URL : <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/view/44144> (дата звернення: 07.03.2023)
2. Analysis of Methods for Determining Climate Loads at a Specified Territory Point by Meteorological Data / Željko Kos\*, Viktor Pashynskiy, Yevhenii Klymenko, Mykola Pashynskiy . *Tehnički glasnik (Technical Journal)*. Vol. 14, No. 2, June 2020. P. 206-211. <https://doi.org/10.31803/tg-20191125075805>
3. Pashynskiy V.A., Pashynskiy M.V., Grynyova I.I. Zoning of characteristic values of climatic loads by the territory of Ukraine. International Itinerant Exhibition “RESEARCH IN BUILDING ENGINEERING EXCO’21”. Pp. 195-196
4. Пашинський М., Пашинський В. До вибору способу територіального районування кліматичних навантажень на будівельні конструкції . *Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022)* : зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнар. наук.-техн. конф. Полтава: НУПП ім. Юрія Кондратюка, 2022. С. 90–92. URL : [https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2022/mtk-cscs/zbirnik\\_tez\\_konf\\_XIV\\_CSCS-2022.pdf](https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2022/mtk-cscs/zbirnik_tez_konf_XIV_CSCS-2022.pdf) (дата звернення: 12.03.2023)
5. Пашинський М.В. Точність визначення кліматичних навантажень в заданій точці території методом інтерполяції за даними суміжних метеостанцій . *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури (ОДАБА)*. 2016. Вип. 61. С. 303-308.
6. Пашинський В.А., Карпушин С.О., Пашинський М.В. Методика визначення кліматичних навантажень в заданій географічній точці . *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури (ОДАБА)*. 2018. Вип. № 71. С. 68-72.
7. Семко В.О., Пашинський В.А., Джирма С.О., Пашинський М.В. Температурний режим експлуатації будівель на території Кіровоградської області . *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(32). С. 235-243.
8. Пашинський В.А., Філімоніхін Г.Б., Пашинський М.В. Районування характеристичних значень кліматичних навантажень на території України. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського*. 2018. Вип. 19. С. 88-100.
9. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 101 с.
10. ДБН В.1.2-2:2006. Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Київ: Мінбуд України, 2006. 59 с.
11. Пашинський М. В. Запаси територіального районування кліматичних навантажень в ДБН В.1.2-2:2006. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: зб. наук. праць*. 2017. Вип. 8. С. 202–209.

## References

1. Fatemeh Shahriar, Majid Montazeri, Mehdi Momeni & Alireza Freidooni (2015). Regionalization of the climatic areas of Qazvin Province using multivariate statistical methods . *Modern Applied Science*, Vol. 9, No 2, P. 123-138. Retrieved from: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/view/44144> [in English].

2. Željko Kos, Viktor Pashynskiy, Yevhenii Klymenko & Mykola Pashynskiy (2020). Analysis of Methods for Determining Climate Loads at a Specified Territory Point by Meteorological Data . *Tehnički glasnik (Technical Journal)*, Vol. 14, No. 2, June 2020. P. 206-211. Retrieved from <https://doi.org/10.31803/tg-20191125075805>
3. Pashynskiy, V.A., Pashynskiy, M.V. & Grynova, I.I. (2021). Zoning of characteristic values of climatic loads by the territory of Ukraine. International Itinerant Exhibition “RESEARCH IN BUILDING ENGINEERING EXCO’21”. Pp. 195-196 [English].
4. Pashynskiy, M. & Pashynskiy, V. (2022). Do vyboru sposobu terytorial'noho rayonuvannya klimatychnykh navantazhen' na budivel'ni konstruktsiyi [Choosing a method of territorial zoning of climatic loads on building structures] . Complex composite structures of buildings and structures under martial law (CSCS-2022) : XIV Mizhnar. nauk.-tekh. konf.( 20-22 chervnia 2022 r.) – XIV International Scientific and Technical Conference (Pp. 90–92). Poltava: NUPP. Retrieved from [https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2022/mtk-cscs/zbirnik\\_tez\\_konf\\_XIV\\_CSCS-2022.pdf](https://nupp.edu.ua/uploads/files/0/events/conf/2022/mtk-cscs/zbirnik_tez_konf_XIV_CSCS-2022.pdf) [in Ukrainian].
5. Pashynskiy, M. (2016). Tochnist' vyznachennya klimatychnykh navantazhen' v zadaniy tochtsi terytoriyi metodom interpolyatsiyi za danymy sumizhnykh meteostantsiy [The accuracy of determining climatic loads at a given point in the territory by the method of interpolation based on the data of adjacent weather stations]. *Visnyk ODABA – Bulletin of the OSACA, Issue 61*, 303-308 [in Ukrainian].
6. Pashynskiy, V. (2018). Metodyka vyznachennya klimatychnykh navantazhen' v zadaniy heohrafichnyy tochtsi [The method of determining climatic loads at a given geographical point] . *Visnyk ODABA – Bulletin of the OSACA, Issue 71*, 68-72 [in Ukrainian].
7. Semko, V., Pashynskiy, V., Dzhyrma, S. & Pashynskiy, M. (2019). Temperaturnyy rezhym ekspluatatsiyi budivel' na terytoriyi Kirovohrads'koyi oblasti [Temperature mode of operation of buildings in the territory of the Kirovohrad region] . *Tsentrāl'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences. Vol. 1 (32)*, 235-243 [in Ukrainian].
8. Pashynskiy, V, Filimonikhin, G. & Pashynskiy, M. (2018). Rayonuvannya kharakterystychnykh znachen' klimatychnykh navantazhen' na terytoriyi Ukrayiny [Zoning of characteristic values of climatic loads on the territory of Ukraine]. *Zbirnyk naukovykh prats' Ukrains'koho instytutu stalevykh konstruktsij imeni V. M. Shymanovs'koho – Collection of scientific works of the Ukrainian Institute of Steel Structures named after V. M. Shymanovsky, Issue 19*, 88-100 [in Ukrainian].
9. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiynykh vplyviv, vid pozhehzi. Budivel'na klimatolohiya [Protection against dangerous geological processes, harmful operational influences, and against fire. Building climatology]. (2010). *DSTU-N B V.1.1–27:2010*. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy , 101 p. [in Ukrainian].
10. Systema nadiynosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennya i vplyvy [System of reliability and safety in construction. Loads and influences]. (2006). *DBN V.1.2-2:2006*. Kyiv: Minbud Ukrayine, 59 p. [in Ukrainian].
11. Pashynskiy, M. (2017). Zapasy terytorial'noho rayonuvannya klimatychnykh navantazhen' v DBN V.1.2-2:2006 [Reserves of territorial zoning of climatic loads in DBN B.1.2-2:2006]. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi: zb. nauk. prats' – Modern technologies and calculation methods in construction: Collection of scientific works. Issue 8*, 202–209 [in Ukrainian].

**Victor Pashynskiy**, Prof., DSc., **Mykola Pashynskiy**, PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **Methods of Determining Climatic Loads According to the Data of the Regional Network of Weather Stations**

The work is devoted to the adaptation of the planar approximation method to determine the characteristic values of snow cover weight and wind pressure at a given design point based on the data of a local network of weather stations. Important elements of the research are the provision of specified reserves for the determination of characteristic values, as well as the analysis of the possibility of using a single equation for the entire territory of each of the administrative regions of Ukraine.

The initial data are characteristic values of snow cover weight and maximum wind pressure with a recurrence period of 50 years at 171 plain weather stations of Ukraine. According to the data of the weather stations of the region, the equation of the Euclidean plane is established by the method of least squares, which generally reflects the trend of territorial changes in the characteristic value of the load. Calculations for three project points from different geographical regions of Ukraine showed that the equations of the approximating Euclidean plane should be made taking into account the data of the local network of weather stations located within a radius of 100...150 km from the project point. Based on the obtained equation and the geographical coordinates of the design point, the desired characteristic value of the load is calculated. The necessary reserves



in determining the characteristic values of the loads are provided taking into account the statistical distribution of the data of individual weather stations relative to the obtained Euclidean plane. In order to substantiate the possibility of describing the trends of territorial changes in the characteristic values of snow and wind loads within the entire territory of the administrative region with a single equation of the Euclidean plane, calculations were made for five regions of Ukraine. The deviations obtained by this equation of the characteristic values of the loads from the actual data of individual weather stations are basically close to the similar deviations of the territorial zoning maps of the current DBN B.1.2-2:2006 "Loads and influences".

The results of the study confirmed the possibility of determining the characteristic values of climatic loads at a given geographic (design) point with a given level of security according to the equation of the Euclidean plane, which was established by the method of least squares based on the data of the local network of weather stations in the region. In most cases, this equation can be the same for the entire territory of the administrative region. The division of the territory of the region into parts with significantly different climatic conditions contributes to the reduction of probable errors in determining the characteristic values of loads.

**climatic loads, meteorological data, territorial changes**

*Одержано (Received) 20.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

## АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 631.31.02:621.793.927.5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.86-99](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.86-99)**М.І. Денисенко**, доц., канд. техн. наук*ВСП «Немішаївський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України», смт. Немішаєве, Бучанський р-н, Київська обл.  
e:mail:mdenisenko317@gmail.com*

## До питання відновлення та зміцнення деталей робочих органів ґрунтообробної техніки

Актуальність проблеми підвищення довговічності деталей сільськогосподарських машин з кожним роком зростає. Це пояснюється тим, що підвищуються вимоги до надійності і довговічності сільськогосподарської техніки, зокрема деталей робочих органів ґрунтообробних машин.

Екологічні і агротехнічні вимоги до технічних засобів механізації землеробства постійно зростають та вдосконалюються, особливо в царині показників, що визначають шкідливий вплив на ґрунти, у тому числі, на межі допустимого засмічення їх металом від прискороного зносу робочих органів, і попадання у ґрунти продуктів зношування.

**абразивне зношування, зносостійкі покриття, леміш плугу, лапа культиватора, диск борони, точкове зміцнення – дугове точкове зварення**

**Постановка проблеми.** В Україні розроблено 103 варіанти підготовки ґрунту і конструкцій робочих органів машин з врахуванням вирощуваних культур, їх попередників, рельєфу поля, вологості ґрунту у польовій і ґрунтозахисній сівозмінах. Системою диференційованого ґрунтовологозберігаючого обробітку передбачено використання таких типів робочих органів: диски сферичні і прямі, суцільні і вирізні голчасті; лапи культиваторні, плоско різальні і стрільчасті; лемішно-полицеві корпуси плугів для обробітку дрібної, середньої глибини, глибокої оранки, чизельні; борони посівні, пружинні та інші (всього 21 тип робочих органів і 13 варіантів їх сполучень). Так, для підготовки ґрунту під зернові культури використовують ґрунтообробні агрегати 60 найменувань.

Основний обробіток ґрунту – це система заходів спрямованих на утворення сприятливих умов для росту і розвитку культурних рослин та сприяння одержанню високих врожаїв. Основний обробіток ґрунту включає полиневу і безполицеву оранки, щільювання, лущення, дискування, чизелювання, культивацію, боронування, коткування і вирівнювання ґрунту. Деталі ґрунтообробних, садильних і посівних машин працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування. Зі зростанням величини зносу зростає відносна нерівномірність глибини ходу робочих органів. На всьому етапі зношування безперервно порушується та змінюється встановлена глибина обробки. В залежності від кількості обробленої площі (га) і типу ґрунтів, змінюються терміни зносу за вагою і геометричною формою.

Величезний об'єм сільськогосподарської продукції виробляється як крупними господарствами, так і більш дрібними фермерськими. У створеній економічній ситуації спостерігається стає зростання фермерських господарств; зростання площі ріллі під зернові та інші агротехнічні культури, що, безперечно породжує попит на робочі органи сільськогосподарських машин.

Наприклад, тільки господарства півдня та південного сходу України щорічно споживають більше 400 тисяч лап культиваторів і лемешів плугів, не рахуючи пропозиції по іншим робочим органам. Найбільш навантаженими поверхнями ґрунтообробних машин і агрегатів являються робочі органи: у плуга – леміш, у культиватора – лапи, у борін диски або зуб'я. Причиною їх передчасної відмови в основному є прискорене абразивне зношування, котре обумовлено взаємодією з твердими ( $HV$  8-11 ГПа) частинками, що є у ґрунті. До робочих органів сільськогосподарської техніки належать: лемеші плугів, відвали плугів, диски важких борін, лапи культиваторів і сівалок, та багато інших деталей робочих органів.

Треба також відмітити, що різання ґрунту є найбільш розповсюдженою технологічною операцією в агропромисловому комплексі: оранка, культивація, боронування, збирання зернових і технічних культур, ці операції складають не менше 70% всього об'єму механізованих робіт. В той же час, від технічного стану леза робочого органу сільськогосподарської техніки, залежать в першу чергу, такі показники роботи, як ступінь підрізання бур'янів, середня глибина культивації, стійкість ходу робочих органів за глибиною; їх забивання та прилипання на поверхні леза; тяговий опір робочих органів.

На крайці леза та носка утворюється фаска, котра негативно впливає на стійкість ходу робочих органів за глибиною, змінюється профіль носка, геометрія і ширина леза робочого органу. Затуплені лапи культиватора і лемеші плуга збільшують тяговий опір агрегатів, і тому суттєво зменшується продуктивність, при цьому витрати пального зростають на 15-20%. У зв'язку з нерівномірністю спрацювання ріжучих крайок, та інших поверхонь робочих органів сільськогосподарської техніки постає необхідність їх зміцнення та відновлення.

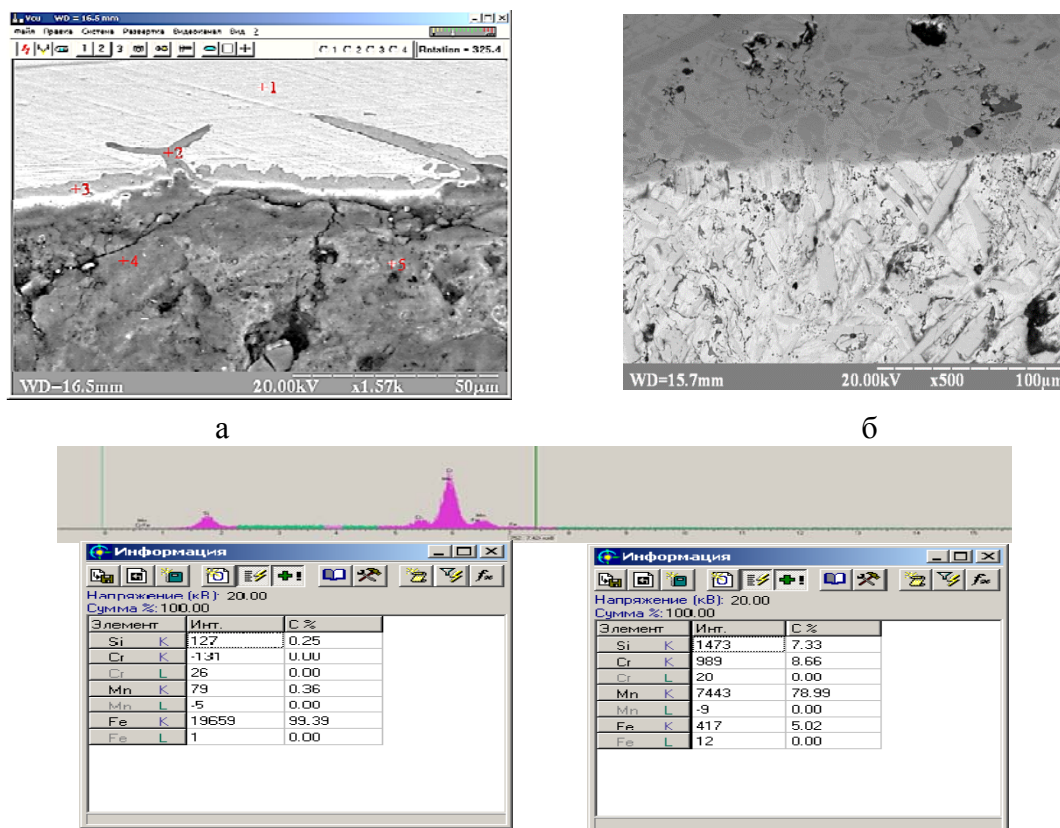
Крім того, робочі органи сільськогосподарських експлуатуються в умовах хімічно агресивного зовнішнього середовища, що зв'язано з додаванням у ґрунт різних добрив, і наявністю в ньому вологи. На знос деталей ґрунтообробних машин, що мають безпосередній контакт з абразивною масою, сильно впливає вологість ґрунту. Вологість, в залежності від типу ґрунтів, може як збільшити, так і зменшити знос. У сукупності ці фактори, чинять настільки сильний вплив на робочі органи сільськогосподарської техніки, що це робить їх непридатними до експлуатації практично через декілька годин інтенсивної роботи машин. Розроблена технологія модифікації деталей робочих органів ґрунтообробних машин з використанням крапкового зміцнення підвищує у 2-3 рази опір абразивному зношуванню їх робочих поверхонь, та здатна замінити інші зміцнюючі технології, тому що має високу продуктивність і багатократно зменшує енергоємність технологічного обладнання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При зношуванні деталей сільськогосподарських машин переважають процеси абразивного зношування декількох різновидів. Більшість робочих органів спрацьовується у контакті з ґрунтом, мінеральними добривами, рослинною масою і таке інше. В теперішній час, в агропромисловому комплексі підприємства зазнають економічних втрати від прискореного зносу робочих органів ґрунтообробної, зернозбиральної та посівної техніки.

Характерною особливістю зносу є не тільки порушення глибини обробки ґрунту, але й суттєве зростання тягового опору агрегату. У процесі роботи лемеші плугів, лапи культиваторів зазнають впливу статичних, циклічних, локальних і ударних навантажень, а також мінеральних частинок ґрунту, що визивають поламки та інтенсивне зношування робочої поверхні деталей. Найбільша величина зносу у лемешів спостерігається по лезу і носку, які сприймають найбільші контактні навантаження.

При абразивному спрацюванні часто спостерігаються окислювальні процеси. Вид поверхні тертя лапи культиватора, що зазнала абразивного зношування ґрунтовою масою, представлена на рисунку 1.

На поверхні, що контактує з робочим середовищем, присутні оксидні шари. Зовнішній шар, котрий не щільний, і має товщину від 4 до 10 мкм. Внутрішній шар (щільний), має нерівну границю з металом основи і товщину від 8 до 25 мкм. При цьому внутрішній окиснений шар потовщується у ділянці границь зерен.



а -основа; б- покриття твердим сплавом ПГ-С27

Рисунок 1 – Вид поверхні тертя від абразивного зношування – лапи культиватора

Джерело: розроблено автором

Хімічний склад внутрішнього окисного шару відповідає складу металевої основи, в той же час, як зовнішній шар збагачений алюмінієм, кремнієм, кальцієм. В деяких місцях, щільний окисний шар має товщину до 100 мкм, і не є однофазним. При цьому щільний шар складається з оксидів (з'єднань) заліза, окиснений шар утворюється на основі. Інтенсивність лінії заліза на не окисленому металі основи у середньому більше ніж у 2 рази більше, ніж на окисненому шарі (це свідчить про меншу кількість заліза в поверхневих шарах, і відповідає утворенню оксидних плівок).

Метал основи під окисним шаром. Середній хімічний склад виміряний на поверхні наплавленого металу показує, що поверхня збагачена хромом і збіднена кремнієм у порівнянні з матеріалом у перерізі покриття. При відновленні деталей плужних корпусів використовують різні види зносостійкого наплавлення, наприклад електродами Т-590, порошковими дротами типу ПП-АН125, ПП-АН170, ПП-АН192, ВЕЛТЕК-Н300-РМ, а також методи електроконтактного приварювання порошкових матеріалів або стрічки, методи напилювання з наступним оплавленням покриттів газовим полум'ям, плазмове наплавлення порошковими сплавами, електро імпульсне

нарощування та електроіскрове легування. На рівні експериментальних досліджень використовують процеси пайки та приклеювання твердих сплавів і металокераміки. [1, 2].

Як відомо, для виготовлення змінних деталей (лемішів, лап культиваторів, дисків борін) робочих органів використовуються конструкційні сталі 40, 40X, 65Г, Л53 і традиційні методи термічної обробки (загартування і відпуск). При цьому твердість поверхні тертя складає 39-48 HRC<sub>e</sub>, показник міцності не перевищує 900-1000 МПа. Але, як свідчить практика, така термообробка не дає суттєвого ефекту, і не виключає прямого руйнування їх ріжучої частини шляхом дряпання і мікрорізання кварцевими частками. Інтенсивність зношування таких деталей досягає 0,3 мм/км [3]. Терміни служби швидкозношуваних деталей визначають рентабельність машин і механізмів. Сучасні процеси інтенсифікації виробничих процесів зв'язані зі зростанням робочих тисків, швидкостей, температур і агресивних середовищ, що призводить до прискореного зносу деталей, а загальна тенденція автоматизації і роботизації ще більше піднімає проблему підвищення їх працездатності.

У промисловості і агропромислому комплексі витрачаються сотні тисяч тонн металу і велика кількість людської праці на виготовлення запасних частин і заміну швидкозношуваних деталей. Зношування деталей являється процесом руйнування їх поверхневого шару при абразивному терті, в результаті чого поступово змінюються їх розміри, геометрія і стан робочих поверхонь. Зі зростанням наробітку, стан зношуваних деталей безперервно змінюється і стає граничним за одним або декількома параметрами, що впливають на функціональні якості. Аналіз реальних об'єктів підтверджує, що незалежними є головним чином швидкозношувані деталі сільськогосподарських машин – їх робочі органи, інтенсивність зношування яких не залежить (або слабо залежить) від технічного стану інших деталей.

Основними факторами, що визначають інтенсивність зношування, являються активність зовнішнього впливу на поверхневий шар деталі, питомі навантаження, що діють на поверхні тертя, кінематика їх відносного руху. Перелік основних граничних станів робочих органів ґрунтообробних машин наведено у таблиці 1. Для всіх конструкцій робочих органів найбільш небезпечними є деформація або руйнування, а для ріжучих робочих органів – затуплення леза і утворення потиличної фаски (ділянки зносу) під від'ємним кутом до дна борозни. Профілі спрацьованого леза леміша плугу, лапи культиватора і аналогічних ґрунтообробних робочих органів необхідно розглядати у граничних станах.

Аналіз матеріалів, дисків борін, лемішів плугів та інших деталей ґрунтообробної техніки, що випускаються провідними закордонними фірмами (Lemken, Frank – Німеччина; Kuhn, Gregoire-Besson-Франція; Kverneland-Норвегія; Vogel & Noot – Австрія; Malmo-Данія та інші) показало, що у їх виробництві використовують низько- і середньовуглецеві боромісткі леговані і високолеговані сталі з твердістю 49-56 HRC [1].

Провідні світові виробники деталей і робочих органів, що експлуатуються в абразивному середовищі, також часто використовують поверхнєве зміцнення їх твердосплавними покриттями з твердістю 60 – 68 HRC [2]. Найбільш зносостійкі робочі органи до широкого спектру плугів виготовляють і використовують провідні європейські фірми: BELLOTA AGRISOLUTIONS (Іспанія), CHAPMANS LTD (торгова марка VULCAN), Великобританія; IQ PARTS ( PREMIUM PARTS), Австрія. Компанія Chaptmans Ltd, під торговою маркою ARMA, виготовляє леміші та долота з патентованим карбідним покриттям, методом напилення по колу, що дозволяє покрити деталь з усіх боків рівномірно, виключаючи переходи між твердими і м'якими шарами

металу у готовій деталі. Зносостійкість такої деталі набагато вища ніж у деталі, виготовленої методом сормайтового наплавлення, що має плавний перехід між твердими і м'якими шарами металу у виробі, і багато відкритих ділянок з шарами м'якого металу, при контакті яких з ґрунтом деталь швидко спрацьовується.

Таблиця 1 – Основні граничні стани робочих органів ґрунтообробних машин

Шифр стану	Зміна розмірів деталей при терті у ґрунті	Функціональні порушення, погіршення технічних та економічних показників	Робочі органи
ГС1	Деформація або руйнування	Втрата працездатності	Всі робочі органи
ГС2	Збільшення радіусу леза або вістря	Зниження ступеню підрізання шкідників, їх зависання; підвищення тягового опору	Лемеші, культиваторні лапи, ножі фрез
ГС3	Утворення потиличної фаски шириною S під від'ємним кутом до дна борозни	Нерівномірність ходу за глибиною; вигиблення робочих органів; погіршення структури ґрунту; пошкодження стерні; підвищення тягового опору	Лемеші, лапи, бритви, зуб'я борін, долота
ГС4	Лінійний знос по довжині деталі, Д	Зменшення глибини обробки і ширини захвату	Лемеші, носки, наральники
ГС5	Лінійний знос за шириною деталі, Ш	Зменшення глибини обробки, зростання нерівномірності, зниження міцності; пошкодження корпусних деталей	Лемеші, лапи, бритви
ГС6	Лінійний знос по товщині деталі, Т	Залипання ґрунту; погіршення оберту пласта та кришення ґрунту; підвищення тягового опору; зниження міцності	Лемеші, відвали
ЗС7	Зниження чистоти поверхні, порушення макрогеометрії, місцевий знос	Залипання ґрунтом; погіршення оберту пласта; підвищення тягового опору	Відвали

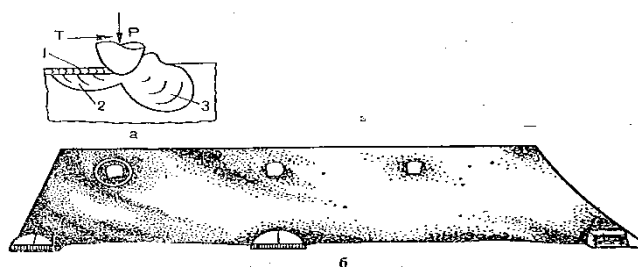
Джерело: [1]

Компанія VELES AGRO є виробником багатофункціональної сільськогосподарської ґрунтообробної і посівної техніки з високими стандартами якості, враховуючи сучасні та економічно ефективні технології, дозволяє підприємству своєчасно реагувати на тренди і поточні потреби агро-індустріального ринку, виконувати замовлення на створення нових зразків сільськогосподарської техніки. Технологія лиття дозволяє виготовляти деталі з мінімальними допусками на механічну обробку та використовувати суцільнолиті конструкції для комплектації готової техніки. Завдяки впровадженню технології обробки високоміцних сталей, значно збільшено

ресурс робочих органів ґрунтообробної техніки, що виготовляються з боровмістної сталі.

**Постановка завдання.** Таким чином, метою даного дослідження являється обґрунтування та розробка технологічного процесу відновлення і зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки, за якого утворюється пилкоподібний профіль поверхні тертя, що зберігається протягом усього терміну експлуатації, забезпечуючи ефективне різання навіть при зношених лезах.

**Виклад основного матеріалу.** Результати досліджень підтверджують, що зношування в абразивному середовищі залежить від великої кількості діючих факторів, і комплексно – поєднаних між собою робочих та службових параметрів. При абразивному зношуванні утворюються дві його форми: механічна і механохімічна з перевагою тієї або іншої, в залежності від властивостей матеріалу [11] (рис.2.).



1-пружнопластична ділянка; 2-ділянка розтягнення; 3-ділянка стиснення

Рисунок 2 – Схема руйнування поверхні при абразивному зносі (а) і вид леміша (б), що зазнає абразивного зносу

Джерело: [11]

В процесі роботи на поверхнях тертя безперервним потоком переміщуються абразивні частинки ґрунту, деформуючи поверхню та збільшуючи реакційну здатність мікрооб'ємів металів зони контакту. Активний метал поверхневих шарів миттєво взаємодіє з хімічно активними елементами середовища – киснем повітря та іншими окисниками. На поверхнях тертя спонтанно формується плівки вторинних структур (ВС). Дослідження механізму абразивного зносу показує, що його сутність має трійчасту (механо-фізико-корозійну) природу. Розподіл хімічних елементів за глибиною поверхневого шару леміша плуга показано на рис.3. Вміст досліджуваних елементів (в атомних процентах) змінюється зі збільшенням часу травлення поверхневих шарів деталі. Характерний ОЖЕ – спектр хімічного складу поверхневого шару леміша плугу на ділянці I (ділянка ВС) показано на рис.4.

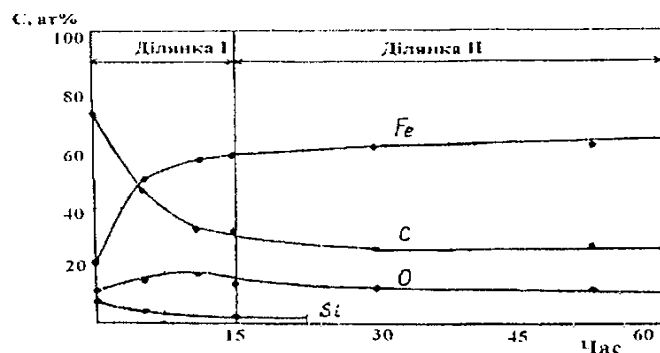


Рисунок 3 – Розподілення хімічних елементів у поверхневому шарі леміша плугу після експлуатації в залежності від часу травлення

Джерело: розроблено автором

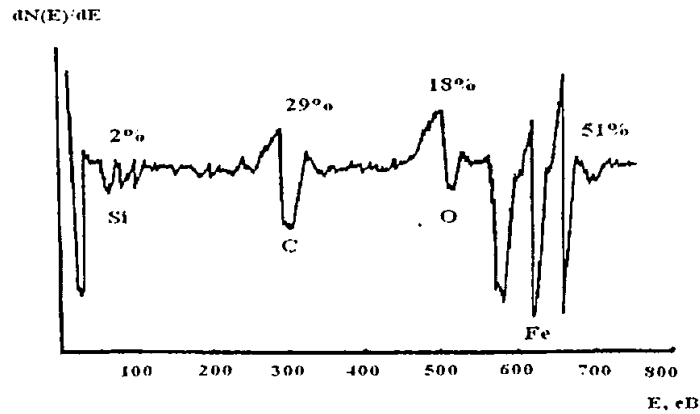


Рисунок 4 – ОЖЕ – спектр хімічного складу поверхневого шару (ділянка I) леміша плугу після експлуатації

*Джерело: розроблено автором*

В спектрі присутні лінії відповідні залізу, кисню, водню, кремнію. Інші елементи, що складають менше 0,5 ат.% не виявлено. Особливістю експлуатації ґрунтообробних, посівних і кормозбиральних машин є прямий контакт поверхонь тертя їх робочих органів безпосередньо з ґрунтом або продуктами рослинництва. Виявлені плями пластичної деформації і ознаки текучості металу за напрямком переміщення при абразивному терті. На поверхнях тертя робочих органів досліджених машин спостерігалися ефекти полірування.

Елементний зміст поверхневого шару (ділянка I) леміша плугу (час травлення до 10 хв) різко відрізняється від змісту основного об'єму сталі, з якої він виготовляється (ділянка II). Ділянка I, глибина якої складає до 0,1...0,2 мкм, представляє нову трансформовану фазу з різко зміненим елементним складом, утворену в результаті деформації і взаємодії зі середовищем у процесі експлуатації. Склад кисню на ділянці I збільшується. На поверхні вміст кисню становить 10%, на глибині до 0,1 мкм зростає до 18% [11].

В результаті взаємодії пластично - деформованих (текстурованих) поверхневих шарів металу з киснем повітря утворюються хімічно адсорбуючі плівки твердих розчинів або хімічні з'єднання металу з киснем. Видалення їх з поверхні тертя протікає як термодинамічний процес і відновлення оксидних плівок. Ділянка II (рис.3) характеризується незначною зміною концентрації кисню і вуглецю. Основою спектру є елементний вміст сталі з якої виготовлена деталь. Найбільш ефективним способом отримання лез високої довговічності і міцності є надання лезу робочого органу шарової будови з різною зносостійкістю шарів, що забезпечують стабілізацію працездатної геометрії шляхом прискореного зносу одного шару за повільного зносу другого шару (ефект самозагострювання) (рис. 5, 6, 7) [4, 5, 6,7].

Основними методами надання лезам робочих органів шарової будови для утворення самозагострювання являються: поверхнєве одностороннє загартування сталей, наплавлення твердих сплавів на низько вуглецеві і вуглецеві сталі, виготовлення деталей з двошарового прокату композицій сталь Л53+Х6Ф1, сталь Л53+Х12, сталь10+9ХФ та інші [8, с.306], термодифузійне легування та електролітичне хромування сталей. Найбільш доцільно і перспективне здійснення ремонту шляхом використання механізованого зварювання та наплавлення порошковим дротом у захисному газі і відкритою дугою.

Точкове зміцнення (дугове точкове зварення), ДТЗ в даній роботі використовуємо для підвищення деталей і робочих органів ґрунтообробних машин,



засновано на мікрокраплюванні твердого сплаву у поверхневу структуру деталей, що зазнають інтенсивного абразивного зносу [9,10]. Процес здійснюється за технологією, розробленою вченими Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України [10], сутність якої полягає у дуговому точковому зваренні (ДТЗ) на поверхню деталей локальних, спряжених і сумісних на величину до  $1/5 D_n$  – діаметра основи твердосплавних конусів проплавлення – крапок зміцнення (рис.5). Здійснено відпрацювання режимів та зміцнення експериментальної партії робочих органів на автоматизованій установці, використано для наплавлення зносостійких крапок вітчизняний порошковий дріт ПП – Нп – 80Х20РЗТ (ПП-АН170), твердість, HRC<sub>e</sub> 58-67 ; ПП – Нп – 150Х15РЗНЗ (ПП-АН170М), твердість HRC<sub>e</sub> 50-58; ПП-АН192, твердість HRC<sub>e</sub> 56-60. (рис.5.,6., 7., 8.); макрошліфи вирізані і підготовлені для визначення розмірів крапок зміцнення [6].

Відпрацьовані технологічні параметри процесу крапкового зміцнення дозволяють зменшити швидкість зношування, та збільшити терміни служби лез робочих органів, а також зменшити кількість наплавленого твердого сплаву у середньому на 50%.

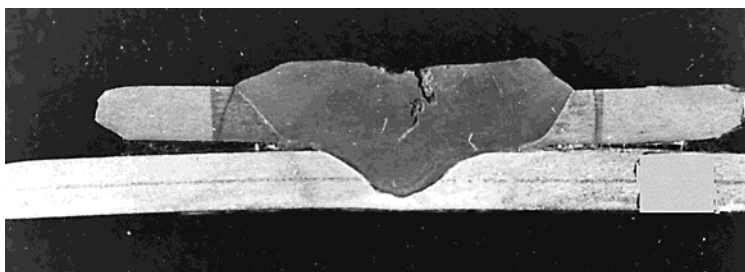


Рисунок 5 – Макрошліф зразка 1

*Джерело: розроблено автором*

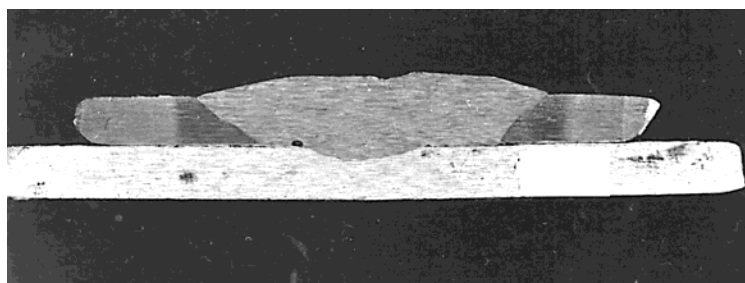


Рисунок 6 – Макрошліф зразка 2

*Джерело: розроблено автором*



Рисунок 7 – Макрошліф зразка 3

*Джерело: розроблено автором*

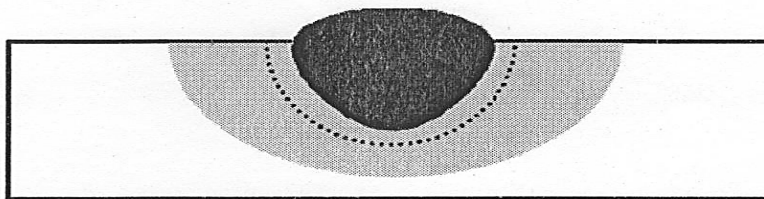


Рисунок 8 – Утворення твердості наплавленого валика на сталі Soldur 7001

Джерело: [12]

Зносостійкість робочих органів ґрунтообробної техніки і машин для приготування кормів: лап культиваторів і сівалок, долотоподібних лемішів, молотків кормодробарок та інших деталей, зміцнених індукційним сплавом ПГ-С27, і крапковим методом залежить від однорідності структури наплавленого шару і стану межі його розділу з основним металом. Ручне дугове наплавлення вкритими електродами (Manual metal arc welding (metal arc welding with covered electrode)); дугове наплавлення самозахисними порошковим дротом ( Self-shielded tubular-cored arc welding); вказані методи зварювання відомі у виробництві зварних конструкцій, але ще не мають широкого розвитку і використання.

Нами використовується технологія, заснована на армуванні поверхонь тертя робочих органів машин, в основу крапкового зміцнення встановлено ряд факторів: наявність ділянок термічного впливу забезпечують підвищення твердості поверхні контакту, тим самим збільшуючи її абразивну стійкість; наплавлені крапки виконують функцію бар'єрів, що сприяють проковзуванню абразивних часток (особливо кварцового піску), зменшуючи площу їх контактування з робочою поверхнею; створення «обмеженого» композитного середовища за рахунок різниці властивостей крапок зміцнення та ділянок між ними.

Відвал (полиця) плугу є однією з найбільш металоємних і дороговартісних деталей плугу. Відвал представляє собою вигнуту сталеву пластину, розташовану під кутом до стінки борозни. В процесі роботи відвалу корпусу плугу відбувається відрізання пласта ґрунту від стінки борозни, його деформування, зсув в сторону і обертання верхнього шару вниз. Ці деталі працюють в умовах абразивного зносу та зазнають ударів каміння. У вітчизняному сільськогосподарському машинобудуванні матеріалом для виготовлення відвалів корпусів плугів, в основному використовується низьковуглецева сталь марки Ст.2 або тришарова сталь. Відвали, виготовлені зі сталі Ст.2 треба цементувати на глибину 1,5...2,2 мм з наступним гартуванням до твердості HRC 50-62.

При використанні для виготовлення відвалів тришарової сталі, що має поверхнєві шари зі сталі 65Г і внутрішній шар зі сталі Ст.2. Основними методами зміцнення відвалів плугів є: ручне дугове наплавлення – суцільна, або у вигляді сітки; установка керамічних пластин; нанесення композиційних покриттів. Ручне дугове наплавлення в основному здійснюється електродами Т-590 і Т-620, змінного або постійного струму. Але велика ділянка термічного впливу, що утворюється при використанні цього методу, може привести до пропалювання крайок, викривленню поверхні відвалу, а також, від зменшення опору згину основного металу, до поламок відвалів.

Нами розроблена конструкція складового двошарового відвалу, на заміну тришарової сталі: матеріалами експериментальної полиці є пакет сталей, якісна конструкційна сталь 65Г (товщини 2,0...4,0 мм) – робоча частина корпусу плуга; конструкційна сталь Ст.3 (товщини 4,0...6,0 мм) – не робоча частина корпусу плуга.

Двошаровий пакет сталей експериментального відвалу з'єднуємо шляхом дугового точкового зварення. Крізь сталь 65Г зварюємо порошковим дротом, плавким електродом ПП-АН170 (ПП-АН170М), діаметр 3,2 мм; якщо з боку сталі Ст.3, то зварюємо без наскрізного проплавлення використовуючи звичайний порошковий дріт типу Св 09Г2С (Св08Г2С), діаметр 1,6 мм; (рис.9).

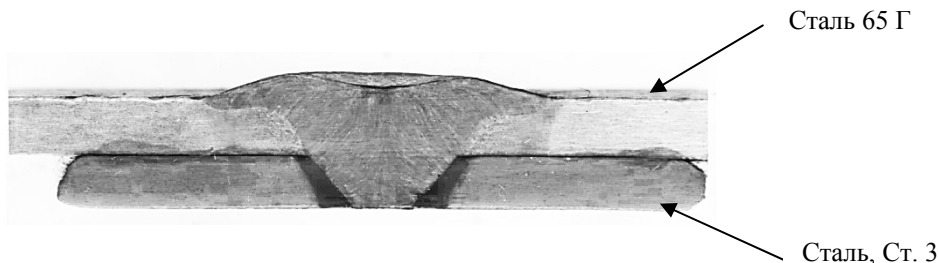


Рисунок 9 – Будова двошарової полиці плугу

*Джерело: розроблено автором*

Під впливом електричної дуги відбувається вкраплення твердого сплаву на певну глибину і по відповідній експоненті, загальна товщина пакету сталей не повинна перевищувати 8,0 мм. Геометричні розміри крапкового з'єднання:  $D_r$  -максимальне для даного сполучення товщин: 1,5...2,0 мм. Режими зварювання (ДТЗ), досліджували від умови отримання якісного зварного з'єднання, стабільного збурення дуги і протікання технологічного процесу. Як бачимо з рисунку 9, зварний шов має щільну литу структуру без пор і тріщини.

Мікротвердість металу зварного шва за двома напрямками (осі 1 і 2) не нижче твердості нижнього листа, сталь 65Г. Треба зазначити, що твердість металу шва у нижній його частині (по осі 1) декілька нижче ніж твердість його по осі 2, напевне за наявності у нижній частині шва бейніту, (низьковуглецевого мартенситу і карбідів), рис.10., 11, що можливо пояснити інтенсивним змішуванням у зварному шві трьох компонентів (металу порошкового омідненого дроту Св08Г2С, нижнього листа сталі, Ст.3 і верхнього листа 65Г. Найбільша твердість спостерігається у зоні термічного впливу, у нижньому листі сталі 65Г, де присутній виключно мартенсит (НВ 726 – 780)

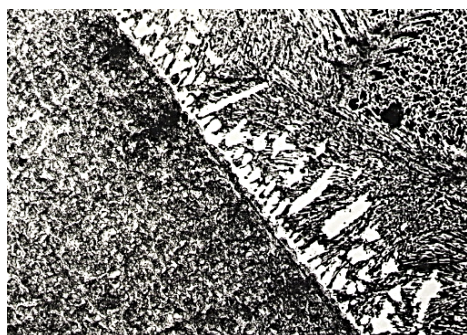


Рисунок 10 – Мікроструктура точкового покриття, x320

*Джерело: розроблено автором*

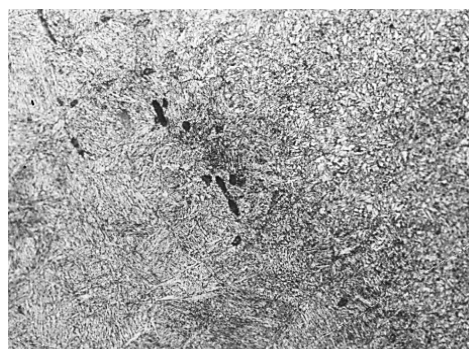


Рисунок 11 – Мікроструктура сталі 65Г, x320

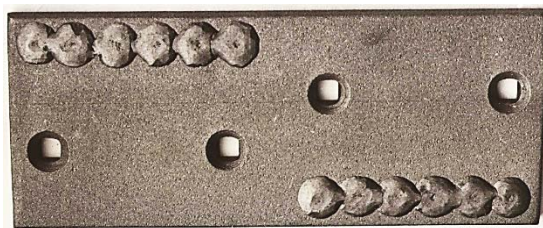
Здійснювали дослідницьке зварювання зразків з відповідними з'єднаннями товщин для визначення оптимальних режимів зварювання, а також потрібні

геометричні розміри крапок. В результаті виготовлення макрошліфів і механічних випробувань зразків на чисте зрізування було розраховано оптимальні режимі зварювання. У досліджуваних зразках наступні структури: метал шва – бейніт, ферит, перліт; зона сплавлення з верхнім листом сталь, Ст.3 – бейніт, перліт, ферит; основний метал, сталь Ст.3 – перліт, ферит; зона сплавлення з нижнім листом, сталь 65Г – мартенсит. Як звичайно ДТЗ здійснюється серійними напівавтоматами шляхом включення – виключення подавання порошкового дроту. За такого виконання зварювання якість і стабільність розмірів крапкових швів визначаються кваліфікацією зварника і його втомою. В залежності від етапу ДТЗ, товщини з'єднаних деталей і діаметру електродного дроту параметри режиму ДТЗ приймаються наступними: швидкість подавання електродного дроту 30...700 м/год, сила зварного струму 150...800А, напруга на дугі 30... 50 В, тривалість зварювання 0,5...3,0 сек. [9].

Для роботи у складі інтелектуального автоматичного і напівавтоматичного обладнання розроблені керовані джерела живлення: тиристорні, ВДУ 300, 516, 816; інверторні Р-302, Р-502, Р-1000. Випрямлячі ВДУ, зокрема ВС-650 СР, 650А/380В; мають повне цифрове керування і дозволяють реалізувати будь-яку вольт-амперну характеристику (ВАХ). Випрямлячі ВДУ зважаючи на прив'язку до частоти живильної мережі, мають вбудовані ВАХ для наплавлення у захисних газах (MIG/ MAG), вкритих електродами (ММА), зварювання під шаром флюсу. Для зварювання вкритим електродом використовується налагодження, що поєднано з різким підвищенням струму за зниження напруги дуги нижче заданого. Це попереджає прилипання електроду при різкому коливанні дугового проміжку. Максимальне значення струму короткого замикання налагоджується за допомогою параметру  $I_{\max}$ , а мінімальна напруга значенням  $U_{\min}$ .

В останні роки велика увага надається використанню ефекту самозагострювання для ріжучих і ударних робочих органів машин та сільськогосподарської техніки. Якщо лезо самозагострюється у процесі технічної експлуатації, то його зносостійкість зростає у 3-4 рази. При цьому на геометрію крапки зміцнення значно впливає відведення тепла в бік від її меж, але завдяки скорочення часу наплавлення, цей параметр у поперечному перерізі менше, ніж у поздовжньому, тому розплавлення відбувається з великою швидкістю у глибину основного металу. Це дозволяє проплавляти лезо на всю товщину, що дуже важливо для самозагострювання лемішів та інших деталей, тому що, у процесі абразивного зносу зростає перепад твердості між наплавленими та ненаплавленими дільницями, і при експлуатації, в результаті самозагострювання третього роду, утворюється хвилясто-ступеневе лезо. [8].

В якості матеріалу підкладки-основи і отримання ефекту самозагострювання лез робочих органів замість сталі 65Г пропонується якісна конструкційна сталь 20, 35 по ДСТУ 3684-98, ТУУ 27.1-4-531-2002. [13]. Грунтообробні машини зі зміцненими робочими органами ДТЗ (дугове точкове зварення) – крапкове зміцнення пройшли випробування у різних кліматичних умовах України. На рис.12 показано деталі зміцнені ДТЗ – польова дошка, одна з важливих вузлів плугу. Значення величини середньоквадратичного відхилення і коефіцієнтів варіації параметрів робочих органів з крапковим зміцненням свідчить про стабільність технологічного процесу їх виготовлення.



а



б

Рисунок 12 – Польова дошка: а-зміцнення порошковим дротом ПП-АН170;  
б-зміцнення твердим сплавом ПГ-С27;

Джерело: : розроблено автором

**Висновки.** Розроблену технологію можливо використовувати не тільки для відновлення спрацьованих деталей сільськогосподарської техніки, але і для зміцнення нових, зокрема – лемішів плугів, лап культиваторів, дисків борін. Зміцнення можливо здійснювати як в стаціонарних умовах на спеціалізованих заводах-виготовлювачах сільськогосподарської техніки, але і в невеликих майстернях господарств, і навіть у польових умовах за наявності джерела живлення.

Відносна зносостійкість за вагою зміцненого леміша у 2,2 рази більше серійного, а відносна зносостійкість носка у 2,8 рази більше серійного.

Зносостійкість двошарової складової полиці забезпечує стійкість проти спрацювання на 40-50% вище у порівнянні з серійними (тришаровими) полицями. Корпуси плугів оснащені зміцненими робочими органами забезпечують меншу потребу у тяговому зусиллі і відповідно низьке спрацювання робочих органів.

## Список літератури

1. Миронов Д.А., Сидоров С.А., Лискин И.В. Прочностные и ресурсные характеристики почвоработанных рабочих органов. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т.13. №3. С.39-43.
2. Константинов В.М. Комплексное повышение долговечности корпуса почвообрабатывающего плуга. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. №12. С.3-8.
3. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. М.: Машиностроение, 1995. 335 с.
4. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / М.М.Севернев, Н.Н.Подлекарев, В.Ш.Сохадзе, В.О.Китиков; под ред. М.М.Севернева. Минск: Белорус. Навук, 2011. 333 с.
5. Орлов Б.Н., Евграфов В.А., Орлов Н.Б. Долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин *Механизация и электрификация сельского хозяйства: Ежемесячный теоретический и научно-практический журнал*. 2007. №3. С.27-29.
6. Вплив амплітуди і частоти коливань електродного дроту при дуговому наплавленні на формування і структуру наплавленого металу і проплавлення основного металу. / А.А. Бабінець та ін. *Автоматичне зварювання*. 2020. 10. С. 26-33.
7. Структура и износостойкость при абразивном изнашивании наплавленного металла, упрочненного карбидами различных типов. / И.А. Рябцев и др. *Автоматическая сварка*. 2015. 5-6. С. 84-88.



8. Ключенко В.Н., Балан В.П. Точечное упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1989. №11. С. 54-57.
9. Особенности дуговой точечной сварки плавящимся электродом в углекислом газе. / В.И. Терещенко и др. *Автоматическая сварка*. 1983. №9 (366). С. 51-53.
10. Хакимов Р.Р., Багаутдинова И.И. Основные направления повышения надежности и долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. Технологии реновации машин и оборудования. Башкирский ГАУ, 2016. 332 с.
11. Денисенко М.І., Зазимко О.В., Лабунець В.Ф. Дослідження поверхонь тертя робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. № 1 (70). С. 150-153.
12. Металлургия и техника сварки. Процессы и промышленное применение ; под ред. Режиса Блондо. ISTE Ltd. John Wiley, 2008. 426 С.
13. Проспект «Арселор – Миттал Кривой Рог» . *ArcelorMittal* : веб сайт. URL : [www.arcelormittal.com](http://www.arcelormittal.com). 40 (дата звернення: .12.01.2023).

## Referencis

1. Mironov, D.A., Sidorov, S.A. & Lyskin, I.V. (2019). Prochnostnye i resursnye harakteristiki pochvovrezhushhih rabochih organov . [Strength and resource characteristics of soil-cutting workers ] . *Sel'skhozjajstvennye mashiny i tehnologii – Agricultural machines and technologies, Vol. 13. No. 3, 39-43* [in Russizn].
2. Konstantinov, V.M. (2014). Kompleksnoe povyshenie dolgovechnosti korpusa pochvoobrabatyvajushhego pluga . Complex increase in the durability of the hull of a soil tillage plow. *Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija – Mashinostroenie Publishing House, 12, 3-8* [in Russizn].
3. Tkachev, V.N. (1995). *Rabotosposobnost' detalej mashin v uslovijah abrazivnogo iznashivaniya [The performance of machine parts in the conditions of abrasive wear]* . Moskow : Mashinostroenie [in Russizn].
4. Severnev, M.M., Podlekarev, N.N., Sokhadze, V.Sh. & Kitykov, V.O. (2011). *Iznos i korrozija sel'skhozjajstvennyh mashin* [Wear and corrosion of agricultural machines]. Minsk: Belarus. Nauk [in Russizn].
5. Orlov, B.N., Evgrafov, V.A. & Orlov, N.B. (2007). Dolgovechnost' rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin [Longevity of working bodies of tillage machines] . *МЭСХ – MESH, 3, P. 27-29* [in Russizn].
6. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O., Lentyugov, I.P., Ryabtsev, I.I., Kaida, T.V. & Boghaichuk, I.L. (2020) Vplyv amplitudy i chastoty kolyvan' elektrodnoho drotu pry duhovomu naplavlenni na formuvannia i strukturu naplavlennoho metalu i proplavlennia osnovnoho metalu [Influence of the amplitude and frequency of oscillations of the electrode wire during arc welding on the formation and structure of the deposited metal and the penetration of the base metal]. *Avtomatychnye zvariuvannia – Automatic welding, 10, 26-33* [in Ukrainian].
7. Ryabtsev, I.A., Panfilov, A.Y., Babynets, A.A., Ryabtsev, I.Y., Gordan, G.N. & Babiychuk, I.L. (2015) Struktura i iznosostojkost' pri abrazivnom iznashivanii naplavlennogo metalla, uprochnennogo karbidami razlichnyh tipov [Structure and wear resistance during abrasive wear of deposited metal strengthened with different types of carbides]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic quarrel, 5-6, 84-88* [in Russizn].
8. Klyuenko, V.N. & Balan, V.P. (1989). Tochechnoe uprochnenie rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin. [Point hardening of working bodies of tillage machines]. *Traktory i sel'skhozjajstvennye mashiny – Tractors and agricultural machines, 11, 54-57* [in Russizn].
9. V.Y. Tereshchenko, A.N. Sharovolsky, K.A. Sydorenko, V.A. Troshin, Yu.Y. Saprykin. (1983). Osobennosti dugovoj tochechnoj svarki plavjashhimsja jelektrodom v uglekislom gaze [Features of arc spot welding with a melting electrode in carbon dioxide]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic Quarrel, 9 (366), 51-53* [in Russizn].
10. Khakimov R.R., Bagautdinova I.I. (2016). *Osnovnye napravlenija povyshenija nadezhnosti i dolgovechnosti rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih mashin. Tehnologii renovacii mashin i oborudovanija [The main directions of increasing the reliability and durability of the working bodies of tillage machines. Technologies of renovation of machines and equipment]*. Bashkir GAU. 332 [in Russizn].
11. Denisenko, M.I., Zazymko, O.V., & Labunets, V.F. (2016). Doslidzhennia poverkhon' tertia robochykh orhaniv hruntobrobnykh sil's'kohospodars'kykh mashyn. [Study of the friction surfaces of the working bodies of tillage agricultural machines]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Problems of friction and wear, 1 (70), 150-153* [in Ukrainian].

12. Directed by Blondo (Ed.). (2008). Metallurgy and brazing technique. Processes and industrial application. ISTE Ltd. John Wiley [in Russizn].
13. Prospekt «Arcelor – Mittal Krivoj Rog» [Avenue "Arcelor - Mittal Kryvyi Rih"]. (2002). *arcelormittal.com*. Retrieved from *www.arcelormittal.com*. 40. [in Russizn].

**Mykola Denisenko**, Assoc. Prof., PhD tech.sci.

*Nemishayev Vocational College of NUBiP of Ukraine, Nemishayeve township, Bucha district, Kyiv region, Ukraine*

### **Regarding the Issue of Restoration and Strengthening of Details of the Working Bodies of Soil Machinery**

Ecological and agrotechnical requirements for technical means of mechanization of agriculture are constantly growing and improving, especially in the field of indicators that determine the harmful effect on soils, including, on the limit of permissible clogging of them with metal from the accelerated wear of working organs, and getting into the soil products of wear and tear. A huge volume of agricultural products is produced by both large farms and smaller farms. In the created economic situation, there is a steady growth of farms; the growth of arable land for grain and other agrotechnical crops, which undoubtedly creates a demand for the working bodies of agricultural machines.

For example, only farms in the south and southeast of Ukraine annually consume more than 400,000 cultivator paws and plowshares, not including offers for other working bodies. The most heavily loaded surfaces of tillage machines and aggregates are the working bodies: the ploughshare is the ploughshare, the cultivator's paws, and the harrow's discs or teeth. The reason for their premature failure is mainly accelerated abrasive wear, which is due to interaction with solid (HV 8-11 GPa) particles in the soil. The working bodies of agricultural machinery include: ploughshares, plow bodies, discs of heavy harrows, paws of cultivators and planters, and many other parts of working bodies.

It should also be noted that soil cutting is the most widespread technological operation in the agro-industrial complex: plowing, cultivation, harrowing, harvesting of grain and technical crops, these operations make up at least 70% of the total volume of mechanized work. At the same time, such performance indicators as the degree of weed cutting, the average depth of cultivation, the stability of the movement of the working bodies in depth depend primarily on the technical condition of the blade of the working body of agricultural machinery; their clogging and sticking to the surface of the blade; traction resistance of working bodies.

A chamfer is formed on the edge of the blade and the toe, which negatively affects the stability of the movement of the working bodies in depth, the profile of the toe, the geometry and width of the blade of the working body changes. Dull cultivator legs and plow blades increase the traction resistance of the units, and therefore the productivity is significantly reduced, while fuel consumption increases by 15-20%. In connection with the uneven operation of the cutting edges and other surfaces of the working bodies of agricultural machinery, there is a need to strengthen and restore them.

In addition, agricultural working bodies are operated in conditions of a chemically aggressive external environment, which is connected with the addition of various fertilizers to the soil and the presence of moisture in it. The wear of the parts of tillage machines that have direct contact with the abrasive mass is strongly influenced by soil moisture. Moisture, depending on the type of soil, can both increase and decrease wear. Together, these factors exert such a strong influence on the working bodies of agricultural machinery that it makes them unusable after almost a few hours of intensive machine operation. The developed technology of modification of the parts of the working bodies of tillage machines using point strengthening increases the resistance to abrasive wear of their working surfaces by 2-3 times, and is able to replace other strengthening technologies, because it has high productivity and reduces the energy consumption of technological equipment many times over.

**abrasive wear, wear-resistant coatings, plow blade, cultivator foot, harrow disc, spot hardening - arc spot welding**

*Одержано (Received) 04.02.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 18.02.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 633.521:631.172

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.100-109](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.100-109)**А.С. Лімонт**, доц., канд. техн. наук*Житомирський агротехнічний коледж, м. Житомир, Україна**e-mail: andrespartak@ukr.net***З.А. Лімонт***Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна*

## Стійкість до вилягання і забур'яненість стеблостою льону-довгунця з урахуванням густоти посівів перед збиранням

Стійкість стеблостою до вилягання і його забур'яненість розглянути як фактори механізованого виробництва льону-довгунця, що формують екологоспрямоване готування і збирання рошенцевої льонотрести. Мета роботи полягала в дослідженні впливу густоти стеблостою льону-довгунця перед збиранням на стійкість його до вилягання і забур'яненість, а також з'ясуванні густоти посівів в передзбиральний період, яка уможливило застосування засобів механізації на бранні рослин льону-довгунця і очісуванні стебел, їх розстиланні, підніманні стрічки льонотрести, формуванні її упаковок, їх навантажуванні та транспортуванні.

Між стійкістю стеблостою льону-довгунця до вилягання і густотою стеблостою з урахуванням різних експериментальних даних виявлений від'ємний кореляційний зв'язок з коефіцієнтами кореляції мінус 0,460 і мінус 0,597 за кореляційних відношень стійкості стеблостою до вилягання на густоту стеблостою відповідно 0,703 і 0,652. Від'ємний кореляційний зв'язок виявлений і між забур'яненістю стеблостою, кількістю, а також щільністю бур'янів в ньому і густотою стеблостою з визначенням відповідних парних оцінних показників цього кореляційного зв'язку. Знайдені рівняння спадних гіпербол кількісної зміни результативних ознак залежно від факторіальної.

**льон-довгунець, стеблостій, вилягання, забур'яненість, збирання, густота, кореляція**

**Постановка проблеми.** Можливість використання засобів механізації на збиранні льону-довгунця залежить крім іншого від його вилягання. Стійкість стеблостою (рослин) льону-довгунця до вилягання оцінюють [1] за 5-бальною системою: 5 балів – льон прямостоячий, 4 бали – злегка полеглий, за якого стебла похилені за горизонту під кутом 70°, 3 бали – середнє вилягання, за якого стебла похилені до горизонту під кутом 45°; 2 бали – сильнє вилягання, за якого стебла похилені до горизонту під кутом 20°; 1 бал – надто сильнє вилягання, за якого стебла лежать на поверхні поля. За стійкості льону-довгунця до вилягання 3 бали – робота льонозбиральних комбайнів можлива при їх русі проти напрямку вилягання, а за стійкості 1–2 бали комбайнове збирання майже неможливе. За полеглою стеблостою ускладнюється функціонування льонозбирального комбайна та технологічне налагодження його робочих органів, що призводить до зниження продуктивності комбайнового агрегату та підвищеної витрати енергоносіїв. Це спричинює погіршення екологічності технологічного процесу збирання льону-довгунця. Утворена за такого стеблостою розстелена стрічка соломи має переплутані і перехрещені стебла, що утруднює використання засобів механізації при здійсненні наступних операцій з готування і піднімання льонотрести та формування її упаковок, їх навантажування і транспортування. Сформовані рулони трести при підніманні стрічки з переплутаними стеблами прес-підбирачами ускладнюють вентиляцію упаковок підігрітим повітрям. Висловлене не сприяє екологоспрямованому виробництву рошенцевої льонотрести.



При первинній переробці волокнистої складової урожаю полегли і переплутані стебла льоносировини ускладнюють технологічне налагодження обладнання та спричинюють зменшений вихід волокна і зниження його якості.

Крім вилягання стеблостою іншою умовою механізованого збирання льону-довгунця та ефективності наступних технологічних операцій з підготовки льонової сировини до реалізації є формування чистого від бур'янів стеблостою. Наявність бур'янів в стеблості з одного боку ускладнює використання машин на збиранні льону-довгунця, а з іншого – утруднює реалізацію соломи і трести на переробні пункти та льонозаводи, оскільки існують обмеження в забур'яненості льоносировини. Крім того, забур'янений стеблостій при збиранні льону комбайнами спричинює підвищення вмісту в льоновому воросі бур'янів, що призводить до неефективного використання сушильного обладнання та ускладнює роботу ворохорозробних машин. Таке є причиною підвищеної витрати енергоносіїв в розрахунку на одиницю маси насіння, що погіршує екологічність виробництва льону-довгунця. Проте в проблемі наукового забезпечення технології механізованого виробництва льону-довгунця залишилася поки ще нез'ясованою низка питань з визначення деяких параметрів стеблостою льону-довгунця перед збиранням і в т.ч. його вилягання і забур'яненості. В статті зроблена спроба висвітлити деякі з питань цієї проблеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивчення вилягання і забур'яненості стеблостою льону-довгунця крім інших дослідників здійснював і один із авторів цієї статті [1–3]. Відомості про густоту стеблостою різних сортів льону-довгунця та стійкість стеблостою цих сортів до вилягання  $S_{дв}$  в балах є в публікаціях З.М. Семенової [4], Я.Г. Худик [5] та Н.И. Личагіна і В.Я. Тихомирової [6]. Крім того такі ж відомості стосовно інших сортів льону-довгунця є в працях Л.Д. Фоменка [7, 8].

Інформація про густоту стеблостою перед збиранням і забур'яненість стеблостою  $Z_{ст}$  (%) є у вже згадуваній публікації Я.Г. Худик [5] та у працях автора цього повідомлення [2, 3]. Дані про густоту стеблостою і кількість бур'янів в стеблості  $K_6$  (шт./м<sup>2</sup>) є в книгах Л.Д. Фоменка [7 і 9] стосовно сортів льону-довгунця Т-5 і Т-10. Опрацьована інформація про густоту стеблостою льону-довгунця перед збиранням і щільність бур'янів в стеблості  $Щ_6$  (г/м<sup>2</sup>) є у статтях одного із авторів [2, 3] цього повідомлення.

**Постановка завдання.** Таким чином, метою роботи є узагальнення результатів попередніх досліджень і публікацій для пізнання і з'ясування якісних зв'язків і кількісних залежностей між стійкістю до вилягання стеблостою льону-довгунця перед збиранням та його забур'яненість при збиранні культури і іншою характеристикою посівів льону-довгунця в збиральний період – густотою стояння рослин, яку переважно називають густотою стеблостою  $G_{ст}$ , що її оцінюють за кількістю рослин (стебел) в розрахунку на 1 кв. м льонового поля (шт./м<sup>2</sup>).

**Об'єкт та методика дослідження.** Об'єктом дослідження автора були виробничі посіви льону-довгунця в сільськогосподарських підприємствах Народицького району Житомирської області при вивченні і оцінюванні ефективності використання льонозбиральних комбайнів. Визначення густоти стеблостою і його забур'яненості здійснювали за існуючими методиками. З облікових площадок вибирали бур'яни, а потім визначали їх щільність (г/м<sup>2</sup>) в стеблості та його забур'яненість, як відношення маси бур'янів до маси льонопродукції у відсотковому поданні. Вологість соломи, насіння і бур'янів визначали термоваговим методом. Обробка зібраного статистичного матеріалу здійснена з використанням методів кореляційно-регресійного аналізу [11–15] та стандартних комп'ютерних програм.

Між результативними ознаками, тобто стійкістю стеблостою до вилягання  $S_{дв}$

(бали), його забур'яненість  $Z_{ст}$  (%), кількістю  $K_6$  (шт./м<sup>2</sup>) та щільністю  $Щ_6$  (г/м<sup>2</sup>) бур'янів в стеблостої і факторіальною, тобто густрою стеблостою  $\Gamma_{ст}$  (шт./м<sup>2</sup>), визначали коефіцієнт кореляції  $r$  і кореляційне відношення  $\eta$  результативної ознаки на факторіальну та опрацьовували прогностичну функцію і рівняння регресії відповідної результативної ознаки на факторіальну. Для з'ясування досліджуваної прогностичної функції вирівнювали експериментальні значення результативних ознак залежно від факторіальної рівнянням прямої з від'ємним кутовим коефіцієнтом та низкою криволінійних залежностей (експонентою, показниковою, логарифмічною і степеневою функцією та рівнянням спадної гіперболи). Вибір відповідної прогностичної функції здійснювали за максимальним значенням  $R^2$ -коефіцієнта, що оцінював вірогідність апроксимації експериментальних даних рівнянням тієї чи іншої математичної залежності.

Поряд з визначенням  $R^2$ -коефіцієнта розраховували показник оцінювання вирівнювання  $\lambda_{пв}$  експериментальних значень результативної ознаки визначеною прогностичною функцією за опрацьованим її модельним рівнянням регресії. Визначали помилку  $S_y$  рівняння регресії та вели розрахунок коефіцієнта детермінації  $k_d$ , що оцінював силу вливу факторіальної ознаки на зміну відповідної результативної. Опрацьовували графіки зміни досліджуваних результативних ознак залежно від факторіальної.

**Виклад основного матеріалу.** Основні статистичні показники емпіричних розподілів досліджуваних результативних ознак і відповідних їм густот стеблостою льону-довгунця перед збиранням як факторіальної ознаки наведені в табл. 1. Наведена в табл. 1 інформація про густрою стеблостою і кількість бур'янів в ньому на підставі праць Л.Д. Фоменка одержана за результатами вивчення ним ефективності різних попередників, прийомів основного і передпосівного обробітку ґрунту, строків сівби, норм висіву і крупності насіння, способів хімічного прополовання льону, строків збирання та інших факторів інтенсифікації виробництва льону-довгунця сортів Т-5 і Т-10 за вирощування їх на відповідних ґрунтах. На підставі опрацьованого за даними Л.Д. Фоменка двомірного варіаційного ряду була складена відповідна кореляційна таблиця, в якій факторіальна ознака була розподілена на п'ять статистичних груп і відповідно цим групам визначені середньозважені значення результативної ознаки. За цими значеннями ознак опрацьовували графік зміни  $K_6$  залежно від  $\Gamma_{ст}$ .

Зібрана інформація про густрою стеблостою і його забур'яненість та щільність бур'янів включала по 135 пар відповідних ознак. З використанням цих ознак були опрацьовані дві кореляційні таблиці, в яких густрою стеблостою була розподілена на сім статистичних груп, відповідно до яких визначені середньозважені значення  $Z_{ст}$  і  $Щ_6$ . З використанням цих даних будували графіки зміни  $Z_{ст}$  і  $Щ_6$  залежно від  $\Gamma_{ст}$ .

Таблиця 1 – Основні статистичні показники емпіричних розподілів досліджуваних результативних ознак і відповідних їм густот стеблостою льону-довгунця перед збиранням

Результативна ознака (дані дослідника)	Розмір статистичної вибірки	Розмах варіювання	Середнє арифметичне значення	Середнє квадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації, %
Стійкість стеблостою до вилягання $C_{дв}$ , бали (З.М. Семенова [4], Я.Г. Худик [5] та Н.И. Личагін і В.Я. Тихомирова [6])	24	1,0–4,6	2,9	1,07	36,9
Густота стеблостою $G_{ст}$ , шт./м <sup>2</sup> ([4, 5, 6])	24	1365–3277	2450	490	20
Стійкість стеблостою до вилягання $C_{дв}$ , бали (Л.Д. Фоменко [7, 8])	56	1,5–5,0	3,8	0,72	18,9
Густота стеблостою $G_{ст}$ , шт./м <sup>2</sup> ([7, 8])	56	1026–3040	1776	408	23,0
Забур'яненість стеблостою $Z_{ст}$ , % (Я.Г. Худик [5])	18	7,9–20,1	13,5	3,53	26,1
Густота стеблостою $G_{ст}$ , шт./м <sup>2</sup> ([5])	18	1365–3277	213	372,5	17,5
Забур'яненість стеблостою $Z_{ст}$ , % (дані автора)	135	3–77	27,9	18	64,5
Густота стеблостою $G_{ст}$ шт./м <sup>2</sup> (дані автора)	135	384–4352	1919	851	44,3
Кількість бур'янів в стеблості $K_6$ шт./м <sup>2</sup> (Л.Д. Фоменко [7, 9])	53	15–139	44	20	45,4
Густота стеблостою $G_{ст}$ , шт./м <sup>2</sup> (Л.Д. Фоменко [7, 9])	53	1289–3043	2014	383	19,0
Щільність бур'янів в стеблості $Щ_6$ г/м <sup>2</sup> (дані автора)	135	26–860	290	193	66,5
Густота стеблостою $G_{ст}$ , шт./м <sup>2</sup> (дані автора)	135	384–4352	1919	851	44,3

Джерело: авторська розробка

Результати кореляційно-регресійного аналізу в дослідженні стійкості стеблостою льону-довгунця до вилягання та забур'яненості стеблостою, кількості і щільності бур'янів в ньому залежно від густоти стеблостою перед збиранням наведено в табл. 2.

У всіх досліджуваних зв'язках виявлена від'ємна кореляція між результативними ознаками і густотою стеблостою перед збиранням. Отже, всі досліджувані ознаки із збільшенням густоти стеблостою зменшуються. Проте це зменшення може бути нелінійним, оскільки як видно із табл. 2 чисельні значення кореляційних відношень дещо перевищують значення коефіцієнтів кореляції.

Залежно від досліджуваного зв'язку коефіцієнти кореляції коливалися від мінус 0,277 до мінус 0,901, а кореляційні відношення приймали значення в межах 0,455–0,914. Для остаточного з'ясування характеру досліджуваних зв'язків здійснено вирівнювання експериментальних значень результативних ознак залежно від факторіальної прямолінійними і криволінійними залежностями. За здійсненими розрахунками зміна досліджуваних результативних ознак залежно від густоти стеблостою з урахуванням значень  $R^2$ -коефіцієнтів описується рівняннями спадних

гіпербол. При цьому  $R^2$ -коефіцієнти залежно від досліджуваного зв'язку приймали значення від 0,207 до 0,809, що свідчить про належну вірогідність апроксимації експериментальних значень результативних ознак з'ясованими модельними рівняннями криволінійної регресії цих ознак на густоту стеблостою льону-довгунця перед збиранням.

Таблиця 2 – Результати кореляційно-регресійного аналізу в дослідженні стійкості стеблостою льону-довгунця до вилягання та забур'яненості стеблостою, кількості і щільності бур'янів в ньому залежно від густоти стеблостою перед збиранням  $\Gamma_{ст}$  (шт./м<sup>2</sup>)

№ з/п	Результативна ознаки (дані дослідника)	Розмір опрацьованого двомірного варіаційного ряду	Коефіцієнт кореляції (чисельник) і кореляційне відношення (знаменник)	Прогностична функція (чисельник) і рівняння регресії (знаменник)	$R^2$ -коефіцієнт (чисельник) і показник оцінювання вирівнювання $\lambda_{пв}$ (знаменник)	Помилка рівняння регресії $S_y$ (чисельник) і коефіцієнт детермінації $k_d$ (знаменник)
1	Стійкість стеблостою до вилягання $C_{дв}$ , бали ([4, 5, 6])	24	$\frac{-0,597}{0,652}$	<u>Спадна гіпербола</u> $C_{дв} = 0,188 + 6415 / \Gamma_{ст}$	$\frac{0,425}{0,092}$	$\frac{0,81}{0,425}$
2	Стійкість стеблостою до вилягання $C_{дв}$ , бали ([7, 8])	56	$\frac{-0,460}{0,703}$	<u>Спадна гіпербола</u> $C_{дв} = 1,95 + 3373 / \Gamma_{ст}$	$\frac{0,494}{0,089}$	$\frac{0,515}{0,494}$
3	Забур'яненість стеблостою $Z_{ст}$ , % ([5])	18	$\frac{-0,901}{0,914}$	<u>Спадна гіпербола</u> $Z_{ст} = 0,62 + 25723 / \Gamma_{ст}$	$\frac{0,809}{0,099}$	$\frac{1,43}{0,835}$
4	Забур'яненість стеблостою $Z_{ст}$ , % (дані автора)	135	$\frac{-0,397}{0,455}$	<u>Спадна гіпербола</u> $Z_{ст} = 10,75 + 25090 / \Gamma_{ст}$	$\frac{0,207}{0,139}$	$\frac{16,0}{0,207}$
5	Кількість бур'янів в стеблості $K_б$ , шт./м <sup>2</sup> ([7, 9])	53	$\frac{-0,277}{0,488}$	<u>Спадна гіпербола</u> $K_б = -5,9 + 96071 / \Gamma_{ст}$	$\frac{0,238}{0,017}$	$\frac{17,4}{0,238}$
6	Щільність бур'янів в стеблості $\Pi_б$ , г/м <sup>2</sup> (дані автора)	135	$\frac{-0,397}{0,455}$	<u>Спадна гіпербола</u> $\Pi_б = 108,4 + 26933 / \Gamma_{ст}$	$\frac{0,207}{0,049}$	$\frac{172}{0,207}$

Джерело: авторська розробка

Для переважної більшості результативних ознак за винятком зв'язку забур'яненості стеблостою і густоти стеблостою (дані автора) показник оцінювання вирівнювання експериментальних значень цих ознак рівняннями спадних гіпербол коливався в межах 0,017–0,099, які не перевищують 0,1, що дозволяє визнати вирівнювання експериментальних даних з'ясованими рівняннями задовільним. Для зв'язку  $Z_{ст}$  і  $\Gamma_{ст}$  за даними автора відношення  $\lambda_{пв}$  тільки в 1,39 раза перевищує умову задовільного вирівнювання.

Помилка  $S_y$  опрацьованих рівнянь регресії не перевищує середніх арифметичних значень досліджуваних результативних ознак, що дозволяє аналізувати зміну цих ознак в досліджуваному діапазоні варіювання густоти стеблостою від її найменшого (384 шт./м<sup>2</sup>) до найбільшого (4352 шт./м<sup>2</sup>) значення.

За визначеними коефіцієнтами детермінації  $k_d$  варіювання досліджуваних результативних ознак, що визначають стійкість стеблостою до вилягання, забур'яненість стеблостою та кількість і щільність бур'янів в ньому, на 21,0–83,5% причинно зумовлено густотою стеблостою перед збиранням. Решта 16,5–79,0% не поясненої дисперсії зумовлена впливом інших випадкових факторів, які не розглядали в цьому дослідженні.

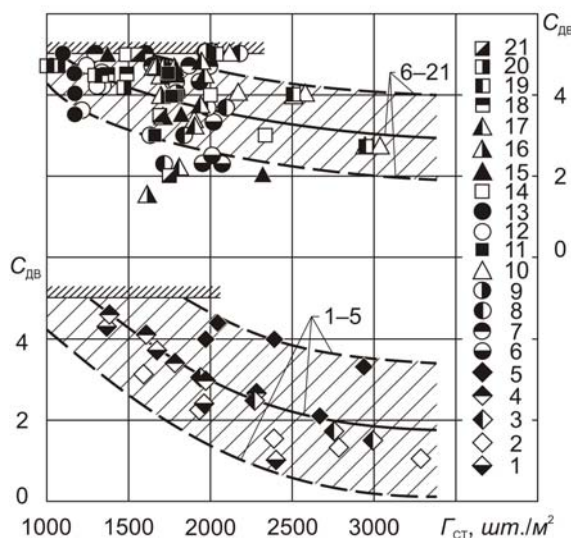
Окремо зупинемось на аналізі експериментальних даних Я.Г. Худик [5]. За даними Я.Г. Худик [5] про забур'яненість  $Z_{ст}$  (%) і густоту  $\Gamma_{ст}$  (шт./м<sup>2</sup>) стеблостою між  $Z_{ст}$  і  $\Gamma_{ст}$  виявлений від'ємний кореляційний зв'язок з коефіцієнтом кореляції мінус 0,901 за кореляційного відношення  $Z_{ст}$  на  $\Gamma_{ст}$ , що дорівнює 0,914 (табл. 2). Для з'ясування характеру зв'язку між  $Z_{ст}$  і  $\Gamma_{ст}$  з використанням стандартних комп'ютерних програм здійснені відповідні розрахунки. Вирівнювання експериментальних значень забур'яненості стеблостою за узагальненими даними Я.Г. Худик [5] залежно від його густоти здійснювали за відповідними апроксимуючими залежностями. З досліджуваних апроксимуючих залежностей найкраще вирівнювання за  $R^2$ -коефіцієнтом забезпечила апроксимація експериментальних значень  $Z_{ст}$  рівнянням прискорено спадної із сповільненням експоненти. За такого вирівнювання вірогідність апроксимації за  $R^2$ -коефіцієнтом становила 0,835, а за степеневою функцією – 0,825. З графіка степеневої функції простежувалося, що із збільшенням густоти стеблостою його забур'яненість може сягати відповідного найменшого граничного значення. Таке значення забур'яненості стеблостою можна визначити за асимптотою гіперболи, рівняння якої вважають частковим випадком степеневої функції. Якщо зміну  $Z_{ст}$  залежно від  $\Gamma_{ст}$  прогнозувати за рівнянням спадної гіперболи ( $R^2 = 0,809$ ), то асимптота гіперболи дорівнює 0,62. Отже, за такої апроксимації зміни  $Z_{ст}$  залежно від  $\Gamma_{ст}$  і з збільшенням густоти стеблостою, тобто із загущенням посівів, забур'яненість стеблостою може сягати значень, що не перевищують 1%. Опрацьоване рівняння гіперболи наведене в табл. 2. Найбільш інтенсивно  $Z_{ст}$  зменшується при збільшенні  $\Gamma_{ст}$  до 2500–3000 шт./м<sup>2</sup>. З подальшим збільшенням густоти стеблостою його забур'яненість за узагальненням досліджень Я.Г. Худик значно уповільнюється. Показник оцінювання вирівнювання  $\lambda_{пв}$  експериментальних значень  $Z_{ст}$  залежно від  $\Gamma_{ст}$  рівнянням гіперболи за розрахунками дорівнює 0,099 (табл. 2). Це значення  $\lambda_{пв}$  дещо менше 0,1 і умова задовільного вирівнювання експериментальних значень результативної ознаки вказаним рівнянням регресії витримується. Помилка  $S_y$  рівняння гіперболи за розрахунками дорівнює 1,43. Це значення помилки рівняння гіперболи майже у 10 разів (9,44) менше середнього арифметичного значення емпіричного розподілу забур'яненості стеблостою. За значенням розрахованого коефіцієнта детермінації  $k_d$ , що дорівнює 0,835 (табл. 2), варіація забур'яненості стеблостою майже на 84% причинно зумовлена варіацією густоти стеблостою. Решта 16% не поясненої дисперсії зумовлена впливом інших факторів, які в цьому дослідженні не розглядали.

Якщо ж зміну експериментальних значень  $Z_{ст}$  за даними [5] залежно від  $\Gamma_{ст}$  апроксимувати рівнянням прямолінійної регресії з від'ємним кутовим коефіцієнтом 0,059 ( $R^2 = 0,811$ ), то за значенням останнього підвищення густоти стеблостою на 100 шт./м<sup>2</sup> супроводжується зменшенням забур'яненості стеблостою майже на 6%.

Графічна інтерпретація з'ясованих і наведених в табл. 2 залежностей та деякі кореляційні поля, що побудовані за даними відповідних, які опрацьовані в дослідженні,

двомірних варіаційних рядів, представлені на рисунках.

Так, графічне узагальнення стійкості стеблостою до вилягання залежно від його густоти перед збиранням з урахуванням агротехнічних прийомів і заходів з вирощування льону-довгунця різних сортів за матеріалами низки дослідників наведено на рис. 1. На рисунку представлені кореляційні поля  $C_{дв}$  і  $\Gamma_{ст}$  та модельні лінії криволінійної регресії стійкості стеблостою до вилягання на його густоту перед збиранням.



$C_{дв}$  – стійкість стеблостою льону-довгунця до вилягання;  $\Gamma_{ст}$  – густина стеблостою перед збиранням за даними З.М. Семенової [4], Я.Г. Худик [5], Н.И. Личагіна і В.Я. Тихомирової [6] при дослідженні норм висіву насіння та Л.Д. Фоменка [7, 8] при вивченні різних агротехнічних прийомів і заходів з вирощування окремих сортів льону-довгунця

Рисунок 1 – Зміна стійкості стеблостою до вилягання  $C_{дв}$  залежно від його густоти перед збиранням  $\Gamma_{ст}$ : 1 – сорт «Прядильщик» [4]; 2 – И-7 [4]; 3 – Л-1120 [4]; 4 – Світоч [5]; 5 – ВНИИЛ-11 [6]; 6 – Т-10 при дослідженні попередників на низинному дерново-глейовому піщано-легкосуглинковому ґрунті, 1967–1970 рр.; 7 – Т-10 – способів передпосівного обробітку такого ж ґрунту, 1965–1967 рр.; 8 – Т-10 – строків сівби на тому ж ґрунті, 1966–1968 рр.; 9 – сорт не вказано, перевірка у виробничих умовах строків сівби на дерново-глейовому ґрунті, 1967–1971 рр.; 10 – Т-10 – норм висіву і крупності насіння на низинному дерново-глейовому піщано-суглинковому ґрунті, 1966–1968 рр.; 11 – сорт не вказано, дослідження застосування хлорхлориду проти вилягання стеблостою на низинному дерново-глейовому ґрунті, 1971–1972 рр.; 12 – сорт К-6 – доз мінеральних добрив на осушеному дерново-глейовому піщано-суглинковому ґрунті, 1973–1976 рр.; 13 – К-6 – строків сівби на осушеному дерново-глейовому ґрунті, 1973–1975 рр.; 14 – Л-1120 – норм висіву на осушеному торфовищі, 1964–1967 рр.; 15 – Т-10 – норм висіву на осушеному торфовищі, 1964–1967 рр.; 16 – Т-10 – доз і співвідношення мінеральних добрив на глибокому низинному слабкокислому торфоболотному ґрунті, 1965–1967 рр.; 17 – К-6 – доз хлорхлориду на низинному дерново-глейовому піщано-суглинковому ґрунті, 1971–1974 рр.; 18 – К-6 – гербіциду 2М4Х на низинній осушеній ділянці, 1971–1974 рр.; 19 – Т-10 – норм висіву на здавнаорному низинному ґрунті, 1966–1968 рр.; 20 – сорт К-6 – норм висіву на осушеному ґрунті по луковій скибі, 1973–1976 рр.; 21 – сорт Т-10 при дослідженні строків сівби на осушеному низинному глибокому слабкокислому торфовищі, роки не вказані

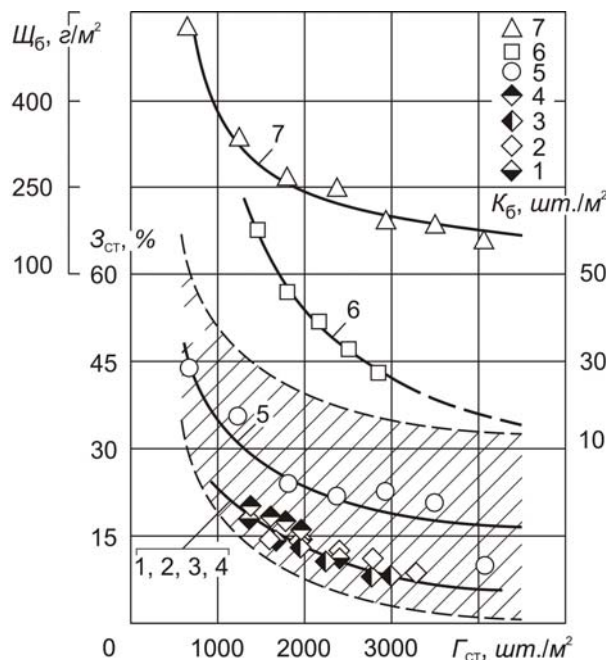
Джерело: авторська розробка

З урахуванням помилки рівняння криволінійної регресії стійкості стеблостою до вилягання на густоту стеблостою  $S_y = 0,81$  бала (табл. 2) визначена зона варіабельності ознаки  $C_{дв}$ , яка показана на рис. 1 (нижня частина рисунка) пунктирними лініями обабіч кривої, що інтерпретує зміну  $C_{дв}$  залежно від  $\Gamma_{ст}$ . Ця зона на рисунку заштрихована.

У верхній частині рис. 1 пунктирними кривими показані верхня і нижня обмежувальні криві, що характеризують зміну  $C_{дв}$  від  $\Gamma_{ст}$  за матеріалами узагальнення

експериментальних даних Л.Д. Фоменка. На рис. 1 (верхня частина рисунка) зона, в яку попадає переважна більшість експериментальних даних Л.Д. Фоменка, заштрихована.

В нижній частині рис. 2 наведені експериментальні дані Я.Г. Худик [5] про забур'яненість стеблостою  $Z_{ст}$  і його густоту  $\Gamma_{ст}$  (позиції 1–4), що їх в цілому можна і слід розглядати як відповідне кореляційне поле  $Z_{ст}$  і  $\Gamma_{ст}$ .



$Z_{ст}$  – забур'яненість стеблостою;  $K_b$  і  $\Pi_b$  – відповідно кількість і щільність бур'янів в стеблості;  
 $\Gamma_{ст}$  – густина стеблостою перед збиранням за даними Я.Г. Худик [5], З.М. Жужикової [9], Л.Д. Фоменка [7, 8] та автора цього повідомлення

Рисунок 2 – Вплив густоти стеблостою перед збиранням  $\Gamma_{ст}$  на його забур'яненість  $Z_{ст}$  та кількість  $K_b$  і щільність  $\Pi_b$  бур'янів в стеблості перед збиранням льону-довгунця різних сортів: 1 – сорт «Прядильщик»; 2 – И-7; 3 – Л-1120; 4 – Світоч [5]; 5 – Т-10 [3]; 6 – Т-5 і Т-10 [7, 9]; 7 – Т-10 [3]  
 Джерело: авторська розробка

З використанням помилки рівняння криволінійної регресії забур'яненості стеблостою по його густоті (табл. 2) за вихідними даними автора цього повідомлення обабіч кривої 5 (рис. 2), що інтерпретує зміну  $Z_{ст}$  залежно від  $\Gamma_{ст}$ , показана заштрихована зона, яка визначає можливі межі зміни забур'яненості стеблостою за зміни його густоти. З графіка видно, що в цю зону попадають експериментальні дані Я.Г. Худик, а це до деякої міри свідчить про вірогідність опрацьованого рівняння зміни  $Z_{ст}$  залежно від  $\Gamma_{ст}$  за спадною гіперболою, рівняння (4) якої наведене в табл. 2.

Вільні члени рівнянь 1 і 2, що описують зміну стійкості стеблостою до вилягання залежно від густоти стеблостою (табл. 2) є асимптотами цих рівнянь та дорівнюють відповідно 0,188 і 1,95. Визначені асимптоти оцінюють стійкість стеблостою до вилягання і свідчить про те, що з підвищенням густоти стеблостою стійкість до вилягання сягає значень, за яких неможливе механізоване брання льону-довгунця. За аналізованими рівняннями стійкість до вилягання, що дорівнює 3, за якого можливе механізоване брання льону, може бути прогнозована за густоти стеблостою відповідно 2281 і 3212 шт./м<sup>2</sup>.

За асимптотами рівнянь (3 і 4) гіпербол, що описують зміну забур'яненості стеблостою залежно від його густоти (табл. 2), із збільшенням густоти стеблостою його

забур'яненість може зменшуватися за рівнянням (3) до 0,62%, а за рівнянням (4) – дещо більше 10%. Що стосується кількості і щільності бур'янів в стеблостой, то за відповідними рівняннями (табл. 2) із загушенням посівів льону-довгунця бур'янів за рівнянням (5) в стеблостой взагалі може не бути (від'ємна асимптота), а за рівнянням (6) їх щільність доходить дещо менше 110 г/м<sup>2</sup>.

З графічного подання опрацьованих рівнянь регресії можна простежити кількісну зміну досліджуваних результативних ознак залежно від густоти стеблостою перед збиранням. За усередненими даними [4, 5 і 6], що оцінюють зміну  $C_{дв}$  залежно від  $\Gamma_{ст}$  (нижня частина рис. 1), з підвищенням густоти стеблостою понад 2500 шт./м<sup>2</sup> зменшення стійкості стеблостою за вилягання значно уповільнюється. Таке можна відмітити і щодо даних [7, 8] (верхня частина рисунка 1). Подальше підвищення густоти стеблостою до 3000 шт./м<sup>2</sup> і понад вказане загушення посівів льону-довгунця супроводжується незначним зниженням стійкості стеблостою до вилягання, яка знаходиться в межах помилок рівнянь (1) і (2), що наведені в табл. 2.

Аналіз графіків зміни забур'яненості стеблостою  $Z_{ст}$  (узагальнена крива за даними [5] та крива 5, що побудована за матеріалами одного з авторів), кількості  $K_6$  (крива 6) та щільності  $Щ_6$  (крива 7) бур'янів в стеблостой залежно від його густоти  $\Gamma_{ст}$  (рис. 2) свідчить, що з підвищенням густоти стеблостою перераховані оцінні показники наявності бур'янів в посівах льону-довгунця кількісно змінюються аналогічно зміні стійкості стеблостою до вилягання. Проте опрацьованих експериментальних даних Л.Д. Фоменка [7, 9] про кількість бур'янів  $K_6$  в стеблостой за його густоти 3000 шт./м<sup>2</sup> і що її перевищує в нашому повідомленні немає, оскільки інформація про такі показники стеблостою відсутня в працях Л.Д. Фоменка.

**Висновки.** Одержану в результаті дослідження інформацію і з'ясовані кількісні залежності слід враховувати при обґрунтуванні і нормуванні густоти стеблостою та опрацюванні агротехнічних вимог до відповідних операцій з вирощування та збирання льону-довгунця. Такими операціями можуть бути основний і передпосівний обробітки ґрунту, сівба льону-довгунця з визначенням норми висіву насіння, догляд за посівами льону-довгунця, його збирання та низка операцій, що супроводжує виробництво рошенцевої льонотрести.

Перспективи подальших розвідок на нашу думку варто спрямувати на узагальнення досліджень з густоти посівів льону-довгунця перед збиранням як інтегральної характеристики стеблостою в льонозбиральний період, що визначає і формує агроформи до виконання механізованих операцій з виробництва рошенцевої льонотрести.

## Список літератури

1. Limont A.S. The influence of the haulm stand density on flax lodging and preparation of dew-retted flax straw. *European Applied Sciences. Europäische Fachhochschule*. 2014. # 8. P. 41–45.
2. Лімонт А.С., Лімонт Н.А. Прогнозування забур'яненості посівів льону-довгунця як фактора механізованого збирання. *Вісник Державного агроекологічного університету*. 2004. № 2 (13). С. 162–167.
3. Limont A.S. Fiber flax crops weediness atin connection with of dew-retted flax straw preration. *European Applied Sciences. Europäische Fachhochschule*. 2014. # 7. P. 54–57.
4. Семенова З.М. О нормах высева семян льна-долгунца. *Лен и конопля*. 1963. № 4. С. 13–14.
5. Худик Я.Г. О нормах высева семян льна-долгунца в горных районах Карпат. *Труды Всесоюзного научно-исследовательского института льна*. 1969. Вып. 7. С. 271–282.
6. Лычагин Н.И., Тихомирова В.Я. О густоте стеблестоя и полегании льна. *Лен и конопля*. 1976. № 4. С. 21–22.
7. Фоменко Л.Д. Льонарство на осушених і низинних землях. Київ: Урожай, 1974. 160 с.
8. Фоменко Л.Д. Производство льна на осушенных землях. Москва: Колос, 1982. 143 с.
9. Фоменко Л.Д. Вирівняний льон. Київ: Урожай, 1967. 128 с.



## References

1. Limont, A.S. (2014). The influence of the haulm stand density on flax lodging and preparation of dew-retted flax straw. *European Applied Sciences. Europäische Fachhochschule*. # 8. P. 41–45 [in English].
2. Limont, A.S. & Limont, N.A. (2004). Prohnozuvannia zaburianenosti posiviv lonu-dovhuntsia yak faktora mekhanizovanoho zbyrannia [Forecasting the weediness of flax crops as a factor of mechanized harvesting]. *Visnyk Derzhavnoho ahroekolohichnoho universytetu – Bulletin of the State Agroecological University*, 2 (13), S. 162–167 [in Ukrainian].
3. Limont, A.S. (2014). Fiber flax crops weediness atin connection with of dew-retted flax straw preration. *European Applied Sciences. Europäische Fachhochschule*. # 7. P. 54–57 [in English].
4. Semenova, Z.M. (1963). O normakh vyseva semyan l'na-dolguntsa [About the norms of sowing flax seeds]. *Len i konoplya – Flax and hemp*, 4, 13–14 [in Russian].
5. Khudik, Ya.G. (1969). O normakh vyseva semyan l'na-dolguntsa v gornykh rayonakh Karpat [On the norms of sowing seeds of fiber flax in the mountainous regions of the Carpathians]. *Trudy Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta l'na – Proceedings of the All-Union Research Institute of Flax*, Issue 7, 271–282 [in Russian].
6. Lychagin, N.I. & Tikhomirova, V.Ya. (1976). O gustote stblestoya i poleganii l'na [On the density of stalks and lodging of flax]. *Len i konoplya – Linen and hemp*, 4, 21–22 [in Russian].
7. Fomenko, L.D. (1974). *Lonarstvo na osushenykh i nyzynnykh zemliakh [Flax growing on drained and lowland lands]*. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
8. Fomenko, L.D. (1982). *Proizvodstvo l'na na osushennykh zemlyakh [Flax production on drained lands]*. Moskva: Kolos [in Russian].
9. Fomenko, L.D. (1967). *Vyryvnianyi lon [Aligned linen]*. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].

**Anatoliy Limont**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Zhytomyr Agrotechnical Colledge, Zhytomyr, Ukraine*

**Zlata Limont**, student

*Dnipro National University named after Oles Honchar, the city of Dnipro, Ukraine*

### **Resistance to Lodging and Weediness of Long Flax Stalks, Taking Into Account the Density of Crops Before Harvest**

Resistance of stalks to lodging and its weediness should be considered as factors of mechanized production of long flax, which form environmentally friendly preparation and harvesting of Roshen flaxseed. The aim of the study was to study the effect of stem density of long flax before harvesting on its resistance to lodging and weeding, as well as to determine the density of crops in the pre-harvest period, which allows the use of mechanization in harvesting long flax plants and combing stems, their spreading, lifting the flaxseed tape, forming its packaging, loading and transportation.

Some of the results of experimental research of a number of scientists on the study of agricultural techniques and measures for the cultivation of flax and the materials of their own research and their generalization were used as initial data. The method of processing the initial data is based on correlation-regression analysis, based on the size of statistical samples used to determine the estimated indicators of qualitative and quantitative relationship of the studied results and factorial features of the processed correlation series and correlation tables. The range of variation of the studied features, the arithmetic mean and the standard deviation and coefficients of variation were determined. The search for the prognostic function was carried out by equalizing the experimental values of the performance traits depending on the factorial rectilinear and a number of curvilinear dependences with the calculation of the corresponding estimates of alignment, errors of regression equations and determination of the coefficient of determination.

A negative correlation with the correlation coefficients of minus 0.460 and minus 0.597 was found between the resistance of the flax stalk to lodging and the density of the stalk, taking into account various experimental data, with correlations of the resistance of the stalk to lodging to the density of the stalk, respectively, 0.503 and 0.62, respectively. A negative correlation was also found between the weediness of the stem, the number and density of weeds in it and the density of the stem, with the determination of the corresponding paired estimates of this correlation. The equations of descending hyperbolas of quantitative change of effective signs depending on factorial are found.

**flax, stalks, lodging, weeding, harvesting, density, correlation**

*Одержано (Received) 19.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ**

UDC 629.083

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.110-119](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.110-119)

**Andrii Molodan**, Prof., DSc., **Yevhen Dubinin**, Prof., DSc., **Oleksandr Polyanskyi**, Prof., DSc., **Mykola Potapov**, Assoc. Prof., PhD tech sci., **Mykola Poltavskyi**, post-graduate, **Maksim Krasnokutskyi**, post-graduate  
*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*  
*e-mail: tmirm@ukr.net*

## Changes in Engines Energy Indicators when the Cylinders are Disconnected in the Unloaded Mode of Operation

Researched regimes of engine operation without load: 1 – test of the original engine; 2 – test with disconnection of four cylinders by stopping the fuel supply; 3 – test with the disconnection of four cylinders by simultaneously stopping the fuel supply and the absence of pumping losses of the cylinder-piston group (CPG) of the disconnected cylinders. It was established that when the crankshaft rotation frequency increases from 1400 min<sup>-1</sup> to 2550 min<sup>-1</sup> when the fuel supply to half of the cylinders is turned off, the fuel economy changes from 0 to 0.53 kg/h. When the fuel is turned off and there are no CPG pumping losses, the fuel economy changes from 1.2 kg/h to 3.88 kg/h. Recommendations have been developed that allow to increase the efficiency of wheeled vehicles by 11-26% by disconnecting a part of the cylinders.

**disconnecting cylinders, operation without load, pumping losses**

**Formulation of the problem.** In the field of operation, when using wheeled machines, the tractor engine works for a considerable time at partial loads [1]. At a load of up to 50%, the engine works approximately 40% of the time, at a load of 50-65% – another 40% of the time, and only 20% of the time – at a load of 70% to full power [2]. In the conditions of real operation in farms, the time of engine operation at idle speed and light loads can be even longer, especially in the autumn and winter period. For truck engines, only 70-80% of the time is pure operation at an average load of up to 70%, and the rest of the time is for transport operations with an engine load of 20-30%.

**Analysis of recent research and publications.** The economic efficiency of diesel engines depends significantly on the degree of their loading. The highest values of efficiency are achieved in the nominal mode, and in the modes of low loads and idling, they are significantly reduced, which is associated with the deterioration of the mixture formation and fuel combustion, and the increase in the unevenness of the fuel supply [3, 4].

The feasibility of using this method is confirmed by numerous studies of tractor engines, however, this method has not yet found wide application in practice, partly due to the lack of justified modes of disconnection of an appropriate number of their cylinders and reliable devices for disconnection.

**Setting objectives.** The purpose of the study is to improve the performance of the engine in the no-load mode by substantiating the number of cylinder shutdowns and determining the energy parameters of its operation.

Achieving the set goal involves solving the following tasks:

- to determine the interrelationships of the operating indicators of the diesel engine at idle speed (no load) when half of the cylinders are disconnected;
- determine the nature of the influence of pumping losses in the CPG of disconnected cylinders on the energy parameters of the diesel engine at idle speed (no load).

**Presenting main material.** The operation of the engine at light loads and idling is, as a rule, characterized by deterioration of its main indicators. In this connection, there is need to improve the operation of the engine in these modes. One way is to disconnect part of the engine cylinders. In order to identify the effect of disconnection of a part of the engine cylinders on its operation, relevant studies were conducted at the Department of Mechanical Engineering and Machine Repair of the KhNAHU.

The study of the characteristics of the KamAZ-740 engine when part of the cylinders were disconnected was carried out on the KI-5274 stationary stand in the conditions of KHARZ-110 and KHARZ-126 auto repair production. The brake stand was equipped with measuring devices and control equipment according to GOST 14846-81 (ST SEV 765-77) [5] and included an electric balancing machine AKB 101-4. The parameters of the engine were determined in three variants of tests:

- 1 – test of the original engine;
- 2 – test with disconnection of four cylinders by stopping the fuel supply;
- 3 – test with disconnection four cylinders by the simultaneous cessation of fuel supply and the absence of pumping losses of the cylinder-piston group (CPG) of the disconnected cylinders. When the cylinder is disconnected and there are no pumping losses of CPG, the valves remain working, but a bypass valve is used for each cylinder, which is installed to the opening of the fuel injector. Test options in the figures are marked with numbers 1, 2, 3, respectively.

As is known [6], the indicator power of the engine  $N_i$  is the sum of the effective power  $N_e$  and the power of mechanical losses  $N_{ml}$

$$N_{in} = N_e + N_{ml}, \text{ kW} \quad (1)$$

In the idling mode (no load), the effective power is zero [7], that is, all the power developed by the engine is spent on overcoming mechanical losses

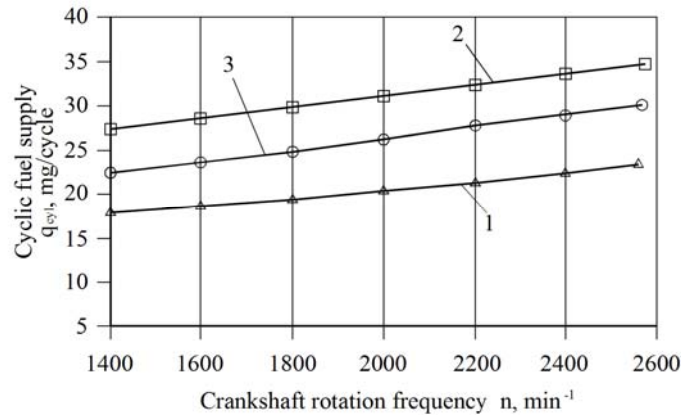
$$N_{in} = N_{ml}. \quad (2)$$

When the crankshaft rotation frequency increased from  $1400 \text{ min}^{-1}$  to  $2550 \text{ min}^{-1}$ , the engine parameters changed as follows.

Cyclic fuel supply  $q_{cyl}$  increases in all test options (Fig. 1), because in order to increase the frequency of rotation of the crankshaft, it is necessary to overcome the increasing power of mechanical losses, which is carried out by increasing the cyclic supply by increasing the active stroke of the plunger with the fuel supply lever.

When the cylinder was disconnected, only the cyclic fuel supply (curve 2) increased compared to the original version. This happened because when the fuel supply was turned off in cylinders 1 and 4 and 6 and 7, the engine power indicator decreased, while the crankshaft rotation frequency decreased, and to maintain them at the previous level, the cyclic supply with the help of the accelerator lever was increased by almost two times.

In the case of the option with the fuel supply cut off and the absence of pumping losses in the CPG (curve 3), the cyclic fuel supply is higher compared to the initial one, which is explained by the same reasons as the increase  $q_{cyl}$  when only fuel is turned off, and compared to the second option, it is lower, which is caused by a decrease in mechanical losses (pumping losses in the CPG have decreased).



1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 1 – Dependence of cyclic feed on engine speed

Source: developed by the author

Hourly fuel consumption  $G_f$  is determined by the formula [6]

$$G_f = \frac{1,2 \cdot q_{cyl} \cdot n \cdot i_{cyl}^n}{10^4 \cdot \tau} = g_i \cdot N_{in} = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_i} \cdot N_{ml}, \text{ kg/h}, \quad (3)$$

where  $q_{cyl}$  – cyclic fuel supply, mg/cycle;

$n$  – crankshaft rotation frequency,  $\text{min}^{-1}$ ;

$i_{cyl}^n$  – the number of working cylinders (for the second and third options  $i_{cyl}^n = 4$ , for the first  $i_{cyl}^n = 8$ );

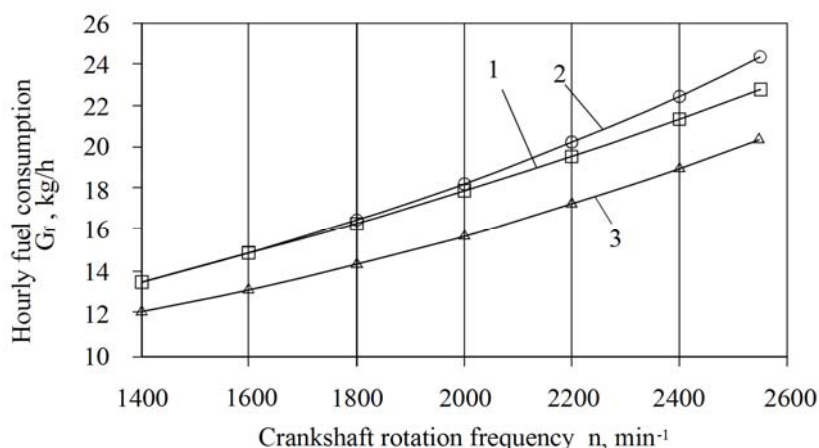
$\tau$  – the number of beats;

$g_i$  – specific indicator fuel consumption, g/(kWh);

$H_u$  – lower heat of combustion of fuel, MJ/kg;

$\eta_i$  – indicator efficiency.

With an increase in the engine shaft rotation frequency, the time consumption of fuel increases in all test variants, which is associated with an increase in the cyclic supply  $q_{cyl}$  and with an increase in the number of cycles per unit of time  $n$  (Fig. 2).



1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 2 – Dependence of hourly fuel consumption on engine speed

Source: developed by the author

When only the fuel supply is turned off (curve 2), the time consumption of fuel increases  $G_f$  from 1.83 kg/h at  $n=1400 \text{ min}^{-1}$  to 4.97 kg/h at  $n = 2550 \text{ min}^{-1}$ , while the difference with the first option is between 0.0 and 0.5 kg/h. In the third option  $G_f$  increases from 1.33 kg/h to 5.11 kg/h, and compared to the first, the difference is from 0.41 kg/h to 1.1 kg/h. The decrease in hourly fuel consumption in the second and third options compared to the first is explained by the fact that when the fuel supply was turned off in some cylinders, the combustion process improved in others, caused by the improvement of evaporation (due to the increase in temperature), the increase in the range of the fuel jet, the improvement of atomization, and the reduction of uneven supply behind the cylinders due to an increase in the cyclic supply, that is, the indicator efficiency has increased. The greater decrease in variant 3 is due to the fact that, in addition to the improvement of the combustion process, there is a reduction in pumping stroke losses in the four-cylinder CPG drive.

Actual air consumption  $G_{air}$  is determined by dependence [6]

$$G_{air} = K \sqrt{\Delta h \cdot \rho_{air}}, \text{ kg/h}, \quad (4)$$

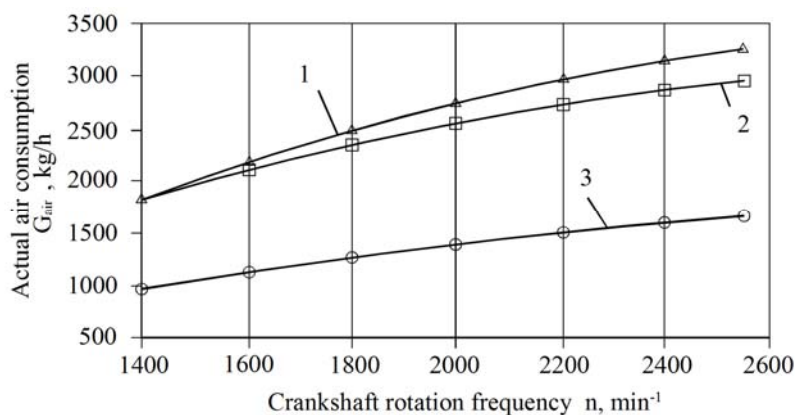
where  $K$  – constant measuring nozzle,  $K = 24$ ;

$\Delta h$  – testimony  $U$ -like water manometer, shows the vacuum in the intake manifold, mm of water art.;

$\rho_{air}$  – air density at ambient temperature (assumed to be constant),  $\text{kg/m}^3$ .

With 1, 2, 3 test options  $G_{air}$  increases (Fig. 3) due to increasing rarefaction in the intake manifold when the crankshaft rotation frequency increases.

With the 2nd option, the actual air consumption is slightly reduced. This is explained as follows: during the exhaust stroke during the overlap of the gas distribution phases, when the intake and exhaust valves are open, the outgoing exhaust gases draw fresh air into the cylinder, and since in this case there is no fuel supply to the four cylinders, there are no exhaust gases, then and the amount of actual air flow is therefore reduced due to bypass valves. When pumping losses are turned off in the CPG (curve 3)  $G_{air}$  compared to options 1 and 2, it is almost halved due to the fact that there are no pumping losses in the disconnected cylinders.



1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 3 – Dependence of actual air flow on engine speed

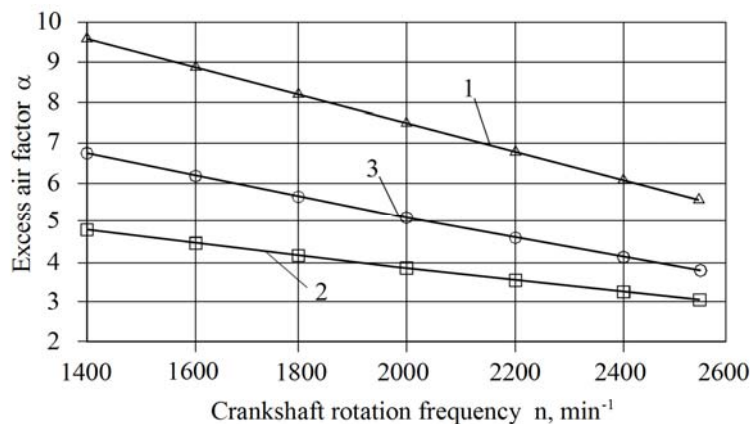
Source: developed by the author

Excess air factor  $\alpha$  is determined by dependence [6]

$$\alpha = \frac{G_{air}}{G_f \cdot L_0}, \tag{5}$$

where  $L_0$  – theoretically necessary amount of air for burning one kilogram of fuel, kg/kg.

With all test options  $\alpha$  decreases (Fig. 4), as the growth rate of hourly fuel consumption  $G_f$  higher than the growth rate of actual air flow  $G_{air}$ . So, for example, with 1 option  $G_f$  increases by 4.01 times, and  $G_{air}$  in 1.97 times.



1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 4 – Dependence of the coefficient of air excess on the frequency of rotation of the crankshaft of the engine

Source: developed by the author

In the second version of the tests, the coefficient of air excess is the lowest due to the fact that the amount of actual air flow is reduced by half, since mixture formation occurs only in half of the engine cylinders. In the third option  $\alpha$  lower than that of the original engine due to the fact that with the shutdown of CPG pumping losses in the cylinder part, the air consumption decreases to a greater extent than the fuel consumption (at the nominal mode

$G_{air}$  decreased by 2 times, and  $G_f$  by 1.3 times), but higher than when only fuel is turned off, which is due to the difference in fuel consumption for options 2 and 3 and the fact that  $G_{air}$  when the fuel is turned off differs from  $G_{air}$  when fuel is turned off and CPG pumping losses are less than 2 times. There is no dependence of the indicator efficiency on the coefficient of air excess in this case, since the value  $\alpha \geq 3$ .

Theoretical air consumption  $G_{Tair}$  is determined by dependence

$$G_{Tair} = 0,12 \cdot V_h \cdot i_{cyl}'' \cdot \rho_{air} \cdot \frac{n}{\tau} = C \cdot \rho_{air} \cdot n \cdot i_{cyl}'' , \text{ kg/h}, \quad (6)$$

where  $V_h$  – working volume of one cylinder, l;

$i_{cyl}''$  – the number of working engine cylinders (in this case, in options 1 and 2  $i_{cyl}''=8$ , in the third  $i_{cyl}''=4$ );

$C$  – constant (for a diesel engine  $C = 0,12 \cdot V_h / \tau = 0,02034$ ).

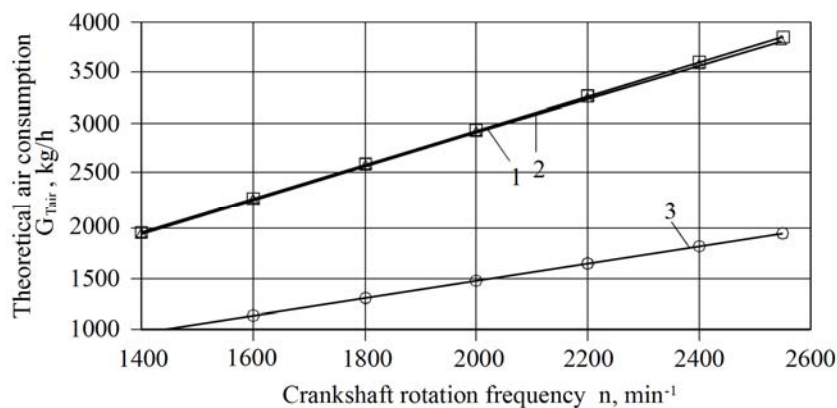
As can be seen from Figure 5, for all test options  $G_{Tair}$  increases due to an increase in engine speed  $n$ .

With 1 and 2 variants of tests  $G_{Tair}$  the same when the cylinders are turned off, according to option 3, it decreased by 2 times due to the absence of pumping losses in cylinders 1 and 4 and 6 and 7.

Fill factor  $\eta_v$  is equal to the ratio of actual air flow  $G_{air}$  to the theoretical  $G_{Tair}$

$$\eta_v = \frac{G_{air}}{G_{Tair}}. \quad (7)$$

For all test options  $\eta_v$  decreases (Fig. 6) due to the different rate of change of actual and theoretical air flow (for option 1  $G_{air}$  increases by 1.71 times,  $G_{Tair}$  increases by 1.96 times). Declining growth rate  $G_{air}$  is explained by a decrease in air density due to heating in the intake manifold and an increase in temperature with an increase in engine crankshaft rotation frequency, as well as due to an increase in aerodynamic losses.

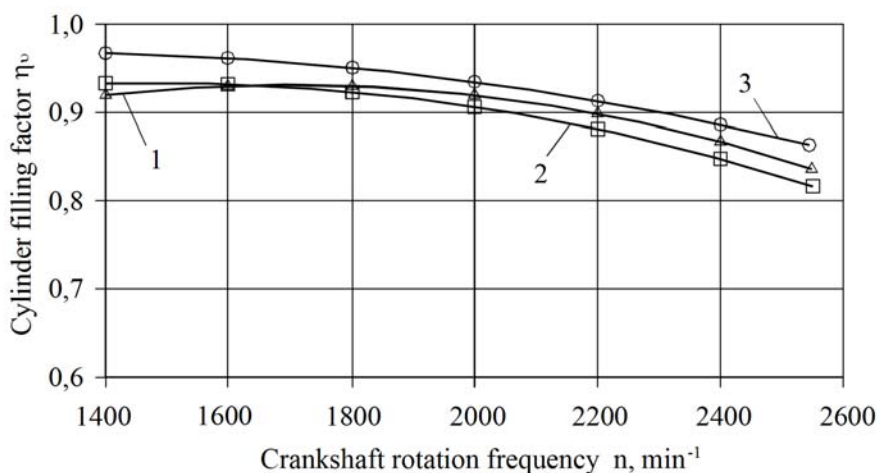


1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 5 – Dependence of theoretical air flow rate on engine crankshaft rotation frequency

Source: developed by the author

In the variant with no pumping losses in the CPG, compared to the original engine, the filling factor increased due to the fact that the air is heated only in four cylinders, as opposed to eight, and also due to the reduction of aerodynamic resistance at the intake.

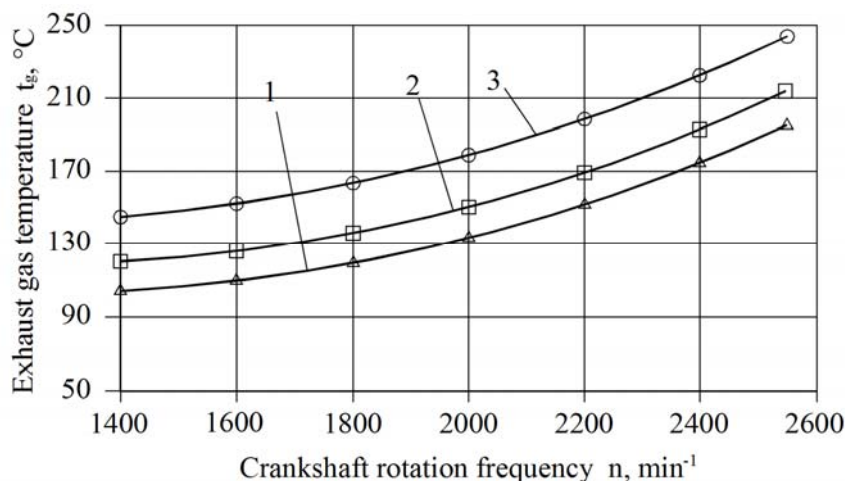


1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 6 – Dependence of the filling factor on the engine crankshaft rotation frequency

Source: developed by the author

Exhaust gas temperature  $t_g$  increases in all variants (Fig. 7), since the amount of heat introduced per cycle increases (by increasing the cyclic supply), heat losses decrease (with a decrease in the cycle time), afterburning continues at the output stroke (due to a decrease in the time of the combustion process).



1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 7 – Dependence of exhaust gas temperature on engine crankshaft speed

Source: developed by the author

In the second and third options, the temperature of the exhaust gases  $t_g$  increased compared to the first, as the cyclic fuel supply increased, in the second option it is lower than in the third, since the exhaust gases coming out of the working second, third, fifth and eighth



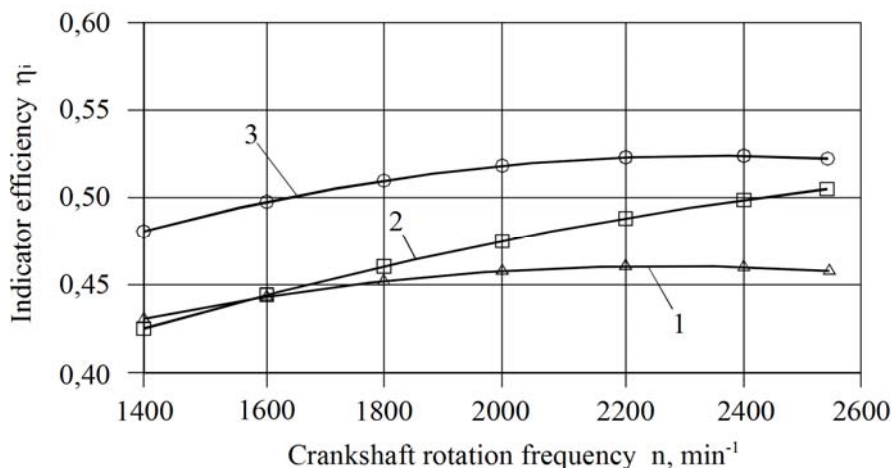
cylinders are diluted by air coming out of 1, 4, 6 and 7 cylinders.

The indicative efficiency is determined by the formula

$$\eta_i = \frac{P_i \cdot L_0 \cdot \alpha}{H_u \cdot \eta_v \cdot \rho_{air}}, \quad (8)$$

where  $P_i$  – average indicator pressure, MPa.

Indicator efficiency depends mainly on  $P_i$  and  $\alpha$ , and increases with all test options to a certain frequency (Fig. 8), since the rate of increase of the average indicator pressure exceeds the rate of decrease  $\alpha$ , and at  $n$  above this frequency, the indicator efficiency slightly decreases, because the rate of decrease  $\alpha$  becomes higher than the growth rate  $P_i$ .



1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 8 – Dependence of the indicator efficiency on the engine crankshaft rotation frequency

Source: developed by the author

In the second option  $\eta_i$  increases, compared to option 1, due to the improvement of the processes of mixture formation and combustion.

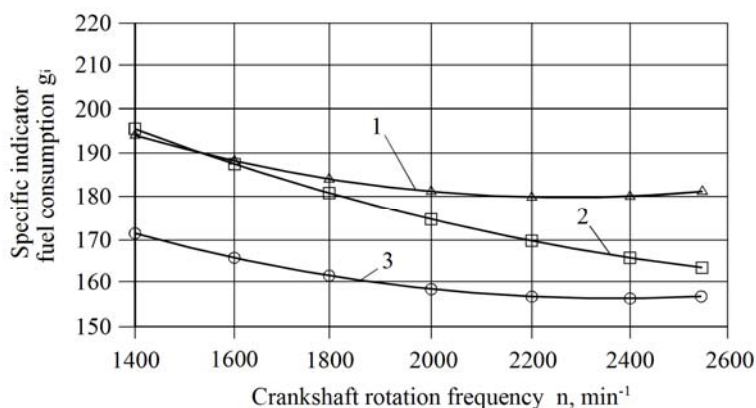
In the third version of the tests  $\eta_i$  higher, compared to the others, due to a two-fold increase in the average indicator pressure, although the excess air ratio decreased to 5.51.

Specific indicator fuel consumption  $g_i$  is determined by dependence

$$g_i = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_i}. \quad (9)$$

The specific indicator fuel consumption decreases, as was said earlier, due to the improvement of the processes of mixture formation and combustion with an increase  $\eta_i$  (Fig. 9).

In variant 2 of the tests, compared to variant 1, the specific indicator fuel consumption decreases due to a decrease in hourly fuel consumption. In case of option 3 reduction  $g_i$  is carried out by increasing the average indicator pressure.



1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply is turned off in 50% of cylinders; 3 – with fuel cut off in 50% of cylinders and the absence of pumping losses in CPG

Figure 9 – Dependence of the specific indicator fuel consumption on the rotation frequency engine crankshaft

Source: developed by the author

### Conclusions.

1. Considered 3 variants of engine operation without load: 1 – test of the original engine; 2 – test with disconnection of four cylinders by stopping the fuel supply; 3 – test with the disconnection of four cylinders by simultaneously stopping the fuel supply and the absence of pumping losses of the cylinder-piston group (CPG) of the disconnected cylinders.

2. It was established that when the crankshaft rotation frequency increases from 1400  $\text{min}^{-1}$  to 2550  $\text{min}^{-1}$  when the fuel supply to half of the cylinders is turned off, the fuel economy changes from 0.0 to 0.53 kg/h. When the fuel is turned off and in the absence of pumping of CPG losses, fuel economy changes from 1.2 kg/h to 3.88 kg/h.

3. Recommendations have been developed that allow to increase the efficiency of wheeled vehicles by 11-26% by disconnecting the part of the cylinders.

### List of references

1. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Елифанов и др. Киев: Техника, 1998. 312 с.
2. Козлов А.В., Теренченко А.С. Современные требования к уровню энергетической эффективности транспортных средств. *Журнал автомобильных инженеров*. 2014. № 1 (84). С. 28–33.
3. Габдрафиков Ф.З., Инсафутдинов С.З. Повышение экономичности работы тракторных дизелей. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2004. № 7. С. 23-25.
4. Молодан А.О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.22.20 / Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків, ХНАДУ, 2021. 387 с.
5. Молодан А.А. Оценка технического состояния цилиндра-поршневой группы двигателя с учетом разделения потоков газов, проходящих в картер: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.20 / Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків, ХНАДУ, 2011. 184 с.
6. Молодан А.О. Підвищення енергетичної ефективності колісних машин методом відключення циліндрів в автотракторному двигуні. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. № 2 (10). С. 48-53.
7. Молодан А.О. Вплив на потужність двигуна колісної машини механічних втрат при відключенні циліндрів. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки*. 2018. №2 (82). С. 105-110.

## References

1. Epifanov, S.V., Kuznetsov, B.I. & Bogaenko, I.N. et al. (1998). *Sintez sistem upravleniya i diagnostirovaniya zazoturbinnnykh dvigatelei* [Synthesis of control systems and diagnostics of gas turbine engines]. Kiev: Tekhnika [in Ukrainian].
2. Kozlov, A.V. & Terenchenko, A.S. (2014). Sovremennyye trebovaniya k urovnyu energeticheskoi effektivnosti transportnykh sredstv [Modern requirements for the level of energy efficiency of vehicles]. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov – Journal of Automotive Engineers*, 1 (84), 28–33 [in Ukrainian].
3. Gabdrifkov, F.Z. & Insafutdinov, S.Z. (2004). Povyshenie ekonomichnosti raboty traktornykh dizeliv [Improving the efficiency of tractor diesel engines]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaistva – Mechanization and electrification of agriculture*, 7, 23-25 [in Ukrainian].
4. Molodan, A.O. (2021). Naukovi osnovy zabezpechennia nadiinosti i funktsionalnoi stabilitii kolisnykh mashyn v rezhymi vidkliuchennia chastyny tsylindriv [Scientific bases of ensuring the reliability and functional stability of wheeled vehicles in the mode of disconnection of part of the cylinders]. *Extended abstract of Candidate's thesis*. Kharkiv, KhNADU [in Ukrainian].
5. Molodan AA (2011). Otsenka tekhnicheskogo sostoianiya tsylyndro-porshnevoi hruppy dvyhatelia s uchetom razdeleniya potokov hazov, prokhodiashchykh v karter: *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kharkiv, KhNADU [in Ukrainian].
6. Molodan AO (2019). Pidvyshchennia enerhetychnoi efektyvnosti kolisnykh mashyn metodom vidkliuchennia tsylindriv v avtotraktornomu dvyhuni [Increasing the energy efficiency of wheeled vehicles by the method of turning off the cylinders in the tractor engine]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, 2(10), 48-53 [in Ukrainian].
7. Molodan, A.O. (2018). Vplyv na potuzhnist dvyhuna kolisnoi mashyny mekhanichnykh vtrat pry vidkliuchenni tsylindriv [The effect of mechanical losses on the power of the wheeled machine engine when the cylinders are disconnected]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Zhytomyr State University of Technology. Technical sciences*, 2 (82), 105-110 [in Ukrainian].

**А.О. Молодан**, проф., д-р техн. наук, **Є.О. Дубінін**, проф., д-р техн. наук, **О.С. Полянський**, проф., д-р техн. наук, **М.М. Потапов**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Полтавський**, асп., **М.В. Краснокутський**, асп.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна*

### **Зміни енергетичних показників двигуна при відключенні циліндрів в ненавантаженому режимі роботи**

Робота двигуна на невеликих навантаженнях і холостому ходу характеризується погіршенням його основних показників. Виникає необхідність вдосконалення роботи двигуна на цих режимах. Одним із способів є від'єднання частини циліндрів двигуна.

В статті досліджено підвищення ефективності роботи двигуна в режимі холостого ходу шляхом обґрунтування кількості зупинок циліндра та визначення енергетичних параметрів його роботи. Були досліджені режими роботи двигуна без навантаження: 1 – випробування вихідного двигуна; 2 – випробування з відключенням чотирьох циліндрів припиненням подачі палива; 3 – випробування з відключенням чотирьох циліндрів одночасним припиненням подачі палива і відсутністю насосних втрат циліндро-поршневої групи (ЦПГ) відключених циліндрів.

Встановлено, що при збільшенні частоти обертання колінчастого вала від  $1400 \text{ хв}^{-1}$  до  $2550 \text{ хв}^{-1}$  при відключенні подачі палива в половину циліндрів економія палива змінюється від 0 до 0,53 кг/год. При відключенні палива і при відсутності насосних втрат ЦПГ економія палива змінюється від 1,2 кг/год до 3,88 кг/год. Розроблено рекомендації, які дозволяють шляхом відключення частини циліндрів збільшити економічність колісних машин на 11-26%.

### **відключення циліндрів, робота без навантаження, насосні втрати**

*Одержано (Received) 09.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.120-127](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.120-127)**Ю.В. Дзядикевич**, проф., д-р техн. наук*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна***О.Б. Сван**, доц., канд. мед. наук*Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського, Тернопіль, Україна***О.П. Захарчук**, доц., канд. техн. наук, **П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук, **Р.І. Розум**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Буряк**, доц., канд. техн. наук*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна**e-mail: yu.dziadykevych@wunu.edu.ua, svan@tdmu.edu.ua, olenaskyba8500@gmail.com, ppopovich@ukr.net, rozoom\_ruslan@ukr.net, burjak74@ukr.net*

## Захист елементів двигунів транспортних засобів від окислення: технологічний аспект

Стаття присвячена проблемі захисту металевих конструкцій елементів двигунів транспортних засобів, а саме лопаток турбін, із тугоплавких металів і сплавів на їх основі від високотемпературного окислення. З метою забезпечення збільшення ресурсу роботи останніх були розроблені багатокомпонентні композиційні покриття на основі тугоплавких сполук, що володіють низькою швидкістю дифузної взаємодії. Розроблено методику і проведено низку досліджень щодо підвищення жаростійкості робочих лопаток турбін. Під час досліджень на робочих поверхнях було сформовано дифузійне боросиліцидне покриття на яке за допомогою шлікерного методу було нанесено шар із дисиліцида молібдена товщиною 120 мкм. Проведені дослідження показали, що при збільшенні товщини (понад 120 мкм) шару дисиліцидної суспензії спостерігалось її відрив від боросилікатної робочої поверхні лопаті турбіни. У зв'язку, з чим встановлено, що товщина шару  $\text{MoSi}_2$  не повинна перевищувати 120 мікрон. За результатами випробування боросиліцидованих лопаток із нанесенням на них шару  $\text{MoSi}_2$  визначено, що із комбінованим покриттям лопатки турбін, при температурі 1600 °С, працюють протягом 450 годин, що в півтора рази перевищує ресурс роботи зразків тільки з боросиліцидним покриттям. Визначено, що шлікерний шар із  $\text{MoSi}_2$  підвищує ресурс роботи боросиліцидного покриття. Проведено металографічний аналіз зразків, який показав, що багатшарове шлікерне покриття є композицією на основі дисиліцида молібдена, армованою тугоплавкими оксидами. Проведений рентенофазовий аналіз захисної поверхневого шару шлікерного покриття, котрий показав, що після високотемпературного опікання крім силіцидів молібдену містить низку таких оксидів:  $\text{ZrSiO}_4$ ,  $\text{HfSiO}_4$ ,  $\text{YAlO}_3$ ,  $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_3$ . Встановлено, що органічні сполуки одно- і двокомпонентних добавок, котрі вводять у насичуючу суміш, забезпечують формування на тугоплавких металах боросиліцидного покриття з певним розміщенням боридних і силіцидних шарів і регульованої структури силіцидного шару. Отже у сукупності ці фактори сприяють підвищенню ресурсу роботи захисного дифузного покриття.

**двигуни, газотурбінні двигуни, дифузне покриття, боросиліцидне покриття, жаростійкість, тугоплавкі сполуки.**

**Постановка проблеми.** З моменту відмови суспільства від коней, як основного засобу пересування, та часу створення перших парових двигунів і двигунів внутрішнього згорання, прогрес пішов дуже далеко. Багато науковців і винахідників у різні часи винаходило і патентувало велику кількість різних видів двигунів для транспортних засобів, що мають дивні характеристики. За рахунок останніх, вони були дешевшими при виробництві, потужнішими (в порівнянні з аналогами), довговічнішими та надійнішими ніж привичні нам сучасні двигуни внутрішнього згорання. На превеликий жаль усі дані характеристики не можливо поєднати в одній конкретній конструкції двигуна, у зв'язку з чим, у сучасних транспортних засобах

використання двигунів внутрішнього згорання займає лідируючі позиції. Більше того деякі винайдені двигуни випереджали свій час, а деякі напрацювання були використані для створення сучасних двигунів і технологій майбутнього. Також, необхідно відмітити, що в деяких видах двигунів виникає велика кількість експлуатаційних проблем. Одними з таких двигунів є газотурбінні двигуни, що володіють найбільшою питомою потужністю серед двигунів внутрішнього згорання. Які, маючи низку переваг, майже не використовуються в наземному транспорті, однією з причин чого є низька надійність їх елементів.

Робочі лопатки газотурбінних двигунів працюють в умовах знакозмінних навантажень і високих температур (більше 1000 °С), що приводить до зменшення їх ресурсу роботи, однією з причин якого є високотемпературне їх окислення. Одним із напрямів забезпечення довговічності лопаток газотурбінних двигунів є застосування жаростійких матеріалів на основі тугоплавких металів і сплавів. Однак, низька їх жаростійкість вимагає розробки жаростійких покриттів для захисту від високотемпературного окислення. На наш погляд, перспективним напрямом захисту лопаток турбін від окислення є формування на їх поверхні багатошарового композиційного покриття, у якому кожний шар композиції виконує певну функцію. Такий підхід повинен забезпечити захист лопаток від окислення і підвищити їх довговічність. З огляду на це, дослідження процесу підвищення жаростійкості робочих лопаток газотурбінних двигунів шляхом формування на їх поверхні композиційного багатошарового покриття є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемі захисту металевих конструкцій із тугоплавких металів і сплавів на їх основі від впливу високотемпературного окислення присвячена низка робіт вітчизняних вчених, зокрема Тісов О.В. [1], Акримов В.А. [2], Черепова Т.С. [3], Нежведілов А.Ю. [4].

В роботі Тісова О.В. виконано термодинамічний аналіз взаємодії композиційних порошкових сплавів системи Co-TiC з повітрям [1, с. 165]. Визначено основні закономірності їх окиснення. Показано взаємний вплив вмісту карбіду хрому та титану на кількісний склад продуктів окиснення. На основі проведених аналітичних досліджень встановлено співвідношення кількісного та якісного складу продуктів взаємодії порошкових сплавів системи Co-TiC з повітрям та співвідношення їх компонентів. Формування захисних шарів можна передбачити та контролювати їх утворенням шляхом вибору відповідних легуючих елементів та фаз зміцнення за допомогою термодинамічного аналізу. Автором створена загальна модель процесу окиснення порошкових композиційних сплавів системи Co-TiC. Показано вплив вмісту хрому в матеріалі на склад і властивості оксидного шару. Встановлено, що зі збільшенням вмісту хрому в підкладці (понад 25% за об'ємом) зростає крихкість оксидного шару, що призводить до його сильного зношування.

Промислово-технічні характеристики нанесення плазмового термозахисного покриття на робочі поверхні лопаток газових турбін з використанням порошку  $\text{CoCrAlYSi}$ , отриманого електронно-променевою плавкою відповідних сплавів, наведено в працях Акримова В.А. [2, с. 30] Автором показано необхідність проведення контрольованої підготовки поверхні леза перед початком процесу нанесення відповідного покриття. Час між очищенням поверхні і нанесенням покриття регламентується. Також, в праці вказано величину оптимальних параметрів процесу нанесення покриттів, проведено дослідження їх структури та хімічного складу. Доведено, що покриття, отримане за допомогою плазмового напилення, відповідає встановленим вимогам технічних умов підприємства на теплоізоляційне покриття лопатей насадок. Плазмові покриття широко застосовуються в сучасному виробництві

як для надання особливих властивостей поверхні деталей, їх ремонту, так і для продовження терміну служби деталей і цілих виробів.

Дослідником Череповим Т.С. розроблено жаростійкий та зносостійкий ливарний сплав на основі кобальту для зміцнення контактних поверхонь робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів замість серійних сплавів ХТН-61 і ВЖЛ-2 [3, с. 24]. Високі показники жаростійкості досягнуто за рахунок проведення комплексного легування (модифікації) сплаву. На основі досліджень жаростійкості, зносостійкості, структури та температури плавлення сплавів авторами встановлено оптимальний хімічний та фазовий склад розробленого сплаву.

Жаростійкість, на порядок вище, ніж у сплаву серії ХТН-61, при збереженні інших властивостей. Структурно-фазова стабільність (до 0,8 – 0,9 т Пул).

Задача підвищення корозійної стійкості сталевих лопаток газотурбінних двигунів є комплексною задачею, яка поєднує в собі вирішення багатьох локальних питань. Одним із напрямків їх вирішення є застосування результатів у галузі інтенсифікованого формування поверхневого шару за допомогою високоякісних інноваційних технологій, що дозволяють вирішувати завдання починаючи з етапу конструювання і виробництва та впродовж періоду експлуатації, ремонту та модернізації газових турбін, тобто забезпечуючи підтримання їх роботоздатності впродовж усього їх життєвого циклу з забезпеченням високого рівня надійності. Проведені Нежведіловим А.Ю. дослідження приводять нас до думки, що метод азотування за допомогою вакуумного термічного циклу плазми пульсуючого тліючого розряду є найбільш перспективним методом підвищення корозійної стійкості сталевих лопаток компресора ГТД за умови його використання з технічною та науковою базою [4, с. 79]. Автором розроблене та запропоноване відповідне обладнання, яке забезпечує можливість впровадження даного методу у масове виробництво.

Однак, необхідно відмітити, що кількість досліджень присвячених проблемі підвищення жаростійкості конструкцій на основі тугоплавких металів і їх сплавів є недостатньою. Це зумовило необхідність проведення подальшого їх вивчення та дослідження.

Отже, проводячи аналіз робіт, присвячених проблемі захисту тугоплавких металів від високотемпературного окислення, можна зробити висновок, що перспективним захистом виробів повинні бути багатокомпонентні композиційні покриття на основі тугоплавких сполук, які мають низьку швидкість дифузійної взаємодії з основою і забезпечують високий ресурс роботи.

**Постановка завдання.** Розробка та обґрунтування складу багатокомпонентних композиційних покриттів на основі тугоплавких сполук з низькою швидкістю дифузійної взаємодії з метою забезпечення збільшення ресурсу роботи елементів двигунів транспортних засобів, а саме: лопаток газотурбінних двигунів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сьогодні найбільш поширеним методом захисту високотемпературних покриттів тугоплавких матеріалів, що працюють у високотемпературних окислювальних середовищах, є нанесення силіцидного покриття, що дозволяє створити на поверхні деталі «самозаліковуючу» оксидну плівку.

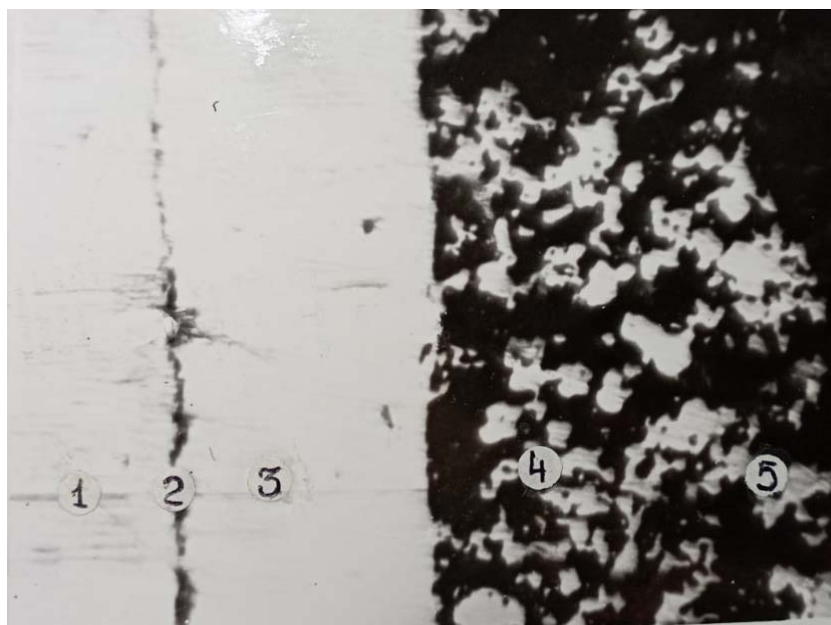
Найбільш ефективним, із усіх силіцидів, на нашу думку, є використання дисиліциду молібдену. Із зростанням робочих температур експлуатації деталей із силіцидним покриттям фактор дифузійних процесів між дисиліцидом молібдену та металевою основою стає домінуючим та незворотнім. Знизити протікання небажаних процесів дифузії, які протікають у граничних шарах основи та покриття, можна, за рахунок формування бар'єру. Загальновідомим є факт, що бар'єрним шаром для дифундуючих атомів служить межа фаз, і у випадку використання багатшарових

покриттів спостерігається нижчий показник дифузії, у порівнянні із одношаровими покриттями.

Зменшення дифузійних процесів також відбувається у випадках, коли дифундуючий елемент формує багатокомпонентні фази, які забезпечують зниження їх хімічного потенціалу. Даний варіант реалізується при використанні боросиліцидного покриття.

Ще одним варіантом підвищення опору окисленню шлікерної частини покриття є нанесення на її поверхню композиції компоненти які мають високу температуру плавлення, низьку пружність дисоціації, не утворюють легкоплавких і летких сполук із елементами, які входять в склад окислювального середовища, а також в склад дифузійного покриття. Необхідно зазначити, що тим вимогам найбільш задовільняють оксиди цирконію, гафнію, ітрію, алюмінію та інші. На підставі цього для розробки високотемпературної композиції можна використовувати як наповнювач оксидну цирконієву – ітрієву кераміку ЦІС, яка містить 72 – 78%  $ZrO_2 + HfO_2$  і 22-28%  $Y_2O_3$ . Основою може слугувати дисиліцид молібдену, який забезпечує надійне закріплення композиції на поверхні спеченого силіцидного шару. Необхідно зазначити, що шлікерне покриття повинно мати хорошу покривну здатність з цією метою в склад силіцидної композиції потрібно ввести речовину, яка має клеючі властивості, наприклад натрій алюмінат  $NaAlO_2$ .

Попередньо проведені досліді щодо вибору інгредієнтів композиції показали, що використання в суміші менше 60 %  $MoSi_2$  погіршує закріплення високотемпературного шару. Якісний перший шлікерний шар товщиною до 250 мкм формується при такому вмісті компонентів (мас. %):  $MoSi_2$ –60, ЦІС-2 – 30 і  $NaAlO_2$  – 10. З метою підвищення жаростійкості і ресурсу роботи багатшарової композиції кожний наступний шар товщиною приблизно 150 мкм вмістив на 20 % більше оксидної кераміки ніж попередній. Металографічний аналіз зразків показав, що багатшарове шлікерне покриття є композиція на основі дисиліцида молібдена, армована тугоплавкими оксидами ( рис.1).



Травл. HF :  $HNO_3$ :  $H_2SO_4$ = 1:1:1.

1 – металева основа ; 2 – MoB; 3 –  $MoSi_2$ ; 4 – силіцид – оксидна суміш; 5– суміш оксидів

Рисунок 1 – Мікроструктура багатшарованого покриття на робочій лопатці, x 400

Джерело: розроблено авторами

Рентгенофазовий аналіз захисного поверхневого шару шлікерного покриття показав, що після високотемпературного обпикання крім силіцидів молібдену містить низку таких оксидів:  $ZrSiO_4$ ,  $HfSiO_4$ ,  $YAlO_3$ ,  $Y_4Al_2O_3$ .

З метою забезпечення збільшення ресурсу роботи робочих лопаток турбін газотурбінних двигунів були розроблені багатокомпонентні композиційні покриття на основі тугоплавких сполук, що володіють низькою швидкістю дифузної взаємодії. Розроблено методику і проведено низку досліджень щодо підвищення жаростійкості робочих лопаток турбін газотурбінних двигунів. Під час досліджень на робочих поверхнях було сформовано дифузійне боросиліцидне покриття на яке за допомогою шлікерного методу було нанесено шар із дисиліцида молібдена товщиною 120 мкм. Для приготування суспензії використовували порошок  $MoSi_2$  зернистістю до 40 мкм і дистильовану воду у співвідношенні 3:1. Лопатки турбін після процесу нанесення силіцидного шару спочатку піддавали просушуванню при температурі 100 °C протягом пів години, а потім проводили їх нагрів до температури 1000 °C при якій давали витримку 15 хв. Такий технологічний режим дозволяє забезпечити закріплення шлікерного шару по всій поверхні дифузійного покриття робочої частини лопатки турбіни. Проведені досліди показали, що у випадку збільшення товщини (більше 120 мкм) шару дисиліцидної суспензії спостерігається її відшарування від боросиліцидної поверхні робочої лопатки. У зв'язку з чим, нами зроблено висновок, що товщина шару дисиліцидної суспензії  $MoSi_2$  не повинна перевищувати 120 мкм.

В результаті проведених нами випробувань боросиліцидованих лопаток турбін газотурбінних двигунів із нанесеним шаром  $MoSi_2$  нами відмічено, що у випадку використання комбінованого покриття при температурі 1600 °C, лопатки турбін відпрацювали до відмови протягом 450 годин. Даний показник ресурсу роботи є в півтора рази вищим, в порівнянні із зразками, що мають тільки боросиліцидне покриття. Таким чином, шлікерний шар із дисиліцидної суспензії  $MoSi_2$  дозволяє підвищити ресурс роботи боросиліцидного покриття, а отже і лопаток турбіни двигуна в цілому.

**Висновки.** Таким чином, можна зробити висновок, що органічні сполуки одно- і двокомпонентних добавок, котрі вводять у насичуючу суміш, забезпечують формування на тугоплавких металах боросиліцидного покриття з певним розміщенням боридних і силіцидних шарів і регульованої структури силіцидного шару. У випадку використання комбінованого покриття при температурі 1600 °C, лопатки турбін газотурбінних двигунів відпрацювали до відмови протягом 450 годин. Даний показник ресурсу роботи є в півтора рази вищим, в порівнянні із зразками, що мають тільки боросиліцидне покриття. Таким чином, шлікерний шар із дисиліцидної суспензії  $MoSi_2$  дозволяє підвищити ресурс роботи боросиліцидного покриття, а отже і лопаток турбіни газотурбінних двигунів в цілому. Однак, необхідно відмітити, що товщина шару дисиліцидної суспензії  $MoSi_2$  не повинна перевищувати 120 мкм, оскільки у випадку збільшення товщини (більше 120 мкм) шару дисиліцидної суспензії спостерігається її відшарування від боросиліцидної поверхні робочої лопатки.

## Список літератури

1. Прогнозування високотемпературного окиснення жароміцних сплавів системи Co-TiC / О. В. Тісов та ін. . *Проблеми тертя та зношування*. 2012. Вип. 57. С. 163-169.
2. Промислова технологія нанесення двошарових плазмових теплозахисних покриттів на лопатки газових турбін / В.А. Акримов та ін. *Сучасна електроталургія*. 2020. № 4. С.28-31.
3. Зносостійкий сплав для захисту контактних поверхонь робочих лопаток авіаційних двигунів від окислення при високих температурах / Т.С. Черепова, Г.П. Дмитрієва, А.В. Носенко, О.М. Семирга . *Наука та інновації*. 2014. Т. 10, № 4. С. 22—31



4. Нежведілов А.Ю. Аналіз методів підвищення корозійної стійкості сталевих лопаток компресора гтд Національний аерокосмічний університет ім. М.Е. Жуковського "ХАІ", Україна. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2011. № 6 (83). С.77-80.
5. Дзядикевич, Ю. Шляхи підвищення жаростійкості виробів із тугоплавких металів від високотемпературного окислення. *Українська наука : минуле, сучасне, майбутнє : щорічник*. 2008. Вип. 13. С. 20-28.
6. Спосіб одержання жаростійкого покриття на виробках із ніобію, танталу та їх сплавів : пат. 32804 А U Україна, МПК (2006) С23С 10/00. / Ю. В. Дзядикевич, Л. І. Кицкай (Україна); заявник та патентовласник Ю. В. Дзядикевич, Л. І. Кицкай. – № 98042154; заявл. 29.04.1998; опубл. 15.02.2001, бюл. № 1.
7. Спосіб формування жаростійкого покриття на виробках із тугоплавких металів і сплавів : пат. 30770 А U Україна, МПК (2006) С23С 12/00. / Ю. В. Дзядикевич, Л. І. Кицкай (Україна); заявник та патентовласник Ю. В. Дзядикевич, Л. І. Кицкай. – № 98052755; заявл. 27.05.1998; опубл. 29.12.1999, бюл. № 8.
8. Спосіб обробки виробів на основі карбіду кремнію та дисиліциду молібдену : пат. 30240 А U Україна, МПК С04В 35/56 (2006.01) С04В 41/87 (2006.01) Н05В 3/14 (2006.01). / Ю. В. Дзядикевич, І. Й. Бочар, Р. М. Горбатюк (Україна); заявник та патентовласник Ю. В. Дзядикевич, І. Й. Бочар, Р. М. Горбатюк. – № 98020580; заявл. 03.02.1998; опубл. 15.11.2000, бюл. № 6.
9. Склад суміші для борування виробів із карбіду кремнію та дисиліциду молібдену : пат. 30237 А U Україна, МПК С23С 10/30 (2006.01) С23С 10/48 (2006.01) С23С 10/56 (2006.01). / Ю. В. Дзядикевич, І. Й. Бочар, Р. М. Горбатюк (Україна); заявник та патентовласник Ю. В. Дзядикевич, І. Й. Бочар, Р. М. Горбатюк. – № 98020577; заявл. 03.02.1998; опубл. 15.11.2000, бюл. № 6.
10. Спосіб підвищення пластичності молібдену і вольфраму та їх сплавів : пат. 3663 U Україна, МПК С22F 1/18 (2006.01). / Ю. В. Дзядикевич (Україна); заявник та патентовласник Тернопільська академія народного господарства. – № 2004020747; заявл. 03.02.2004; опубл. 15.12.2004, бюл. № 12.
11. Корбак С.І., Розум Р.І. Двигуни: минуле і сьогодення. *Тенденції і виклики сучасної аграрної науки: теорія і практика: зб. матеріалів III Міжнародної наук. конф. (м. Київ, 20-22 жовтня 2021 р.)*. Київ: НУБіП, 2021. С. 312.
12. Rozum R.I., Buriak M. V., Zakharchuk O. P. Innovative engines in the history of automobile building. *Modern engineering and innovative technologies*. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany) 2021. Issue 18. Part 2. P. 64 – 67.
13. Rozum R.I., Shevchuk O. S., Prohni P. B. Optimization of working processes of internal combustion engines with the purpose of improving their environmentality. *Modern engineering and innovative technologies*. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany) . 2022. Issue 19. Part 1. P. 147-150.
14. Фалович Н.М., Верес М.В., Розум Р.І. та інші. Огляд обладнання для діагностики та ремонту двигунів внутрішнього згорання. *Наукові записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. 33 (72). № 5. С.325-329.
15. Методологія діагностування автомобільних дизельних двигунів. / Р. Розум та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. 1(18). С. 138-142.

## References

1. Tisov, O.V., Dukhota, O.I., Cherepova, T.S., Lytvynenko, V.F. & Miedviedieva, N.A. (2012). Prohnozuvannya vysokotemperaturnoho okysnennia zharomitsnykh splaviv systemy So-TiS [Prediction of high-temperature oxidation of heat-resistant alloys of the Co-TiS system]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Friction and wear problems.. Issue 57*, 163-169 [in Ukrainian].
2. Akrymov, V.A. Hrechaniuk, I.M., Smashniuk, Yu.O., Hrechaniuk, V.H. & Liubarenko, M.P. (2020). Promyslova tekhnolohiia nanesennia dvosharovykh plazmovykh teplozakhysnykh pokryttiv na lopatky hazovykh turbin [Industrial technology of applying two-layer plasma heat-protective coatings on gas turbine blades] . *Suchasna elektrometalurhiia – Modern electrometallurgy*, 4, 28-31. [in Ukrainian].
3. Cherepova, T.S. Dmytriieva, H.P., Nosenko, A.V. & Semyrha, O.M. (2014). Znosostiikiy splav dlia zakhystu kontaknykh poverkhon robochykh lopatok aviatsiinykh dvyhuniv vid okyslennia pry vysokykh temperaturakh [Wear-resistant alloy to protect the contact surfaces of the working blades of aircraft engines from oxidation at high temperatures] . *Nauka ta innovatsii – Science and innovation, Vol. 10*, 4, 22–31 [in Ukrainian].
4. Nezhvedilov, A.Iu. (2011). Analiz metodiv pidvyshchennia koroziinoi stiikosti stalevykh lopatok kompresora htd Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet im. M.E. Zhukovskoho "KhAI", Ukraina. [Analysis of methods of increasing the corrosion resistance of steel blades of the compressor gtd National

- Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "HAI", Ukraine]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia – Aerospace engineering and technology*, 6 (83), 77-80. [in Ukrainian].
5. Dziadykevych, Yu. (2008). Shliakhy pidvyshchennia zharostiikosti vyrobiv iz tuhoplavkykh metaliv vid vysokotemperaturnoho okyslennia [Ways to increase the heat resistance of products made of refractory metals from high-temperature oxidation]. *Ukrainska nauka : mynule, suchasne, maibutnie : shchorichnyk – Ukrainian science: past, present, future: yearbook, Issue 13*. 20-28. [in Ukrainian].
  6. Sposib oderzhannia zharostiikoho pokryttia na vyrobakh iz niobiiu, tantalu ta yikh splaviv [The method of obtaining a heat-resistant coating on products made of niobium, tantalum and their alloys]. Pat. 32804 A U Ukraina, MPK (2006) C23C 10/00. / Yu. V. Dziadykevych, L. I. Kytskai (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Yu. V. Dziadykevych, L. I. Kytskai. – № 98042154; zaiavl. 29.04.1998; opubl. 15.02.2001, biul. № 1. [in Ukrainian].
  7. Sposib formuvannia zharostiikoho pokryttia na vyrobakh iz tuhoplavkykh metaliv i splaviv [The method of forming a heat-resistant coating on products made of refractory metals and alloys]. Pat. 30770 A U Ukraina, MPK (2006) C23C 12/00. / Yu. V. Dziadykevych, L. I. Kytskai (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Yu. V. Dziadykevych, L. I. Kytskai. – № 98052755; zaiavl. 27.05.1998; opubl. 29.12.1999, biul. № 8. [in Ukrainian].
  8. Sposib obrobky vyrobiv na osnovi karbidu kremniiu ta dysylitsydu molibdenu [The method of processing products based on silicon carbide and molybdenum disilicide]. Pat. 30240 A U Ukraina, MPK C04B 35/56 (2006.01) C04B 41/87 (2006.01) H05B 3/14 (2006.01). / Yu. V. Dziadykevych, I. Y. Bochar, R. M. Horbatiuk (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Yu. V. Dziadykevych, I. Y. Bochar, R. M. Horbatiuk. – № 98020580; zaiavl. 03.02.1998; opubl. 15.11.2000, biul. № 6. [in Ukrainian].
  9. Sklad sumishi dlia boruvannia vyrobiv iz karbidu kremniiu ta dysylitsydu molibdenu [The composition of the mixture for boronizing products made of silicon carbide and molybdenum disilicide]. Pat. 30237 A U Ukraina, MPK C23C 10/30 (2006.01) C23C 10/48 (2006.01) C23C 10/56 (2006.01). / Yu. V. Dziadykevych, I. Y. Bochar, R. M. Horbatiuk (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Yu. V. Dziadykevych, I. Y. Bochar, R. M. Horbatiuk. – № 98020577; zaiavl. 03.02.1998; opubl. 15.11.2000, biul. № 6. [in Ukrainian].
  10. Sposib pidvyshchennia plastychnosti molibdenu i volframu ta yikh splaviv [The method of increasing the plasticity of molybdenum and tungsten and their alloys]. Pat. 3663 U Ukraina, MPK C22F 1/18 (2006.01). / Yu. V. Dziadykevych (Ukraina); zaiavnyk ta patentovlasnyk Ternopilska akademiia narodnoho gospodarstva. – № 2004020747; zaiavl. 03.02.2004; opubl. 15.12.2004, biul. № 12.
  11. Korbak S.I., Rozum R.I. (2021). Dvyhuniv: mynule i sohodennia [Trends and challenges of modern agricultural science: theory and practice]. Tendentsii i vyklyky suchasnoi aharnoi nauky: teoriia i praktyka: III Mizhnarodna nauk. konf. (m. Kyiv, 20-22 zhovtnia 2021 r.) – III International Scientific Conference (p. 312.). Kyiv: NUBiP [in Ukrainian].
  12. Rozum, R.I., Buriak, M. V. & Zakharchuk, O. P. (2021). Innovative engines in the history of automobile building. *Modern engineering and innovative technologies*. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany) . Issue 18, Part 2, P. 64 – 67 [in English].
  13. Rozum, R.I., Shevchuk, O. S. & Prohni, P. B. (2022). Optimization of working processes of internal combustion engines with the purpose of improving their environmentality. *Modern engineering and innovative technologies*. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany), Issue 19, Part 1, P. 147-150 [in English].
  14. Falovych, N.M., Veres, M.V., Rozum, R.I. et al. (2022). Ohliad obladnannia dlia diahnostyky ta remontu dvyhuniv vnutrishnoho zghorannia [Overview of equipment for diagnostics and repair of internal combustion engines]. *Naukovi zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I.Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific notes of V.I. Vernadsky Tavri National University. Series: Technical sciences*, 33 (72), № 5, 325-329. [in Ukrainian].
  15. Rozum, R., Buriak, M., Popovych, P., Prohni, P. & Zakharchuk, O. (2022). Metodolohiia diahnostuvannia avtomobilnykh dyzelnykh dvyhuniv [Methodology for diagnosing automotive diesel engines]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti – Modern technologies in mechanical engineering and transport*, 1(18), 138-142. [in Ukrainian].

**Yuriy Dzyadykevych**, Prof., DSc.

*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

**Olga Swan**, Assoc. Prof., PhD med. sci.

*Ternopil National Medical University named after I.Ya. Gorbachevskii, Ternopil, Ukraine*

**Olena Zakharchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Pavlo Popovich**, Prof., DSc., **Ruslan Rozum**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mukola Buryak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

**Protection of Vehicle Engine Elements Against Oxidation: Technological Aspect**

Multi-component composite coatings based on refractory compounds with a low speed of diffuse interaction, are concerned in the article in order to increase the service life. A study was conducted to increase the heat resistance of working blades, in which a diffusion borosilicide coating was formed on their surface; on the surface of coating a layer of molybdenum disilicide with a thickness of 120  $\mu\text{m}$  was applied using the slip method.

Experiments showed that when the thickness (over 120 microns) of the layer of disilicide suspension was increased, its detachment from the borosilicate surface of the working blade was observed. It was found that the thickness of the  $\text{MoSi}_2$  layer should not exceed 120 microns. Based on the results of the test of borosilicinated blades with a layer of  $\text{MoSi}_2$ , the combined coating at a temperature of 1,600 $^{\circ}\text{C}$  works for 450 hours, which is one and a half times longer than the service life of samples with only a borosilicide coating. The slip layer made of  $\text{MoSi}_2$  is found to increase the service life of the borosilicide coating. A metallographic analysis of the samples was carried out, which proved that the multi-layered coating is a composition based on molybdenum disilicide, reinforced with refractory oxides. An X-ray phase analysis of the protective surface layer of the slip coating was carried out, which showed that after high-temperature treatment, in addition to molybdenum silicides, it contains a number of the following oxides:  $\text{Zr SiO}_4$ ,  $\text{HfSiO}_4$ ,  $\text{YAlO}_3$ ,  $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_3$ .

According to the study, organic compounds of one- and two-component additives, introduced into the saturating mixture, ensure the formation of a borosilicide coating on refractory metals with a certain arrangement of boride and silicide layers and an adjustable structure of the silicide layer. Therefore, in aggregate, these factors contribute to increasing the service life of the protective diffuse coating.

**engines, gas turbine engines, diffuse coating, borosilicide coating, heat resistance, refractory compounds**

*Одержано (Received) 27.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**УДК 656.1**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.127-135](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.127-135)

**Л.А. Тарандушка**, проф., д-р техн. наук, **М.П. Рудь**, доц., канд. техн. наук,

**О.В. Батраченко**, доц., д-р техн. наук

*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна*

*e-mail: tarandushkal@ukr.net; hochspannung77@gmail.com; avbatrachenko1980@gmail.com*

## Аеродинамічний аналіз впливу повітряних потоків від вантажівки на рух мотоцикла

В статті досліджується проблема забезпечення безпеки руху мотоцикла в умовах турбулентного повітряного сліду створеного великогабаритним вантажним автомобілем. При керуванні мотоциклом особливу небезпеку становить рух в умовах турбулентних повітряних потоків з різкою зміною їх швидкості та напрямку. Було побудовано аеродинамічну модель руху вантажного автомобіля і мотоцикла для різного їх взаємного розташування. Було проведено дослідження моделей турбулентності, щоб оцінити точність найпоширеніших моделей Нав'є-Стокса, усереднених за Рейнольдсом таких як  $k-\epsilon$  і  $k-\omega$ . Встановлено зони в яких виникають найбільші зміни тиску повітря при русі мотоцикла, визначено величину цих змін. Відповідно надано рекомендації щодо особливостей руху мотоцикла при обгоні великогабаритного вантажного автомобіля та безпечної траєкторії при якій такий маневр найбільш безпечний для водіїв з недостатнім досвідом управління мотоциклом.

**аеродинамічний аналіз, моделі турбулентності, безпека руху мотоцикла**

**Постановка проблеми.** Обчислювальна гідродинаміка (CFD) – це галузь науки, що вивчає рух рідин та газів за допомогою математичних методів та комп'ютерної технології. Вона знайшла застосування в багатьох галузях, таких як авіаційна та автомобільна промисловість, енергетика, морська промисловість, медицина та інші.

© Л.А. Тарандушка, М.П. Рудь, О.В. Батраченко, 2023

Постійно зростаюча обчислювальна потужність комп'ютерів, вдосконалення чисельних методів CFD аналізу, збільшення доступності та різноманітності програмного забезпечення дозволяють постійно розширювати сферу використання обчислювальної гідродинаміки.

В автомобільній промисловості найбільш поширене використання CFD для аналізу зовнішньої аеродинаміки транспортних засобів з метою отримання їх оптимальної форми, яка дозволить зменшити витрати палива, підвищити зчеплення з дорогою та стійкість при виконанні маневрів тощо. В той же час перспективним напрямом використання обчислювальної гідродинаміки для аналізу сценаріїв руху серійних транспортних засобів в реальних ситуаціях на дорогах загального користування. Зокрема привертає увагу дослідження впливу повітряних потоків на рух мотоцикла.

Згідно звітам Національної Адміністрації Безпеки Дорожнього Руху США (NHTSA) мотоцикл є одним з найбільш небезпечних транспортних засобів з точки зору дорожньо-транспортних пригод з людськими жертвами. Зокрема у 2020 році серед травмованих у ДТП мотоциклісти становили 3,6% в той же час серед тих хто отримав смертельні травми мотоциклістів було 15,4% [1]. Аналіз аварій за участю мотоциклів показав, що найчастіше їх причинами є недостатня вправність та невміння керувати мотоциклом, а також недостатня увага. Саме тому на нашу думку важливим завданням є визначення можливих небезпечних ситуацій, які можуть виникнути при русі мотоцикла та надання рекомендацій водіям для дій в таких випадках.

Однією з небезпечних ситуацій для мотоцикліста є рух в умовах турбулентних потоків, які створюються великогабаритними вантажними автомобілями на швидкісних трасах. Виконання аеродинамічного аналізу впливу повітряних потоків від вантажівки на рух мотоцикла важливо з кількох причин:

**Безпека:** аеродинамічні сили, створювані повітряними потоками від вантажівки, можуть значно вплинути на стійкість і керованість мотоцикла. Аналіз може допомогти визначити потенційні небезпеки та розробити стратегії мінімізації ризику нещасних випадків.

**Ефективність.** Повітряні потоки також можуть впливати на продуктивність мотоцикла, включаючи його швидкість, економію палива та керованість. Розуміючи аеродинамічні сили, дизайнери можуть оптимізувати конструкцію мотоцикла, щоб зменшити опір і покращити продуктивність.

**Комфорт:** високошвидкісні повітряні потоки можуть спричинити дискомфорт для водіїв, включаючи удари, турбулентність і шум. Аеродинамічний аналіз може допомогти визначити способи зменшити ці ефекти та зробити поїздки комфортнішою.

Аеродинамічний аналіз руху вантажівки та мотоцикла передбачає дослідження потоку повітря навколо обох транспортних засобів і того, як цей потік впливає на їхній рух. Фактори, які можна враховувати, включають розмір і форму транспортних засобів, їх швидкість і характеристики повітряного потоку.

Коли вантажівка рухається на високій швидкості, позаду неї створюється турбулентний повітряний слід. Це турбулентне повітря може вплинути на рух мотоцикла. Турбулентність може спричинити хитання мотоцикла та стати нестабільним, особливо на високих швидкостях. Крім того, турбулентне повітря може створювати силу опору, яка сповільнює мотоцикл і збільшує споживання палива.

Щоб мінімізувати вплив турбулентного повітря, мотоцикліст може розташуватися на безпечній відстані позаду вантажівки. Це допоможе зменшити турбулентність і створити більш плавний потік повітря навколо мотоцикла. Водію також може знадобитися відрегулювати швидкість, щоб не потрапити в турбулентність

або кільватер вантажівки.

Іншим фактором, який може вплинути на аеродинаміку мотоцикла, є форма та дизайн самого мотоцикла. Мотоцикл обтічної форми з обтічником або лобовим склом може зменшити силу опору, спричинену потоком повітря, і підвищити його стійкість. Форма і дизайн коліс і шин мотоцикла також можуть впливати на його аеродинаміку.

Загалом, аеродинамічний аналіз руху вантажівки та мотоцикла передбачає вивчення різних факторів, які можуть впливати на їхній рух та стійкість.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із перших практичних застосувань обчислювальної гідродинаміки був аналіз зовнішньої аеродинаміки транспортних засобів. Нині ці інструменти широко використовуються як у сферах проектування спортивних, так і цивільних автомобілів [2-3]. Що стосується чисельних досліджень аеродинаміки мотоцикла, то література, навпаки, дуже обмежена. Через зовсім іншу природу потоку в порівнянні з потоком навколо автомобіля він характеризується рядом нетипових елементів і несе в собі багато проблем [4-5].

Фундаментальною основою обчислювальної гідродинаміки є чисельне розв'язання рівняння Нав'є–Стокса. Першим етапом для розв'язання задачі гідродинаміки завжди є визначення характеру потоку. Існують два типи потоків - ламінарний і турбулентний. Критерієм визначення типу потоку є число Рейнольдса. Слід одразу сказати, що у всіх практичних випадках задач аеродинаміки автомобілів потік повітря буде турбулентним.

В даний час існує три основні групи методів моделювання турбулентності

- пряме чисельне моделювання (DNS) - безпосереднє (без будь-якого попереднього опосередкування) чисельне рішення нестационарних тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса

- моделювання великих вихорів (LES) - ідея полягає у фільтрації характеристик турбулентності від короткохвильових неоднорідностей.

- середні за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса (RANS) - рішення середніх за часом рівнянь для, відповідно, середніх характеристик турбулентної течії

Пряме чисельне моделювання турбулентних течій потребує найбільшої кількості обчислень. Особливістю рівнянь Нав'є-Стокса є отримання дуже відмінних результатів навіть при незначній зміні початкових умов. Хоча на сьогодні отримані прямі розв'язки рівнянь Нав'є-Стокса для деяких випадків потоків, але вважається, що використання цих методів для вирішення прикладних задач стане можливим не раніше другої половини 21-го століття.

Моделювання великих вихорів дозволяє відфільтрувати дрібні вихори на молекулярному рівні, але при цьому враховувати структури потоку розміром менше ніж розмір обчислювальної сітки. Ці методи дозволяють отримувати дані про швидкозмінні турбулентні течії, такі як виникають при взаємному русі двох тіл, як в розглядуваній задачі. Однак використання цих методів можливе лише для тривимірної геометрії.

Усереднені за Рейнольдсом рівняння мають найбільше застосування в практичних задачах аеродинаміки автомобілів. Залежно від кількості і виду додаткових рівнянь ці методи поділяють на:

- алгебраїчні (L-VEL, Y+), які найменш вимогливі до обчислювальних ресурсів, але й найменш точні;
- з одним диференціальним рівнянням (модель Спаларта-Аллмараса);
- двома диференціальними рівняннями з пристінковими функціями (стандартна та реалістична k- $\epsilon$ , k- $\omega$ );

- двома диференціальними рівняннями без пристінкових функцій (SST,  $v2f$ ).

Кожна з моделей має свої переваги та недоліки, і вибір моделі залежить від конкретної задачі та ресурсів, які доступні для її розв'язування.

Найбільш поширеною є модель  $k-\epsilon$ : ця модель базується на розподілі енергії турбулентних коливань ( $k$ ) та їх ефективній дифузії ( $\epsilon$ ) в просторі. Вона дозволяє вирішувати задачі зі складними течіями, такими як течія внутрішнього простору, але не дуже ефективна для течій з великими градієнтами.

Також часто використовується модель  $k-\omega$  в якій замість рівняння дисипації вирішується рівняння швидкості дисипації турбулентної енергії. Модель менш чутлива до роздільної здатності сітки порівняно з моделлю  $k-\epsilon$ , краще обробляє анізотропні потоки результат рішення залежить від початкового наближення, оскільки менш стабільна.

Також для спрощення вирішення задачі використаємо модель нестисливої рідини – математична модель суцільного рідкого середовища, густина якого залишається незмінною при зміні тиску в ньому. Така модель може використовуватись для потоків газу з швидкістю менше 0,3 Маха.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження проблеми забезпечення безпеки руху мотоцикла в умовах турбулентного повітряного сліду створеного великогабаритним вантажним автомобілем. Надати рекомендації щодо безпечної траєкторії руху мотоцикла при виконанні маневру обгону великогабаритного вантажного автомобіля.

**Виклад основного матеріалу.** У представленому дослідженні для дослідження аеродинаміки мотоцикла використовувалися методи обчислювальної гідродинаміки (CFD). Хоча CFD наразі є перевіреним і надійним методом, який використовується для вивчення та проектування аеродинаміки, на точність і правильність результатів впливає низка елементів: деталі геометрії, правильна числова сітка, вибір моделі турбулентності, визначення граничних умов тощо. Таким чином, добре проводити експериментальне підтвердження або порівняння з експериментальними даними з літератури. У нашому дослідженні контрольне моделювання було моделюванням тіла Ахмеда (стандартна модель, яка широко застосовується в автомобільній промисловості для валідації засобів моделювання). Другим важливим елементом, який дозволяє оцінити правильність моделювання, є представлення детальної специфікації, починаючи з тестів збіжності сітки, застосованих числових параметрів і визначених умов потоку. В цьому розділі описана методологія дослідження.

– Побудова геометрії моделі

Для проведення аеродинамічного дослідження було створено спрощені CAD-моделі сідлового тягача «європейської» (безкапотної) схеми та дорожнього мотоцикла. В моделях максимально спрощені ті елементи, які істотно не впливають на аеродинаміку, з метою зменшення часу обчислень, при збереженні реалістичності моделі. Зовнішній вигляд моделей та їх габаритні розміри вказані на рисунку 1.

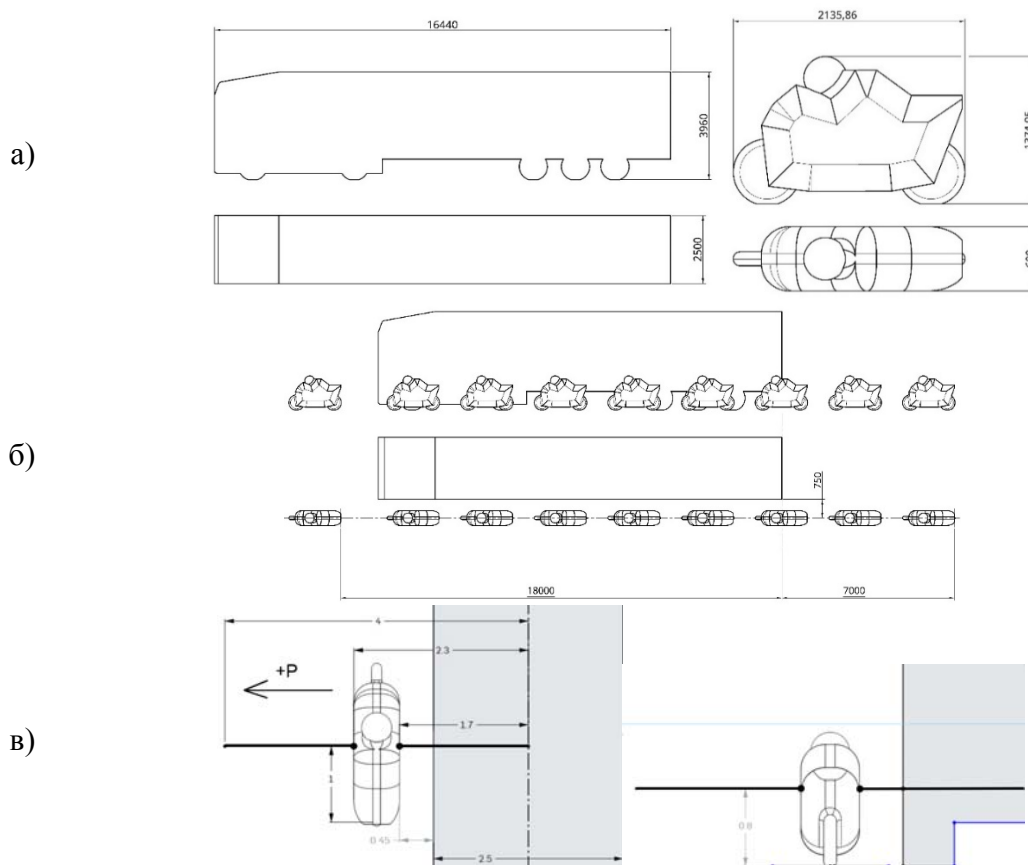


Рисунок 1 – CAD модель великогабаритного вантажного автомобіля та мотоцикла для яких проводиться аналіз (а), траєкторія руху мотоцикла при обгоні (б), поперечний переріз для якого наводяться розрахунки швидкості та тиску повітря (в).

*Джерело: розроблено авторами*

#### Обчислювальна область та граничні умови

Розміри домену в якому були проведені обчислення аеродинаміки обрані виходячи з умови мінімальної взаємодії зовнішніх границь області з границями об'єктів всередині. Це дозволить повноцінно дослідити структуру потоку, що виникає за рухомими вантажівкою і мотоциклістом. Висота (8 м), ширина (10 м) і довжина (40 м) обчислювальної області були взяті для всіх проаналізованих випадків.

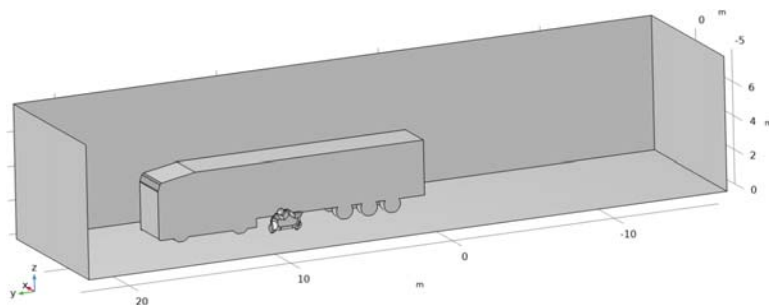


Рисунок 2 – Обчислювальна зона для якої досліджується аеродинамічна модель

*Джерело: розроблено авторами*

Розроблена модель використовує чотири типи граничних умов.

Для моделювання суцільних стін транспортних засобів та поверхні дороги (рисунок 3а) використовується стандартна гранична умова відсутності ковзання. Стіна без ковзання – це стінка, у якій швидкість текучої речовини відносно швидкості стінки дорівнює нулю. Для нерухомої стіни це означає, що  $\mathbf{u}=0$ .

Для бокових та верхньої стінок домену (рисунок 3б) використано параметр ковзання, який передбачає умову відсутності проникнення речовини через стінку. Тобто нормальна складова вектору швидкості  $\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}=0$ . Неявно вважається, що на стінці ковзання немає в'язких ефектів і, отже, не розвивається прикордонний шар. З точки зору моделювання, це може бути розумним наближенням, якщо основним ефектом стінки є запобігання виходу речовини з області. Це не відповідає реальним умовам, але враховуючи достатню відстань між стінками транспортних засобів та стінками домену, може бути використано без значної втрати точності моделі.

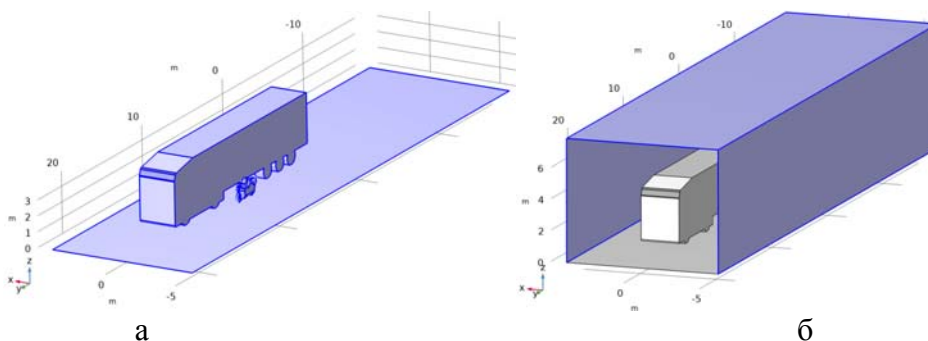


Рисунок 3 – Граничні умови зони дослідження (умови ковзання повітря на стінках моделі)  
Джерело: розроблено авторами

Інші дві граничні умови стосуються входу та виходу потоку з домену. Через вхідну границю задано швидкість руху повітряного потоку. Оскільки обчислення тривимірної нестационарної задачі для турбулентного потоку повітря потребує значного обсягу обчислень і є доцільним з використанням високопродуктивних обчислювальних кластерів або суперкомп'ютерів для нашої задачі прийнято припущення однакової швидкості руху повітря на при стаціонарній геометрії моделі. Швидкості руху вантажного автомобіля і мотоцикла відносно дорожнього полотна зазвичай значно більше ніж різниця їх швидкостей. Тому для нашої задачі приймемо усереднене значення швидкості 30 м/с (108 км/год). На виході з моделі приймемо граничну умову постійного атмосферного тиску.

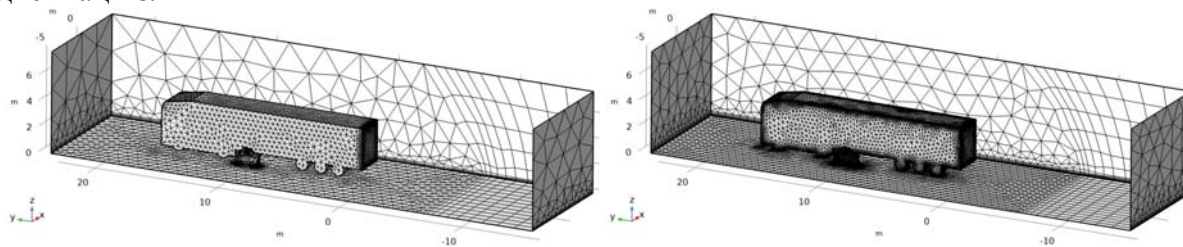
#### Побудова сітки.

При побудові розрахункової сітки необхідно враховувати зони в яких виникають підвищені градієнти швидкості потоку та тиску повітря. В першу чергу це стосується пристінних зон біля яких відбувається формування турбулентного потоку. Тому біля стін досліджуваних транспортних засобів розмір комірок в напрямку нормальному стінці має бути значно менше ніж в тангенційному. Також в зонах передніх кромek кабiни вантажiвки та безпосередньо у кiльватерi вантажiвки виникають особливостi потоку, якi потребують бiльш точної сiтки. З iншої сторони зона на вiдстанi за автомобiлем потребує розрахунку для повноцiнної оцiнки потоку, але її вплив на шуканi параметри взаємодiї вантажiвки i мотоцикла значно менший, тому сiтка в цiй зонi намiрено загрублена. На рисунку 4 показаний приклад розбиття геометрiї на 68329 елементiв (рисунок 4а) та на 278688 елементiв (рисунок 4б).

#### Чисельний вирішувач.



Вирішення задачі турбулентного потоку, як зазначалось вище потребує використання усереднених рівнянь Нав'є-Стокса. Серед доступних для використання в пакетах CFD моделювання моделей турбулентності для нашої задачі використано найбільш поширену модель (k-ε). Модель вводить два додаткових рівняння переносу та дві залежні змінні: турбулентну кінетичну енергію k та швидкість турбулентної дисипації ε.



а б  
Рисунок 4 – Розбиття на сітку обчислювального простору (зовнішні стінки, та стінки транспортних засобів

Джерело: розроблено авторами

Турбулентна в'язкість моделюється як

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1}$$

Рівняння переносу для k представлено у наступному вигляді:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \Delta k \right) + P_k - \rho \varepsilon \tag{2}$$

де

$$P_k = \mu_T \left( \nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \tag{3}$$

Рівняння переносу для ε має вигляд:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

В результаті

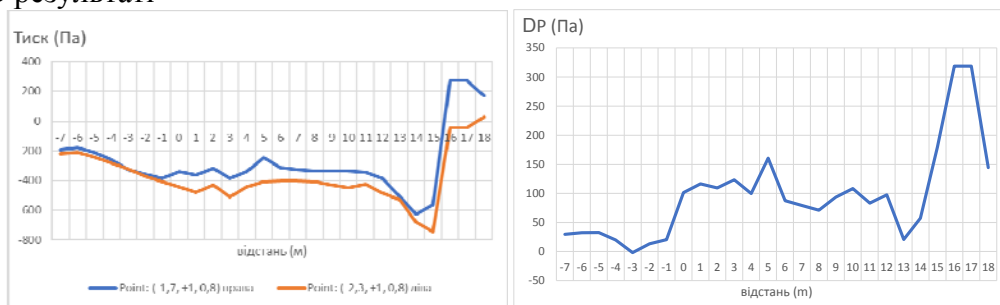


Рисунок 5 – Зміни тиску на стороні мотоцикла при його русі вздовж вантажівки

Джерело: розроблено авторами

На рисунку 6 показано результати розрахунку моделі (а саме тиску повітря) при незмінних характеристиках її геометрії та граничних умовах, але з різною щільністю сітки. Як видно з розрахунку характер кривої не змінюється для всіх розмірів комірок. Однак абсолютне значення тиску для сітки з 60 тис. кінцевих елементів відрізняється від сітки 590 тис. елементів до 50%. В той час як тривалість розрахунку зростає з 10 хвилин для одної позиції мотоцикла до 340 хвилин. Для сітки з 100 тис. елементів

похибка не перевищує 15%. А час розрахунку складає близько 15 хвилин. Отримані дані дозволяють зробити наступні висновки:

1) оскільки при суттєвому збільшенні густини сітки помітно, що відмінність результатів зменшується, то вибрана модель турбулентності забезпечує отримання однозначних східних даних;

2) оскільки характер кривої не змінюється, то для першої оцінки результатів, яка не потребує високої точності абсолютних значень, але необхідна для встановлення загальних властивостей моделі достатньо обчислень з грубою сіткою з 60 тис. елементів.

3) при зменшенні розмірів елементів час обрахунку зростає з більшою швидкістю ніж точні результати, тому з точки зору оптимізації комп'ютерного часу розрахунків використання сітки більше ніж 200 тис елементів недоцільне.

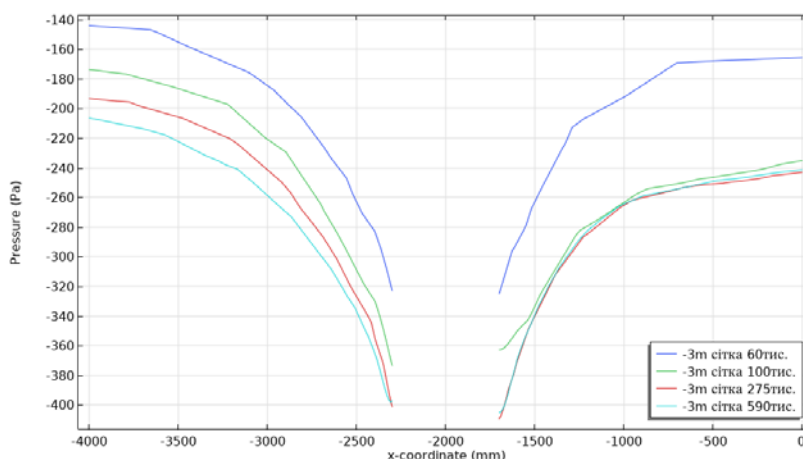


Рисунок 6 – Аналіз східності моделі турбулентної течії повітря залежно від густини сітки  
Джерело: розроблено авторами

**Висновки.** Для різних сіток і моделей турбулентності було виконано комплексне моделювання аеродинаміки руху мотоцикла в умовах турбулентного повітряного сліду створеного великогабаритним вантажним автомобілем. Нижче представлені висновки цього дослідження:

- найбільш небезпечною зоною при обгоні автомобіля є ділянка яка починається від переднього зрізу кабіни довжиною близько 3-4 метри. На цій ділянці перепад тисків по сторонам мотоцикла спочатку спадає з близько 100 Па при русі вздовж причепа до 50 Па тобто вдвічі, а потім одразу зростає в майже 7 разів (з близько 50 до 350 Паскаль). Якщо в абсолютні значення таких різниць тисків можуть бути малопомітними, то різкі зміни за час менше ніж 1 секунда, можуть призвести до короткочасної втрати керування недосвідченим водієм, що в умовах близькості вантажівки суттєво підвищує небезпеку маневру обгону.

- Необхідно надавати рекомендації водіям мотоциклів при обгоні вантажних автомобілів дотримуватись дистанції між мотоциклом та автомобілем не менше 1 метра.

- В подальшому провести дослідження впливу на мотоцикл повітряних потоків від великогабаритних транспортних засобів, що рухаються в зустрічному напрямку, оскільки вони можуть потенційно становити ще більшу небезпеку.

## Список літератури

1. Traffic Safety Facts Annual Report Tables. *NHTSA*: websiet. 2020. URL : <https://cdan.nhtsa.gov/tsftables/tsfar.htm#> (Last accessed: 27.02.2023)..

2. Piechna, J. A Review of Active Aerodynamic Systems for Road Vehicles. *Energies* 2021, 14, 7887. <https://doi.org/10.3390/en14237887>
3. Thomas Christian Schuetz, *Aerodynamics of Road Vehicles*. SAE International, 2015, 1312 p.
4. Palanivendhan, M.; Nagpal, D.; Rao, D.; Philip, J.; Ganapathi, M. Design and analysis of an aerodynamic kit for a two wheeled race motorcycle. *Mater. Today Proc.* 2021. 45(29). Pp. 7239-7246.
5. Angeletti, M.; Sclafani, L.; Bella, G.; Ubertini, S. The Role of CFD on the Aerodynamic Investigation of Motorcycles; SAE Technical Papers; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2003.
6. Corin, R. J., He, L. and Dominy, R. G. A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96. 2008. 8-9. Pp. 1390-1411.

## References

1. Traffic Safety Facts Annual Report Tables . *NHTSA*: websiet. 2020. Retrived from <https://cdan.nhtsa.gov/tsftables/tsfar.htm#> [in English].
2. Piechna, J. A (2021). Review of Active Aerodynamic Systems for Road Vehicles. *Energies* 14, 7887. <https://doi.org/10.3390/en14237887> [in English].
3. Thomas Christian Schuetz. (2015). *Aerodynamics of Road Vehicles*, SAE International [in English].
4. Palanivendhan, M.; Nagpal, D.; Rao, D.; Philip, J. & Ganapathi, M. (2021). Design and analysis of an aerodynamic kit for a two wheeled race motorcycle. *Mater. Today Proc.* 45(29), 7239-7246 [in English].
5. Angeletti, M.; Sclafani, L.; Bella, G. & Ubertini, S. (2003). *The Role of CFD on the Aerodynamic Investigation of Motorcycles*. SAE Technical Papers; SAE International: Warrendale, PA, USA [in English].
6. Corin, R. J., He, L. & Dominy, R. G. (2008). A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, 8-9, 1390-1411 [in English].

**Lyudmyla Tarandushka**, Assoc. Prof., DSc., **Maksym Rud**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Batrachenko**, Assoc. Prof., Doctor of tech. sci.

*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

## **Aerodynamic Analysis of the Influence of Air Flows From a Truck on Motorcycle Motion**

The article examines the problem of ensuring the safety of motorcycle movement in the conditions of a turbulent air trail created by a large truck. The development of computer technology, software and methods of computational fluid dynamics (CFD) allows conducting theoretical studies of various aspects of the movement of motor vehicles, which are difficult to reproduce experimentally and which at the same time can have a significant impact on accidents on public roads.

A motorcycle is one of the most dangerous vehicles in terms of traffic accidents with human casualties. The analysis of accidents involving motorcycles showed that most of the time their causes are insufficient skill and inability to drive a motorcycle, as well as insufficient attention. At the same time, when driving a motorcycle, movement in conditions of turbulent air flows with a sharp change in their speed and direction is a particular danger. Such conditions arise when overtaking large trucks moving at high speed. An aerodynamic model of the movement of a truck and a motorcycle was built for their different relative positions. From the position of the motorcycle in the turbulent wake behind the truck and after passing the compressed air zone in front of the truck. A study of turbulence models was conducted to assess the accuracy of the most common Reynolds-averaged Navier-Stokes models such as  $k-\epsilon$  and  $k-\omega$ .

Zones in which the largest changes in air pressure occur during motorcycle movement have been established, and the magnitude of these changes has been determined. Accordingly, recommendations are provided regarding the characteristics of motorcycle movement when overtaking a large-sized truck and the safe trajectory in which such a maneuver is the safest for drivers with insufficient experience in driving a motorcycle.

**aerodynamic analysis, turbulence models, motorcycle safety**

*Одержано (Received) 10.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**В.І. Бодак**, доц., канд. техн. наук

*Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна*

*e-mail: bodak.lutsk@gmail.com*

## Використання електромобілів як таксі

У статті розглянута методика зарядки електромобілів, що використовуються як таксі у Луцьку, та вирішення даної проблеми у інших містах. Основним фактором при виборі марки та моделі електромобіля для служби таксі є вартість транспортного засобу, рівень деградації тягової батареї та комфорт пасажирів. У країнах Західної Європи та Північної Америки популярністю користуються автомобілі виробника Tesla. В цих автомобілях використовуються тягові батареї ємністю від 70 кВт/год. Дані автомобілі є дорогими, тому у країнах з меншими рівнем достатку використовуються дешевші електромобілі з батареями меншої ємності. У Луцьку компанія «Преміум сервіс» експлуатує електромобілі марки Nissan Leaf з батареями 24 кВт/год. Зростання кількості електромобілів створило ряд проблем, оскільки, кількість станцій для заряджання у місті не зростає пропорційно кількості машин. Однієї нічної зарядки батареї електромобіля-таксі на підприємстві «Преміум сервіс» не вистачає для роботи протягом робочого дня. Тому у робочий час автомобілям доводиться дозаряджатись на міських електрозаправних станціях.

**електромобіль, зарядна станція, таксі, електродвигун, літій-іонна батарея**

**Постановка проблеми.** Різке зростання кількості транспорту з двигунами внутрішнього згоряння(ДВЗ) створює на сьогоднішній час значні проблеми, які необхідно невідкладно вирішувати. Найсуттєвіші – це зменшення світових запасів нафти, глобальне потепління внаслідок парникового ефекту, забруднення повітря шкідливими газами.

Вирішити, в деякій мірі, ці проблеми може використання електромобілів. Це сучасні колісні транспортні засоби, які використовують у якості рушія електродвигун, що живиться від батареї.

Електромобілі, в переважній більшості, заряджаються вночі, біля житла власників. Вони не створюють проблем чи незручностей для інших власників електромобілів. Однієї нічної зарядки таким електромобілям вистачає для здійснення поїздки протягом наступного дня, оскільки їх щоденний пробіг не перевищує 100 кілометрів.

Електромобілі, що використовуються у Луцьку як таксі, мають щоденний пробіг біля 180 кілометрів. Nissan Leaf 2015 року випуску, які використовує підприємство «Преміум сервіс», на повному заряді батареї проїжджає до 100 кілометрів. Тобто, однієї нічної зарядки батареї не вистачає. Необхідно дозаряджати авто у місті, або ж повертатися на територію автотранспортного підприємства для підзарядки батареї. В результаті біля зарядних станцій створюються черги з електромобілів-таксі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Масове використання електромобілів може створювати деякі проблеми у електромережах [1]. Так, дослідниками стверджується, що збільшення кількості електромобілів на 30 % може викликати зміну напруги на 10,3%, особливо в період з 17:00 год. до 20:00 год. [2].

Крім того, зарядка електромобілів збільшує пікове навантаження на енергосистему. Це призводить до зменшення строку служби трансформаторів та інших елементів енергосистеми [3].

В проведених дослідженнях [4] вивчався вплив на електромережу збільшеної кількості електромобілів, що належать приватним власникам. Методики зарядки електромобілів в домашніх умовах були проаналізовані в роботах [5]. Зазначено про високу швидкість зарядки в межах від 30% до 80% від повної зарядки батареї. Вказано, що в цих межах заряджання проходить значно швидше, ніж з моменту повного розряду батареї, що не рекомендується робити. Повільне заряджання батареї проходить і з 80% до 100% повної зарядки [6].

Детально вивчалася витрата енергії при русі автомобіля [7]. Встановлено, що важливою змінною величиною в рівнянні потужності є швидкість електромобіля [8]. При швидкості руху електромобіля Nissan Leaf до 40 км/год потужність затрачується на подолання сили опору кочення. При швидкості більшій 40 км/год основна витрата потужності іде на подолання сили опору повітря.

Однак незважаючи на недоліки, використання електромобілів дає змогу зменшити викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу і, як наслідок, зменшити парниковий ефект викликаний транспортними засобами з двигунами внутрішнього згорання.

**Постановка завдання.** Малодослідженою є методика зарядки електромобілів, що працюють як таксі. В даній роботі розглянуті методи інтеграції електромобілів-таксі в систему громадського транспорту. Методика заряджання цих електромобілів дещо відрізняється від заряджання приватних машин.

**Виклад основного матеріалу.** Електромобілі – це транспортні засоби, які повністю живляться від акумуляторної батареї. Електромобіль складається з батареї, інвертора, електродвигуна, трансмісії та допоміжних пристроїв. Класична схема електромобіля зображена на рис. 1.

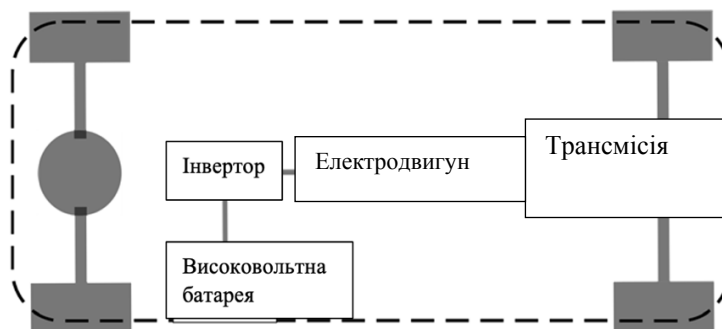


Рисунок 1 – Класична схема електромобіля

*Джерело: розроблено автором*

Електромобіль не забруднює повітря при експлуатації, але забруднює навколишнє середовище при виробництві та утилізації літій-іонної батареї. Також важливим є правильне використання заряду батареї, тобто стиль водіння електромобіля. Правильне водіння призводить до раціонального використання заряду батареї, збільшує пробіг автомобіля на одному заряді до 20% [9].

Як показує аналіз, широке використання електромобілів зумовлене не тільки стимулюванням купівлі екологічно безпечних транспортних засобів, але й нижчою вартістю їх експлуатації. Використання електромобілів дає їх власникам ряд переваг. Це незначні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування, оскільки відсутня коробка передач, немає необхідності в заміні масляного, повітряного, паливного фільтрів, масла в двигуні, ременів газорозподільчого механізму та ременів приводу інших систем [10].

Вартість зарядки батареї значно нижча вартості заправки автомобіля паливом. В Україні вартість електроенергії для 1 км пробігу електромобіля складає 0,32 грн. при зарядці по денному тарифу для домогосподарств та 0,20 грн. по нічному тарифу. Тоді, як вартість палива на 1 км пробігу автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння складає 2,7 гривень, при ціні палива 50 грн/л. Тобто, витрати на заправку приватного електромобіля в домашніх умовах 10 разів менші.

При заправці електромобіля на швидкісній зарядці вартість проїзду 1 км шляху суттєво зростає. В середньому електромобіль витрачає на 100 км шляху 20кВт. Вартість 1 кВт на швидкісній заправці складає від 8 грн. до 14 грн. Отже, вартість електроенергії витраченої на 1 км шляху складає від 1,6 грн до 2 грн.

Якщо в Україні використання електромобілів зумовлюється в першу чергу економічною доцільністю, то в Європі занепокоєні шкідливими викидами автомобілів в атмосферу та пов'язані з ними негативні впливи на зміну клімату.

Комітет представників країн Євросоюзу (Coterep) у березні 2023 року дійшов згоди щодо відмови починаючи з 2035 року від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, які працюють на органічному паливі. До використання на території цих країн буде дозволено використання тільки електромобілів та автомобілів, що використовують паливо неорганічного походження, і не мають у своїх викидах вмісту CO<sub>2</sub>.

На сьогоднішній день у Європі лідером по продажу електромобілів є Норвегія. Завдяки державним дотаціям при купівлі електромобілів, які склали у 2022 році 4 млрд. доларів, відсоток електромобілів в сегменті легкового транспорту в цій країні є найвищий у світі (рис. 2).

У 2022 році 79,3% куплених нових авто були електромобілі ( BEV – battery electric vehicles). При цьому частки інших придбаних транспортних засобів становили: гібридів плагін 8,5%, інших гібридів- 5,4%, бензинових- 3,9%, дизельних- 2,9%.



Рисунок 2 – Структура продажів електромобілів та автомобілів на органічному паливі у Норвегії  
Джерело: на підставі [11]

Динаміка продажів у Норвегії електромобілів та автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння зображено на рис. 3.

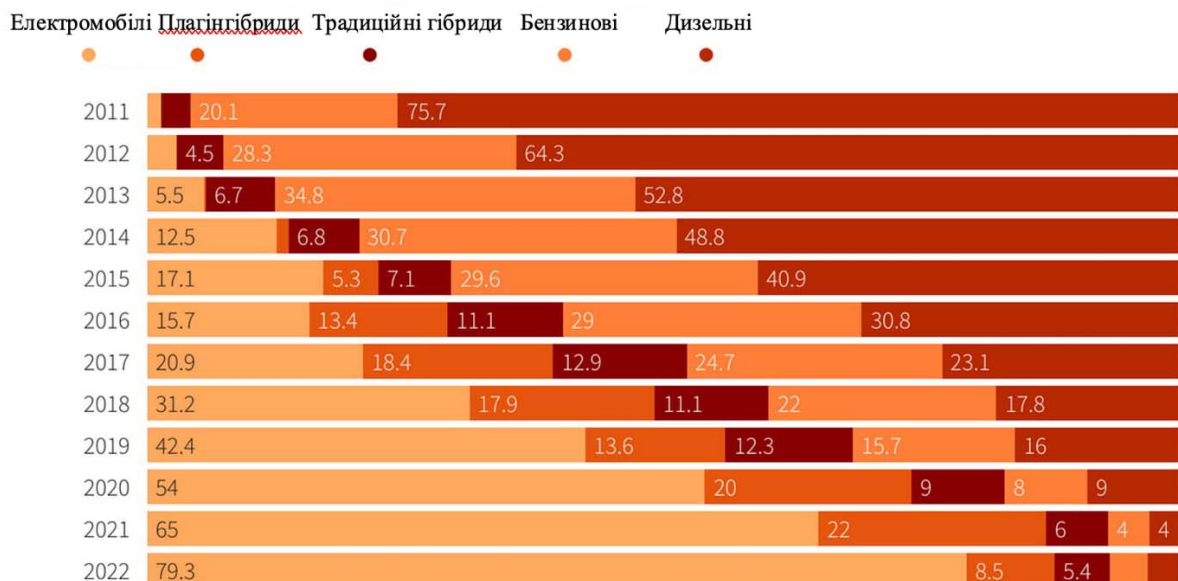


Рисунок 3 – Зменшення частки продажів авто на традиційному паливі у Норвегії

Джерело: на підставі [11]

Норвезька автомобільна федерація NAF вказує на те, що власникам електромобілів незручно користуватися великою кількістю (10-15 одиниць) додатків до смартфона з метою проведення процесу зарядки. З цієї причини багато потенційних покупців відкладають покупку електромобіля.

З метою вирішення цієї проблеми NAF пропонує розробити один спільний додаток, так званий е-роумінг. За допомогою одного цього додатка можна здійснювати зарядку батареї на будь-якій зарядній станції.

На ринку Європи представлено багато марок електромобілів в якості таксі, зокрема Nissan Leaf, Kia Soul. В Сполучених Штатах Америки найбільш вдалим варіантом для таксі вважається електромобіль марки Tesla Model S.

Електромобіль Tesla Model S має більшу дальність поїздки на одному заряді батареї, але в Україні використовувати в якості таксі більш доцільно Nissan Leaf, оскільки він значно дешевший від інших моделей, зокрема від Tesla .

В Луцьку прийнята програма «Чисте місто», згідно з якою місцева влада зацікавлює перевізників використовувати у місті транспорт, який має незначні викиди CO<sub>2</sub> та інших шкідливих речовин. Це транспортні засоби, що відповідають нормам Євро-5, або електричні. З цією метою транспортні засоби, що по викидам шкідливих речовин не відповідають нормам Євро-5 не допускають до участі у конкурсах на перевезення пасажирів у місті Луцьк.

Ідею використання відновлюваних джерел енергії було використано та впроваджено на практиці у Луцьку підприємством «Преміум сервіс». На території підприємства було встановлено електростанцію на сонячних колекторах потужністю 150 кВт, яка дає енергію для зарядки 35 електромобілів «Еко таксі» та для електричної мережі всього підприємства. Це підприємство одним з перших в Західній Україні почало використовувати електромобілі у сфері пасажирських перевезень як таксі. Мережа «Еко таксі» функціонує також у Вінниці, Тернополі, Житомирі, Хмельницькому, Новоград-Волинському, Коростені. Розглядаючи для використання кілька марок електромобілів, підприємство вибрало саме Nissan Leaf, оскільки саме цей автомобіль є достатньо комфортним, містким та відносно недорогим.



Фірмою-партнером «Еко таксі» є компанія «Kerbis», яка створила мережу зарядних станцій у місті Луцьку.



Рисунок 4 – Зарядка електромобіля компанії «Преміум сервіс» на зарядній станції компанії «Kerbis» у м. Луцьк

Щоденний пробіг електромобілів «Еко таксі» становить біля 180 кілометрів. Nissan Leaf 2015 року випуску, які використовує підприємство Преміум сервіс, на повному заряді батареї проїзжає до 100 кілометрів [11]. Тобто, однієї нічної зарядки батареї їм не вистачає. Необхідно проводити додаткову зарядку у місті, або ж повертатися на територію автотранспортного підприємства для дозарядки батареї, що є недоцільним.

Швидка зарядка для таксі є найкращим варіантом, оскільки, водій має небагато часу в перервах між виїздами на замовлення. Повільний режим зарядки батареї є неприйнятним так як час для цього є обмеженим.

Однак, швидкий режим зарядки батареї створює ряд проблем. Зокрема, батареї та обладнання електромобілів під час такого заряджання дуже нагріваються. Це негативно впливає на строк служби батареї. Строк служби батареї при частих швидкісних заряджаннях щорічно зменшується на 3% - 5% .

Для здійснення швидкої зарядки необхідно дорогі та громіздкі провідники, трансформатори струму, а електричні мережі обмежують їх використання, оскільки, необхідна потужність створює проблеми.

З метою вирішення цієї проблеми альтернативою є накопичення енергії в нічний час та її зберігання в запасних батареях до моменту використання. Використання змінних АКБ вирішить проблему пікових навантажень на мережу.

Для заряджання, зберігання та заміни розряджених батарей створюють станції заміни акумуляторів (СЗА). СЗА – це станція, де клієнти можуть замінити свою розряджену батарею на заряджену. Цей спосіб застосовують для електрифікованого громадського транспорту. Недоліком цього способу є необхідність у великій кількості змінних акумуляторів, складним є процес заміни, оцінки технічного стану розрядженого АКБ. Для клієнтів така заміна батарей дуже зручна, оскільки процес є недовготривалим.



На СЗА знаходиться автомобільний підйомник, підйомник батареї, пристрої для зберігання та переміщення АКБ. До електричних складових СЗА входить розподільчий трансформатор, зарядні пристрої, модуль контролю зарядки акумулятора. Трансформатор перетворює високу напругу з мережі на низьку напругу для подачі в акумулятори. Модуль управління дозволяє заряджати на різних рівнях потужності, в залежності від вимог.

Однією з переваг СЗА є те, що третя сторона може володіти акумуляторами і нести відповідальність за їх заміну, контролювати їх роботоздатність, вчасно знімати несправні АКБ з експлуатації.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Електромобілі вже сьогодні є частиною майбутньої розумної енергосистеми, вони необхідні для зменшення викидів шкідливих газів, особливо, у великих містах. Для масового використання електромобілів у містах важливо запропонувати оптимальні способи дозарядки тягових батарей, які не створюють проблем для енергосистеми міста. Для цього необхідно використовувати методи оптимізації щодо розміщення та розміру зарядних станцій, мінімізації витрат, зменшення дисбалансу навантаження на енергосистему.

Компанія «Преміум сервіс» є одним з найбільших пасажирських перевізників міста Луцька. Використовуючи, великі по місткості, автобуси з газовими двигунами та електромобілі-таксі, ця компанія значно покращує ситуацію із забрудненням повітря громадським транспортом.

Процес впровадження транспорту, що не забруднює повітря, необхідно і надалі стимулювати. Таке заохочення можливо зробити надавши компаніям, що використовують електромобілі, договори на здійснення міських пасажирських перевезень не на 3-5 років, як для транспорту з двигунами внутрішнього згоряння, а на довші строки.

У перспективі, використання електромобілів є доцільним і у сфері службового транспорту, сфері доставки товарів та пошти, що дасть змогу зробити чистішим повітря у великих містах.

## Список літератури

1. Горова К. О., Шевердіна А. В. Актуальність застосування електромобілів в Україні . *Проблеми і перспективи розвитку підприємництва*. 2015. № 3(1). С. 105-107. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/piprp\\_2015\\_3%281%29\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/piprp_2015_3%281%29_22) (дата звернення: 20.02.2023)
2. Бодак В. І., Мазилук П. В. Сучасні колісні транспортні засоби: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» . Луцьк: ЛНТУ, 2021. 143 с.
3. Shafiee, S.; Fotuhi-Firuzabad, M. Rastegar, M. Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems. *IEEE Trans. Smart Grid* . 2013. 4. P. 1351–1360.
4. Будько В.І. Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для заряджання електромобілів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.08 / НТУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», 2019 . 346 с.
5. Мокін Б.І., Лобатюк В.А., Мокін О.Б. Математичні моделі оптимального руху електромобілів з електроприводом постійного струму: монографія . Вінниця: ВНТУ, 2019. 136с.
6. Бодак В.І., Бодак М.В. Перспективи використання електромобілів в Україні . *Наукові нотатки: міжвуз. зб.* 2018. Вип. 62 . С.48 -51.
7. Смирнов О.П., Богаєвський О.Б., Смирнова А.О. Розрахунок еквівалентної витрати палива електромобілями у різних країнах . *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2013. №29 (10.02). С. 119-144.
8. Аль-Амморі А.Н., Соченко П.С. Методи і засоби підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії на транспорті: монографія . Київ: НТУ, 2014. 220 с.
9. Бажинов О.В., Кравцов М.М. Небезпека транспортних засобів: монографія . Харків: ЧП Стариченко Л.А., 2022. С. 51-55.
10. Маруніч В.С., Шморгуна Л.Г. Організація та управління пасажирськими перевезеннями: підручник . К.: Міленіум, 2017. 528 с.

11. Технічні характеристики електромобіля Nissan Leaf . *Info Car* : веб-сайт. 2022. URL: [https://Nissan.leaf.infocar.ua/mod\\_3692\\_leaf\\_id903.html](https://Nissan.leaf.infocar.ua/mod_3692_leaf_id903.html) (дата звернення: 20.02.2023)

## References

1. Horova, K.O., & Sheverdina, A.V. (2015). Aktualnist zastosuvannya electromobiliv v Ukraini [Relevance of the use of electric vehicles in Ukraine]. *Problemy I perspektivy rozvutky pidpruemnitsva – Problems and prospects of entrepreneurship development. Vol 3(1)*, 105-107. Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/piprp\\_2015\\_3%281%29\\_\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/piprp_2015_3%281%29__22) [in Ukrainian].
2. Bodak, V.I. & Mazilyuk, P.V. (2021). *Suchasni kolisni transportni zasoby [Modern wheeled vehicles]*. Lutsk: LNTU. [in Ukrainian].
3. Shafiee, S., & Fotuhi-Firuzabad, M., & Rastegar, M. (2013). Investigating the impacts of plug-in hybrid electric vehicles on power distribution systems. *IEEE Trans. Smart Grid*, 4, P. 1351–1360 [in English].
4. Budko, V.I. (2018). Vykorystannya enerhii soniachnoho vyprominiuvannya ta vitru dlia zariadzhanja elektromobiliv [Using the energy of solar radiation and wind for charging electric cars] . *Doctor's thesis*. NTU "Kyiv Polytechnic Institute named after I. Sikorsky" [in Ukrainian].
5. Mokin, B.I., Lobatyuk, V.A., & Mokin O.B. (2019). *Matematychni modeli optymalnoho rukhu elektromobiliv z elektropryvodom postiinoho strumu [Mathematical models of optimal movement of electric vehicles with a direct current electric drive]*. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
6. Bodak, V.I., & Bodak, M.V. (2018). Perspektivy vykorystannya elektromobiliv v Ukraini [Prospects for the use of electric vehicles in Ukraine]. *Naukovi notatky: mizhvuz. zb. – Scientific notes: interuniversity. Coll, Issue 62*, 48 -51 [in Ukrainian].
7. Smirnov, O.P., Bogaevskiy, O.B., & Smirnova, A.O. (2013). Rozrakhunok ekvivalentnoi vytraty palyva elektromobiliamy u riznykh krainakh [Calculation of the equivalent fuel consumption of electric vehicles in different countries]. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU "KPI"*, 29 (10.02), 119-144 [in Ukrainian].
8. Al-Ammori, A.N., & Sochenko, P.S. (2014). *Metody i zasoby pidvyshchennia efektyvnosti vykorystannya vidnovliuvanykh dzherel enerhii na transporti [Methods and means of increasing the efficiency of the use of renewable energy sources in transport: monograph]*. Kyiv: NTU [in Ukrainian].
9. Bazhinov, O.V., & Kravtsov, M.M. (2022). *Nebezpeka transportnykh zasobiv [The danger of vehicles]*. Kharkiv: ChP Starychenko L.A. [in Ukrainian].
10. Marunich, V.S., & Shmorguna, L.G. (2017). *Orhanizatsiia ta upravlinnia pasazhyrskymy perevezenniamy [Organization and management of passenger transportation]* . Kyiv: Millennium [in Ukrainian].
11. 79% kuplenykh u Norvehii u 2022 r. avto – elektrychni. [79% of cars bought in Norway in 2022 are electric.] (n.d.). *base.garant.ru*. Retrieved from <https://mezha.media/2023/01/05/norway-electrocar-tesla/> [in Ukrainian].

**Vladymyr Bodak**, Assoc. Prof., Phd tech. sci.  
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

### Use of Electric Vehicles as Taxis

In connection with the significant increase in the number of cars with internal combustion engines in Ukrainian cities, there is an increase in emissions of harmful gases, which significantly exceed permissible standards. The increase in the number of electric cars has been accelerated by the fact that when clearing an electric car, it is not necessary to pay value added tax and customs duty, but only excise duty for each kilowatt of battery capacity. The cost of one kilometer covered by an electric car is several times lower than a car with an internal combustion engine. In cities, taxi services are appearing that use only electric cars.

The main factor when choosing the brand and model of an electric vehicle for taxi service is the cost of the vehicle, the level of degradation of the traction battery and the comfort of passengers. Tesla cars are popular in Western Europe and North America. These cars use traction batteries with a capacity of 70 kWh or more. These cars are expensive, so less affluent countries use cheaper electric cars with smaller batteries. In Lutsk, the "Premium Service" company operates Nissan Leaf electric vehicles with 24 kWh batteries. The increase in the number of electric cars has created a number of problems, since the number of charging stations in the city has not increased in proportion to the number of cars. One nightly charging of the battery of an electric taxi at the "Premium Service" enterprise is not enough to work during the working day. Therefore, during working hours, cars have to be recharged at city gas stations.

The article discusses the method of charging electric cars used as taxis in Lutsk, and the solution to this problem in other cities

**electric car, charging station, taxi, electric motor, lithium-ion battery**

*Одержано (Received) 13.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 18.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.143-150](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.143-150)

**М.В. Буряк**, доц., канд. техн. наук, **Р.І. Розум**, доц., канд. техн. наук, **О.П. Захарчук**, доц., канд. техн. наук, **П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук, **П.Б. Прогній**, доц., канд. техн. наук

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна*

**Л.Н. Чорній**, зав. проф. ліцею

*Галицький коледжу імені В'ячеслава Чорновола, Тернопіль, Україна*

*e-mail: burjak74@ukr.net, rozoom\_ruslan@ukr.net, olenaskyba8500@gmail.com,*

*ppopovich@ukr.net, p.prohniy@wunu.edu.ua, chorniyl@ukr.net*

## Вплив агресивних середовищ на експлуатаційні характеристики матеріалів несучих конструкцій колісних транспортних засобів

Досліджено вплив агресивних середовищ на експлуатаційні характеристики металоконструкцій колісних транспортних засобів. Встановлено, що у порівнянні із їх сухими концентратами, розчини мінеральних добрив нітрофоски та сульфату амонію, викликають локальне корозійне пошкодження не тільки звичайних конструкційних сталей, а і легованих сталей (Сталь 25, Сталь 45, Сталь 1X13). Швидкість корозії при цьому сягає 0,29...0,33 мм/рік, що у порівнянні із швидкістю корозії в дощовій воді до 3 разів вище. Вказані металеві матеріали мають найвищу швидкість поширення корозії у продовж першої доби, надалі інтенсивність корозії зменшується до величин, рівнозначних із швидкістю поширення корозії в дощовій воді. Стаціонарні потенціали сталей мають найбільше від'ємне значення для розчинів сульфату амонію, а струми корозії у свою чергу в розчинах нітрофоски. Розглянувши раніше згадувану групу сталей у середовищах що досліджувались, можна струдувати що різниця константи Тафеля  $b_c$  катодних реакцій є незначною, а константа  $b_a$  має найнижчий показник в розчині нітрофоски, що свідчить про незначну поляризованість анодної реакції.

**корозія металів, мінеральні добрива, струм корозії, швидкість корозії, стаціонарний потенціал, глибинний показник, поляризація, анодна та катодна реакції**

**Постановка проблеми.** Ведення сучасного аграрного виробництва неможливе без інтенсивного застосування як мінеральних так і органічних добрив. Згідно статистичних даних, в рослинництві застосовують щорічно біля 800 тисяч тон неорганічних та понад 1400 тисяч тон органічних добрив. При цьому період експлуатації машин для внесення добрив таких як розкидачі, в середньому становить близько 18% від загального часу експлуатації машин. Одним із завдань забезпечення роботоздатного стану парку колісних транспортних засобів є запровадження заходів спрямованих на ретельне очищення техніки від залишків мінеральних та органічних добрив та технічно правильне зберігання в період міжсезоння. Залишки вологи із високою концентрацією мінеральних добрив призводить до виникнення корозійних ушкоджень несучих конструкцій колісних транспортних засобів, а як наслідок до послаблення самих конструкцій та до виведення з ладу окремих вузлів машин. Значний корозійний вплив чиниться безпосередньо на ті частини машин, які вступають в прямий контакт із розчинами добрив. Зокрема це є робочі органи розкидачів, ланцюгові передачі, транспортувальні механізми та несучі конструкції рам, ін. [1].

В період міжсезонного зберігання машино-тракторного парку, конструкції із сталей з низьким та середнім вмістом вуглецю особливо із пошкодженим

лакофарбовим покриттям кородують зі швидкістю від 0,011 до 0,05 мм/рік. Швидкість поширення корозії несучих конструкцій та ходової частини колісних транспортних засобів становить до 0,5 мм/рік [2].

Незважаючи на те що масові пошкодження металоконструкцій в машинах задіяних у вносенні мінеральних добрив становить лишень 0,1 %, в цілому дане явище напряму впливає на загальний технічний стан, а як наслідок на роботоздатність машини в цілому. Особливо небезпечними для надійності є поєднання корозійного впливу, а також циклічних та ударних навантажень на вузли та агрегати. При цьому термін служби експлуатації машин може знизитись на 35-50% [3].

Процеси протікання корозії при контакті сталевих поверхонь із мінеральними добривами, особливо з їх водними розчинами, вивчені недостатньо. Недостатня кількість результативних досліджень унеможлиблює розробку ефективних методів антикорозійних засобів для машин із вносення добрив і не дозволяє програмним шляхом зробити достовірні прогнози ресурсу роботи колісних транспортних засобів.

**Постановка завдання.** З метою дослідження протікання корозійних процесів провели дослідження швидкості та механізмів електрохімічної корозії конструкційних сталей різної сталей, які широко застосовуються в автотранспортному машинобудуванні у середовищах мінеральних добрив: сульфату амонію та нітрофоски та у розчині ґрунтових вод. Досліджувались сталі звичайної якості (Ст3, Ст5) і якісних (Сталь 10, Сталь 15, Сталь 20, Сталь 25, Сталь 45, Сталь 1X13).

**Виклад основного матеріалу.** Випробування корозійної стійкості проводили на зразках виготовлених із сталей різних марок, формою у вигляді круглих дисків діаметром 20 мм, товщиною 0,2 мм та технологічними отвором діаметром 3 мм призначеними для кріплення на пластиковому держаку. Шорсткість поверхні була доведена до  $R_a = 0,58$  мкм. Дула проведена підготовка зразків, яка полягала в обезжиренні поверхні розчинником, подальшому осушенні в ексикаторі протягом 1,5 год. Готові зразки проходили зважування на аналітичній вазі з точністю  $\pm 0,0004$  г та зберігали в ексикаторі не більше 32 год. [4].

За корозивним середовищем була прийнята дистильована вода (модель водного конденсату або дощівки) та насичені розчини мінеральних добрив:

- 1) сульфату амонію  $(NH_4)_2SO_4$ , що містить 20,5% нітрогену та 24% сульфуру з незначними домішками  $H_2SO_4$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  та  $SiO_2$ ;
- 2) нітрофоски – суміші  $NH_4H_2PO_4$ ,  $(NH_4)_2HPO_4$  та  $KNO_3$ , що містить по 35...52% нітрогену,  $P_2O_5$  та  $K_2O$ ;
- 3) розчин ґрунтових вод.

На початку корозійних досліджень та по їх завершенню вводили заміри рН розчинів рН-метром Н – 160М.

Швидкість корозії  $K_m$  ( $g/(cm^2 \cdot hr)$ ) визначали масометричним методом після експозиції протягом 1, 8, 16 та 32 діб в розчинах сульфату амонію, нітрофоски, розчину ґрунтових вод і для порівняння у дистильованій воді та після усунення продуктів корозії [5].

Для проведення розрахунків дуло використано формулу

$$K_m = \frac{m}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

де  $\Delta m$  – різниця ваги зразка до і після експозиції в корозивному середовищі та усунення продуктів корозії, г;

$S$  – площа зразка,  $cm^2$ ;

$\tau$  – час його експозиції, год.

На основі отриманих величин було проведено розрахунок глибинного показника  $\Pi$  (мм/рік) за формулою:

$$\Pi = K_m k \cdot 10^{-1}, \quad (2)$$

де  $k$  – коефіцієнт перерахунку год в рік;

$\gamma$  – густина сталі (7,86 г/см<sup>3</sup>).

Інтенсивність впливу сипучих міндобрив на корозійну витривалість Сталей 10, 15, 20, 25, 45, 1X13 та Ст3 і Ст5 випробовували шляхом занурення металічних зразки в сухі міндобрива у вертикальному положенні. Контроль наявності корозійних пошкоджень проводили в інтервалі часу 1, 8, 16 та 32 доби. Розрахунок швидкості протікання корозійних процесів в сухих міндобривах проводили з використанням формул (1) та (2).

Для проведення поляризаційних досліджень використовували потенціоста IP-Pro з базовим програмним забезпеченням [6]. У якості робочого електрода використовувалися зразки із вище згаданих сталей, які були запресовані у фторопласт, а їх площа робочої поверхні становила 0,0456 см<sup>2</sup>. Перш ніж проводити заміри кожен зразок зачищався шліфпапером №0, проходив обезжирення та просушування. Електрод порівняння – насичений хлорсрібний, допоміжний – платиновий. Струм корозії, константи Тафеля катодної та анодної реакцій визначали із прямолінійних ділянок поляризаційних кривих.

Розрахунок масових показників швидкості корозійних процесів здійснювали на основі струмових, за формулою:

$$K = \frac{ikA}{nF}, \quad (3)$$

де  $i$  – струм корозії, А/см<sup>2</sup>;

$k$  – коефіцієнт ( $k = 1$ , якщо час випробувань виражений у секундах, а площа – в см<sup>2</sup>);

$A$  – атомна маса металу (для заліза та сталі  $A = 56$ );

$n$  – валентність металу (для заліза 2 або 3);

$F$  – стала Фарадея [7].

Оцінку характеру корозійних пошкоджень які з'явилися на поверхні зразків проводили скануючим електронним мікроскопом EVO-40XUP (Zeiss) який обладнаний системою рентгеноспектрального мікроаналізу INCA Energy 350, призначену для локального хімічного аналізу поверхні [8].

В процесі проведення дослідження дуло помічено що перші прояви корозійних пошкоджень у вигляді поодиноких пітингів з'явилися на таких зразках як зразки із Сталі 20, які були занурені в сухий (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, з'явилися вже через 32 год, а у наступні 4 доби злилися у виразки. В свою чергу в сухій нітрофосці поодинокі пітинги з'явилися на 8-му добу. У продовж 32 доби швидкість поширення корозії в Сталі 20 у сухому (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> стабілізується на межі 0,005 мм/рік, а у сухій нітрофосці – в межах 0,0014 мм/рік.

Оскільки насичені розчини нітрофоски та сульфату амонію є слабкислими середовищами то відповідно рН=4,35 та рН=4,6. Це дає підстави зважати на ймовірність протікання процесу корозії іншим чином, та буде відрізнитись від процесів дистильованій воді. А отже швидкість протікання корозійних процесів у насичених розчинах сульфату амонію та нітрофоски для дослідних сталей на порядок вищі, ніж у дистильованій воді (табл. 1). Хоча неможна заперечувати що часова залежність швидкості корозії є яскраво вираженою для нейтральних середовищ, а із збільшенням

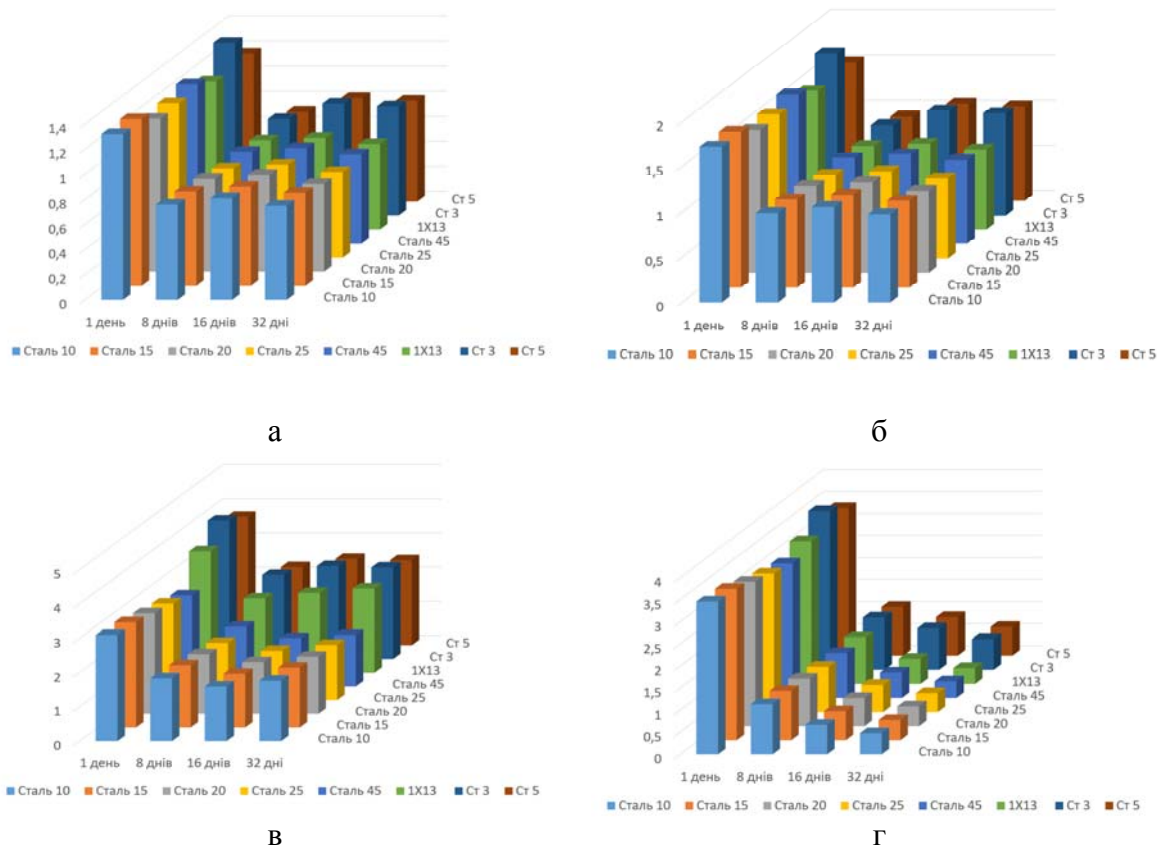
терміну експозиції з 1 доби до 32 діб швидкість протікання корозійних процесів поступово зменшується (табл. 1).

Таблиця 1 – Швидкість поширення корозії досліджуваних зразків у нейтральних та агресивних середовищах

Середовище, сталь		Швидкість корозії, $K_m \cdot 10^5$ , г/(см <sup>2</sup> ·год)			
		1	8	16	32
Дистильована вода	Сталь 10	1,32	0,76	0,81	0,75
	Сталь 15	1,33	0,75	0,79	0,74
	Сталь 20	1,22	0,74	0,77	0,7
	Сталь 25	1,23	0,71	0,74	0,68
	Сталь 45	1,27	0,73	0,76	0,71
	1X13	1,18	0,71	0,73	0,68
	Ст 3	1,375	0,77	0,891	0,869
	Ст 5	1,177	0,715	0,825	0,803
Ґрунтові води	Сталь 10	1,716	0,988	1,053	0,975
	Сталь 15	1,729	0,975	1,027	0,962
	Сталь 20	1,59	0,962	1,001	0,91
	Сталь 25	1,599	0,923	0,962	0,884
	Сталь 45	1,651	0,949	0,988	0,923
	1X13	1,534	0,923	0,949	0,884
	Ст 3	1,788	1,001	1,158	1,13
	Ст 5	1,53	0,93	1,073	1,044
Сульфат амонію	Сталь 10	3,10	1,84	1,60	1,77
	Сталь 15	3,07	1,82	1,57	1,75
	Сталь 20	2,93	1,74	1,51	1,67
	Сталь 25	2,81	1,67	1,44	1,61
	Сталь 45	2,65	1,74	1,41	1,50
	1X13	3,54	2,16	2,32	2,45
	Ст 3	4,04	2,45	2,71	2,67
	Ст 5	3,75	2,28	2,52	2,48
Азотно-фосфорно-калійне добриво	Сталь 10	3,46	1,14	0,67	0,48
	Сталь 15	3,43	1,12	0,66	0,46
	Сталь 20	3,27	1,08	0,64	0,45
	Сталь 25	3,14	1,03	0,62	0,43
	Сталь 45	3,05	1,02	0,58	0,38
	1X13	3,23	1,05	0,57	0,36
	Ст 3	3,60	1,18	0,94	0,69
	Ст 5	3,35	1,10	0,87	0,65

Джерело: розроблено авторами

На проміжку першої доби реєструється найвища швидкість протікання корозійних процесів у всіх зразках в насиченому розчині нітрофоски. В свою насиченому розчині сульфату амонію швидкості протікання корозійних процесів у часовому діапазоні (1-32 доби) вдвічі вища, ніж у дистильованій воді, а вже із 16-ї доби – більші, ніж у розчині нітрофоски. Дані швидкості у 25-30 разів вищі, ніж аналогічні швидкості в сухих мінеральних азотно-фосфорно-калійних добривах та сульфатів амонію, що являє собою наслідки каталітичного впливу води.



а - дистильована вода; б - ґрунтові води; в - сульфат амонію; г - азотно-фосфорно-калійне добриво

Рисунок 1 – Швидкість корозії

Джерело: розроблено авторами

Вода що являє собою полярний розчинник, сприяє дисоціації сульфату амонію (4) та нітрофоски (5-7).

Продукти дисоціації сумісно з водою є більш корозійно активними, ніж відповідні кристалічні солі.

Показники швидкостей протікання корозії в розчинах нітрофоски у порівнянні зі сульфатом амонію, ґрунтовими водами та дистильованою водою при експозиції вищій ніж 16 діб, ймовірно пов'язані, з пасивуючою дією аніонів  $\text{NO}_3^-$  та виникненням на поверхні сталі фосфатного шару покритого іонами  $\text{HPO}_4^{2-}$ .

На електронному зображенні поверхні, до прикладу Сталі 45 після 32-добової експозиції у дистильованій воді, сульфаті амонію і нітрофосці та очищення від продуктів корозії можна помітити низу відмінностей в характері корозійних пошкоджень. Так сульфат амонію призводить до виникнення пітинги і виразки, більшої глибини та площі у порівнянні із дистильованою водою. Застосувавши поелементним аналіз, можна стверджувати, що у місцях корозії присутні сульфур, залишки кальцію та оксигену, притому що у пітингах, які сформувались у дистильованій воді, у більшій кількості присутній кальцій та оксиген. На поверхня дослідних зразків, що піддавались

впливу розчину нітрофоски, виявлено на поверхні поодинокі пітинги, а на дні виявлено сліди Na, Ca, K, Cl та азот.

Характер корозійного ураження та глибина пітингів на дослідних зразках Сталі 20 після експозиції в нітрофосці є меншою та відрізняється за характером у порівнянні з експозицією в сульфаті амонію.

Корозійні ураження в насичених розчинах сульфату амонію та нітрофоски мають характер протікання за електрохімічними механізмами. Стаціонарні потенціали сталей, що були встановлені у продовж 25-30 хв, найбільш низькі в розчині сульфату амонію (табл. 2). У порівнянні із зразками зануреними в дистильовану воду ці величини мають більш від'ємний показник аж на 300 mV, що свідчить про нижчу термодинамічну стійкість сталей вищої якості та сталей нижчої якості в розчинах даного мінерального добрива.

Таблиця 2 – Електрохімічні характеристики досліджуваних зразків у нейтральних та агресивних середовищах

Середовище Сталь	Вода дистильована, H <sub>2</sub> O <sub>дист</sub>				Сульфат амонію, (NH) <sub>4</sub> SO <sub>4</sub>				Нітрофоска			
	$-E_{st}$ , mV	$i_{cor} \cdot 10^5$ , A/cm <sup>2</sup>	$b_c$ , mV	$b_a$ , mV	$-E_{st}$ , mV	$i_{cor} \cdot 10^5$ , A/cm <sup>2</sup>	$b_c$ , mV	$b_a$ , mV	$-E_{st}$ , mV	$i_{cor} \cdot 10^5$ , A/cm <sup>2</sup>	$b_c$ , mV	$b_a$ , mV
Сталь 10	441	3,6	26,3	23,5	836	10,9	12,7	16,1	731	12,0	20,3	10,5
Сталь 15	437	3,5	26,5	23,7	837	10,8	12,8	16,2	730	11,9	20,5	10,6
Сталь 20	416	3,4	28,0	25,0	789	10,3	13,4	17,1	689	11,3	21,6	11,2
Сталь 25	399	3,1	29,2	26,0	758	9,9	14,1	18,1	661	10,9	22,6	11,3
Сталь 45	389	2,9	30,7	27,0	731	9,5	14,3	19,5	642	10,5	23,6	11,5
1X13	472	4,0	2,6	22,2	831	16,9	13,0	14,8	619	12,7	19,4	10,3
Ст 3	449	4,6	23,9	20,5	796	16,0	13,6	16,2	692	14,7	23,0	10,1
Ст 5	431	4,4	22,6	19,7	763	15,3	12,9	15,0	664	14,1	22,1	9,6

Джерело: розроблено авторами

Також поляризаційні криві конструкційних сталей звичайної якості, до прикладу Ст 3 порівняно з сталями вищої якості, таких як сталь Ст 20 знаходяться в межах більш від'ємних потенціалів (табл. 3). В той час як катодні криві аналогічних сталей у насичених розчинах нітрофоски та сульфату амонію в дистильованій воді показують певну різницю, так на катодній кривій у сульфаті амонію Сталі 20 у ділянці потенціалів  $-(780...890)$  mV а у області граничного дифузійного струму менш чітко виражена, ніж на Ст 3 а також в обох зразках в розчині ґрунтових вод, дистильованій воді та в нітрофосці. Також потрібно звернути увагу що граничний дифузійний струм який протікає в розчині нітрофоски на сталі 25 рівний 1 А/см<sup>2</sup>, а на сталі 3 – 1,4 А/см<sup>2</sup>, а у розчині сульфату амонію становить 0,6 А/см<sup>2</sup> та 1,6 А/см<sup>2</sup>.

Проведені дослідження також показали що в Сталь 20 у порівнянні з сталями нижчої якості, наприклад Ст 3, при зануренні їх в різні мінеральні добрива починають пасивуватися при менш від'ємному потенціалі. Струмові показники швидкостей корозійних процесів, що протікають у звичайних сталей незначно вищі, ніж у більш якісних сталей. Струми корозії мають найвищі показники в розчині нітрофоски, що підтверджують і гравіметричні дані. Так як струмові показники є короткотривалими, то по своїх значеннях вони повинні відповідати значенням швидкості корозії, які були отримані ваговим методом у продовж доби. Провівши розрахунок струмів корозії з використанням формули 3 можна стверджувати про наявність узгодження із швидкостями корозії, які були отриманими ваговим методом при умові, окислення заліза Fe<sup>0</sup> до Fe<sup>3+</sup> (табл. 3).



Таблиця 3 – Співставлення швидкостей корозії досліджуваних зразків, отриманих гравіметрично, електрохімічно та перерахованих із струмових показників

Середовище Сталь	Вода дистильована, $H_2O_{\text{дист.}}$			Сульфат амонію, $(NH)_4SO_4$			Нітрофоска		
	$K_m \cdot 10^9$	$i_{\text{cor}} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$	$K_m \cdot 10^9$	$i_{\text{cor}} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$	$K_m \cdot 10^9$	$i_{\text{cor}} \cdot 10^5$	$K_i \cdot 10^9$
Сталь 10	3,8	3,6	6,8	8,6	11,0	20,3	9,6	12,0	22,6
Сталь 15	3,8	3,5	6,7	8,5	11,5	20,0	9,5	11,9	22,4
Сталь 20	3,6	3,4	6,5	8,2	10,3	19,2	9,1	11,3	21,4
Сталь 25	3,5	3,2	6,3	7,8	9,9	18,4	8,7	10,9	20,5
Сталь 45	3,5	3,1	6,0	7,6	9,4	17,7	8,4	10,4	19,6
1X13	4,0	4,7	6,9	8,8	13,0	23,9	9,3	13,0	25,0
Ст 3	3,9	4,6	8,7	11,4	16,0	30,2	10,0	14,7	28,1
Ст 5	3,8	4,4	8,3	10,9	15,2	28,7	9,4	13,9	26,7

Джерело: розроблено авторами

Провівши дослідження константи Тафеля анодних реакцій можна стверджувати що в дистильованій воді, розчина ґрунтових вод, розчинах нітрофоски та в розчинах сульфату амонію суттєвих відмінностей не виявлено. Найнижчі значення  $b_a$  – в азотно-фосфорно-калійному добриві, а найвищі в дистильованій воді. А отже початковий анодний процес найбільш ускладнений в дистильованій воді, а найменше ускладнений в нітрофосці. Перенапруження анодного процесу у досліджених середовищах є більшим на якісних сталях, ніж на сталях звичайної якості що і є причиною меншої корозійної тривкості сталей звичайної якості.

Отже можна стверджувати що мінеральні добрива такі як нітрофоска та сульфат амонію за присутності води схильні до значної корозійної активності стосовно конструкційних вуглецевих сталей, незважаючи на вміст вуглецю.

**Висновки.** Встановлено вплив на рівень міцності і надійності транспортних засобів шляхом дослідження впливу агресивних середовищ аграрного виробництва на металеві матеріали металокопункцій колісних транспортних засобів. Доведено, що у порівнянні із їхніми сухими концентратами, розчини нітрофоски та сульфату амонію викликають локальне корозійне пошкодження не тільки звичайних конструкційних сталей, а і легованих сталей (Сталь 1X13). Швидкість корозії при цьому сягає 0,29...0,33 мм/рік, що у порівнянні із швидкістю корозії в дощовій воді до 3 разів вище.

Проведенні дослідження довели що насичені розчини мінеральних добрив у порівнянні з їхніх сухими станами викликають значні корозійні пошкодження конструкційних сталей незалежно від їх якості. А отже мінеральні добрива такі як нітрофоска та сульфат амонію за присутності води схильні до значної корозійної активності стосовно конструкційних вуглецевих сталей, незважаючи на вміст вуглецю, а корозійні пошкодження мають суттєвий вплив на конструкційну міцність колісних транспортних засобів.

## Список літератури

1. Оцінка міцності та надійності автотранспортних засобів / М.В. Буряк та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. Том 15, № 1. С. 17–22
2. Оцінка довговічності металокопункцій автотранспортних засобів / М.В. Буряк та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. Том 15, № 1. С. 11-17
3. Обґрунтування доцільності удосконалення трансмісії пасажирських автобусів типу Van Hool Асron 915 Та Neoplan N316/ 3 Ul / О.П. Захарчук, Р.І. Розум, М.В. Буряк, Н.М. Фалович. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті* : зб. наук. ст. 2022. № 1 (18). С. 81-86.
4. Методологія діагностування автомобільних дизельних двигунів /Р.І. Розум та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті* : зб. наук. ст. 2022. № 1 (18). С. 138-142.

5. Експлуатаційна надійність і роботоздатність вантажного автомобільного рухомого складу / Розум Р.І., та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: зб. наук. праць*. 2022. Вип. № 5 (36), ч.2. С. 201-205.
6. Hevko B.M., Hevko R.B., Klendii O.M., Buriak M.V., Dzyadykevych Y.V., Rozum R.I. Improvement of machine safety devices. *Acta Polytechnica, Journal of Advanced Engineering*. 2018. Vol.58, no.1. Pp.17-25

## Referens

1. Buriak, M.V., Rozum, R.I., Falovych, N.M., Prohni, P.B., Popovych, P.V., Shevchuk, O.S., Antoniuk, O.P. (2022). Otsinka mitsnosti ta nadiinosti avtotransportnykh zasobiv [Оцінка міцності та надійності автотранспортних засобів], *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, Vol. 15, 1, 17–22 [in Ukrainian].
2. Buriak, M.V., Rozum, R.I., Zakharchuk, O.P., Prohni, P.B., Popovych, P.V., Shevchuk, O.S., & Halushchak, D.O. (2022). Otsinka dohovichnosti metalokonstruktsii avtotransportnykh zasobiv [Assessment of durability of metal structures of motor vehicles]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport*, Vol. 15, 1 s. 11-17 [in Ukrainian].
3. Zakharchuk, O.P. Rozum, R.I., Buriak, M.V. & Falovych, N.M. (2022). Obgruntuvannia dotsilnosti udoskonalennia transmisii pasazhyrskykh avtobusiv typu Van Hool Acron 915 Ta Neoplan N316 [Justification of the feasibility of improving the transmission of passenger buses of the Van Hool Acron 915 and Neoplan N316/ 3 U1 type]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti: zb. nauk. st. – Modern technologies in machine building and transport: coll. of science Art.*, 1(18) , 81-86 [in Ukrainian].
4. Rozum, R.I., Buriak, M.V., Popovych, P.V., Prohni, P.B. & Zakharchuk, O.P. (2022). Metodolohiia diahnostuvannia avtomobilnykh dyzelnykh dvyhuniv [Methodology for diagnosing automotive diesel engines]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni ta transporti Zb. nauk. st. – Modern technologies in machine building and transport: coll. of science Art.*, 1(18), 138-142. [in Ukrainian].
5. Rozum, R.I., Buriak, M.V., Prohni, P.B., Falovych, N.M., Shevchuk, O.S., Popovych, P.V., Zakharchuk, O.P. (2022). Ekspluatatsiina nadiinist i robotozdatnist vantazhnoho avtomobilnoho rukhomoho skladu [Operational reliability and efficiency of freight automobile rolling stock. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences: coll. of science works*, Vol. 2, 5(36), 201-205 [in Ukrainian].
6. Hevko B.M., Hevko R.B., Klendii, O.M., Buriak, M.V., Dzyadykevych, Y.V. & Rozum R.I. (2018). Improvement of machine safety devices. *Acta Polytechnica. Journal of Advanced Engineering*, Vol. 58, no.1, pp.17-25 [in English].

**Mykola Buriak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Rozum**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olena Zakharchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Pavlo Popovich**, Prof., DSc., **Pavlo Prohniy**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

**Leonid Chornii**, Head of the professional lyceum

*Halytskyi College named after Vyacheslav Chornovol, Ternopil, Ukraine*

### **Influence of Aggressive Environments on the Performance Characteristics of Materials of Bearing Structures of Wheeled Vehicles**

The influence of aggressive environments on the operational characteristics of metal structures of wheeled vehicles was investigated.

It has been established that, in comparison with their dry concentrates, solutions of mineral fertilizers nitrogen-phosphorus fertilizer and ammonium sulfate cause local corrosion damage not only to ordinary structural steels, but also to alloyed steels (Steel 25, Steel 45, Steel 1X13). At the same time, the rate of corrosion reaches 0.29...0.33 mm/year, which is up to 3 times higher than the rate of corrosion in rainwater. The specified metal materials have the highest rate of corrosion propagation during the first day, then the intensity of corrosion decreases to values equivalent to the rate of corrosion propagation in rainwater. Stationary potentials of steels have the largest negative value for ammonium sulfate solutions, and corrosion currents, in turn, in nitrogen-phosphorus fertilizer solutions.

Having considered the previously mentioned group of steels in the investigated environments, it can be noted that the difference in the Tafel constant b with cathodic reactions is insignificant, and the constant ba has the lowest value in the nitrophoska solution, which indicates a slight polarization of the anodic reaction.

**corrosion of metals, mineral fertilizers, corrosion current, corrosion rate, stationary potential, depth index, polarization, anodic and cathodic reaction**

*Одержано (Received) 16.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.151-159](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.151-159)

**Ю.В. Дзяди́кевич**, проф., д-р техн. наук, **О.П. Захарчук**, доц., канд. техн. наук,  
**П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук, **Р.І. Розум**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Буряк**,  
доц., канд. техн. наук

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна*

**В.В. Шевчук**, доц., канд. техн. наук

*Львівський національний університет природокористування, м.Дубляни, Україна*

*e-mail: [yu.dziadykevych@wunu.edu.ua](mailto:yu.dziadykevych@wunu.edu.ua), [olenaskyba8500@gmail.com](mailto:olenaskyba8500@gmail.com), [ppopovich@ukr.net](mailto:ppopovich@ukr.net),  
[rozoom\\_ruslan@ukr.net](mailto:rozoom_ruslan@ukr.net), [burjak74@ukr.net](mailto:burjak74@ukr.net), [pr\\_lnuu@ukr.net](mailto:pr_lnuu@ukr.net)*

## Використання боридних і силіцидних покриттів у ДВЗ: технологічний аспект

В статті досліджено основні закономірності процесу формування на тугоплавких металах однофазних, багатофазних, багатшарових композиційних покриттів із високими показниками жаростійкості та довговічності. Проведено дослідження боридного покриття на тугоплавких металах, яке показало, що на металах утворюється однофазне покриття, яке має хороше зчеплення з основою. Виявлено утворення моноборидної фази на молібдені та вольфрамі та боридна на ніобію і танталі, за результатами рентгенофазового та мікрорентгеноспектрального методів аналізу. Проведено дослідження впливу температури на процес дифузійного силіціювання тугоплавких металів, яке показало, що в інтервалі 950–1100 °С формується однофазне покриття, яке складається із дисиліцидів металів  $MeSi_2$ . Виявлено, що подальше підвищення температури процесу насичення приводить до різкого росту товщини силіцидного шару. Встановлено, що ефективним дифузійним бар'єром є боридні фази тугоплавких металів, які забезпечують стабільність дифузійній частині багатокомпонентного покриття. Визначено, що боридні фази по відношенню до металеві основи більш стабільні, ніж силіцидні. Завдяки утворенню на границі боридних і силіцидних шарів силікоборидних фаз забезпечується висока стабільність боросиліцидного покриття. Визначено, що наявність проникаючих домішок в металевій матриці призводить до поганого захисту оксидної плівки дифузійного покриття і, як наслідок, до низької довговічності. Запропоновано механізм перенесення проникаючих домішок із глибини металу до межі порошкового середовища. Отримані боросилікатно-насичені металеві технологічні параметри дозволяють формувати дифузійне покриття з дрібнозернистою структурою на тугоплавких металах. Для забезпечення високих захисних характеристик необхідне подальше дослідження формування шаруватої частини покриття.

**двигуни, процес силіціювання металів, процес борування металів, дифузійний шар**

**Постановка проблеми.** Збільшення потужності двигунів внутрішнього згорання за рахунок використання новітніх видів палив зумовило застосування тугоплавких металів при виробництві елементів ДВЗ. Тугоплавкі метали (ніобій, тантал, молібден, вольфрам) і сплави на їх основі володіють унікальним комплексом фізико-механічних і хімічних властивостей. Це дозволяє їм займати у високотемпературній техніці чільне місце [1, с. 94]. Однак низька жаростійкість обмежує їх практичне застосування. На сьогоднішній день захист тугоплавких металів від високотемпературного окислення реалізується різними шляхами. Одним із них є формування на їх поверхні дифузійного силіцидного покриття ( $MeSi_2$ ). Однак одношарові покриття є неефективні і не відповідають сучасним вимогами високотемпературної техніки, характерними ознаками якої є підвищення робочих температур, знакозмінні навантаження та вплив агресивного середовища. Проведений аналіз робіт, присвячених проблемі захисту тугоплавких металів від окислення, свідчить про те, що багато вчених вважають, що

© Ю.В. Дзяди́кевич, О.П. Захарчук, П.В. Попович, Р.І. Розум, М.В. Буряк, В.В. Шевчук, 2023

захисне покриття повинно відповідати комплексу вимог і водночас виконувати різні функції, кількість яких значно зростає у випадку експлуатації виробу в умовах термоциклювання. На наш погляд така думка є хибною, оскільки не сприяє підвищенню жаростійкості тугоплавких металів шляхом формування на їх поверхні захисного покриття. Перспективним напрямом захисту тугоплавких металів від високотемпературного окислення є формування на їх поверхні багат шарового покриття у якому кожний шар виконує певну функцію, наприклад, зовнішній шар забезпечує жаростійкість боросиліцидної композиції; внутрішній шар запобігає взаємодії дифузійної складової покриття з основою; дифузійний шар сприяє релаксації напруги у покритті при багаторазовій зміні температурного режиму, а також покращує адгезію між шарами покриття. Такий підхід повинен забезпечити ефективний захист тугоплавких металів від окислення і водночас підвищити їх довговічність.

З огляду на це, дослідження процесу підвищення жаростійкості тугоплавких металів шляхом формування на їх поверхні багат шарового покриття, яке складається з дифузійної і шлікерної зони є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемі захисту конструкцій із тугоплавких металів від високотемпературного окислення присвячена низка робіт вітчизняних вчених, зокрема: Кицькай Л.І. [2, с. 6], Погребова І.С. [3, с. 92], Буряк М. В. [4, с. 14], Г.В. Каракуркчі [5, с. 58]. Однак пошук наукових робіт, проведених за останні роки показав, що кількість досліджень, присвячених проблемі підвищення жаростійкості тугоплавких металів, надзвичайно мала. Це зумовило необхідність їх подальшого вивчення.

У дисертації Кицькай Л.І. [2, 12] вивчено вплив фторидів металів першої-А групи на збільшення інтенсивності процесу насичення танталу і ніобію молібденом і вольфрамом. За результатами проведених досліджень запропоновано механізм утворення твердозамінних розчинів у тугоплавких металах. Вперше показано можливість отримання боридної, силіцидної та боросиліцидної фаз на основі твердих розчинів молібдену в ніобії та танталі, які є складовими елементами дифузійної частини багат шарових покриттів. Визначено технологічні параметри процесу нанесення багат шарових термостійких покриттів з ніобію та танталу та покращено показник ефективності.

У роботі І. С. Погребова [3, с. 93] досліджено захисні властивості хромсиліцидних дифузійних покриттів, нанесених на сталь 45 і отриманих газовим методом. Доведено, що покриття з силіцидів хрому, отримані цим методом, мають високу термостійкість до 1000°C. Встановлено, що дифузійні хромсиліцидні покриття, окислені при 700–800°C, більш стійкі до корозії в різноманітних агресивних середовищах і мають більш стабільний стан пасивації, ніж неокислені покриття. На основі проведених досліджень запропоновано новий спосіб нанесення дифузійного покриття на поверхню вуглецевої сталі з подальшим окисленням. Хромсиліцидні покриття, отримані запропонованим способом, дозволять рекомендувати їх для практичного використання в умовах, коли вироби з вуглецевої сталі одночасно піддаються впливу корозійних середовищ і високих температур.

Одним із найефективніших технологічних підходів до зміцнення та ремонту пошкоджених поверхонь і підвищення надійності механічних деталей двигунів внутрішнього згорання є модифікація поверхневих шарів металу шляхом нанесення функціональних покриттів. Покращення механічних властивостей, економічність процесу, можливість формування покриттів з металів і багатокomпонентних сплавів, які важко отримати металургійними або хімічними методами, широкі варіації властивостей гальванічних осадів залежно від загальних властивостей наплавлених компоненти, являють собою гальванічні покриття. Компоненти шарового переднього

плану широко використовуються у виробничій та ремонтній практиці. Легування кобальтових покриттів молібденом і вольфрамом прогнозовано покращує фізико-механічні властивості та корозійну стійкість електrolітичних сплавів

Враховуючи те, що самоідентифіковані метали не відновлюються на катоді, вони легко соосажаються в сплави з Fe і Co, а через особливості процесу легування утворені системи в більшості випадків є аморфними або нанокристалічними. Структурна однорідність сформованих тонкоплівкових матеріалів сприятиме покращенню корозійної стійкості та механічних властивостей, що дозволяє розглядати їх як перспективні конструкційні матеріали в технологіях поверхневого зміцнення та запобігання пошкодженням [5, с. 95].

Отже, аналізуючи роботи, присвячені захисту тугоплавких металів від високотемпературного окислення, можна зробити висновок, що перспективним захистом елементів ДВЗ повинні бути багатокомпонентні композиційні покриття на основі тугоплавких сполук, які мають низьку швидкість дифузійної взаємодії з основою і забезпечують високий ресурс роботи.

**Постановка завдання.** Дослідження основних закономірностей процесу формування на тугоплавких металах однофазних, багатофазних, багатошарових композиційних покриттів із високими показниками жаростійкості та довговічності.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розширити галузь застосування тугоплавких металів і сплавів можна шляхом формування на їх поверхні боридних і силіцидних шарів, які мають високу твердість, стійкість проти спрацювання, підвищену жаро- і корозійну стійкість.

Насичення тугоплавких металів і сплавів бором і кремнієм є складним фізико-хімічним процесом, який складається із таких стадій:

- доставка дифундуючого елемента до металевої поверхні та хемосорбція його поверхню металу;
- дифузія бора (кремнія) через шар фази, що утворилася;
- проходження хімічних реакцій на границі розділу фаз.

Для формування захисних покриттів на тугоплавких металах найбільш широке застосування має дифузійне насичення в порошкових сумішах із використанням контейнерів із плавким затвором. Необхідно зазначити, що на якість дифузійного шару впливають різні чинники, зокрема: температура насичення, тривалість процесу, кількість дифузійного джерела, наявність домішок у суміші та вміст активатора.

Для борування металів і сплавів як насичуюче середовище використовували технічний карбід бора, концентрація, якого змінювалася від 20 до 80%, а решта був оксид алюмінію. Зернистість карбіду бора не перевищувала 120 мкм. Насичення проводили в інтервалі температур 950–1100 °С. Тривалість процесу борування була 2,4,6,8,12 годин. Дослідження показало, що на металах утворюється однофазне покриття, яке має хороше зчеплення з основою. За даними металографічного та рентгенофазового методів аналізу на молібдені та вольфрамі формується моноборидна фаза  $\alpha$ -MeB, яка має голчату структуру (рис.1). Водночас на ніобію і танталі, за результатами рентгенофазового та мікрорентгеноспектрального методів аналізу, утворюється боридна фаза MeB<sub>2</sub>.

Вона має дрібні виступи, які направлені до основи. Збільшення концентрації карбіду бора в насичуючій суміші (більше 80 %) приводить до росту товщини шару покриття, але спостерігається погіршення його якості, pojawiaються тріщини і порушується розмірність по товщині шару покриття. Аналогічна картина має місце при підвищенні температури процесу насичення (більше 1100 °С) та збільшення тривалості борування (більше 12 годин). На підставі проведених досліджень можна запропонувати механізм формування покриття. Починаючи з 600 °С, у насичуючому

середовищі відбувається взаємодія карбіду бору з киснем повітря, що знаходиться в контейнері, з утворенням борного ангідриду і вільного вуглецю, кількість якого з підвищенням температури та вмісту карбіду бору в суміші зростає швидше, ніж субоксиду бору  $B_2O_2$ , який здійснює транспортні функції щодо бору. При температурі насичення в контейнері відбувається реакція взаємодії карбіду бору з борним ангідридом і взаємодія продуктів їх реакції з поверхнею тугоплавкого металу. Водночас із появою розплаву  $B_2O_3 - B_2O_2$ , вуглець, який знаходиться на поверхні металу, дифундує в основу з утворенням карбідних фаз. На поверхні розділу насичуюча суміш – тугоплавкий метал відбуваються такі реакції:  $B_2O_3 + C \rightarrow B_2O_2 + CO$  і  $B_2O_2 + C \rightarrow 2B + CO_2$ , які в умовах експерименту термодинамічно можливі. В результаті взаємодії вуглецю з оксидами бору.

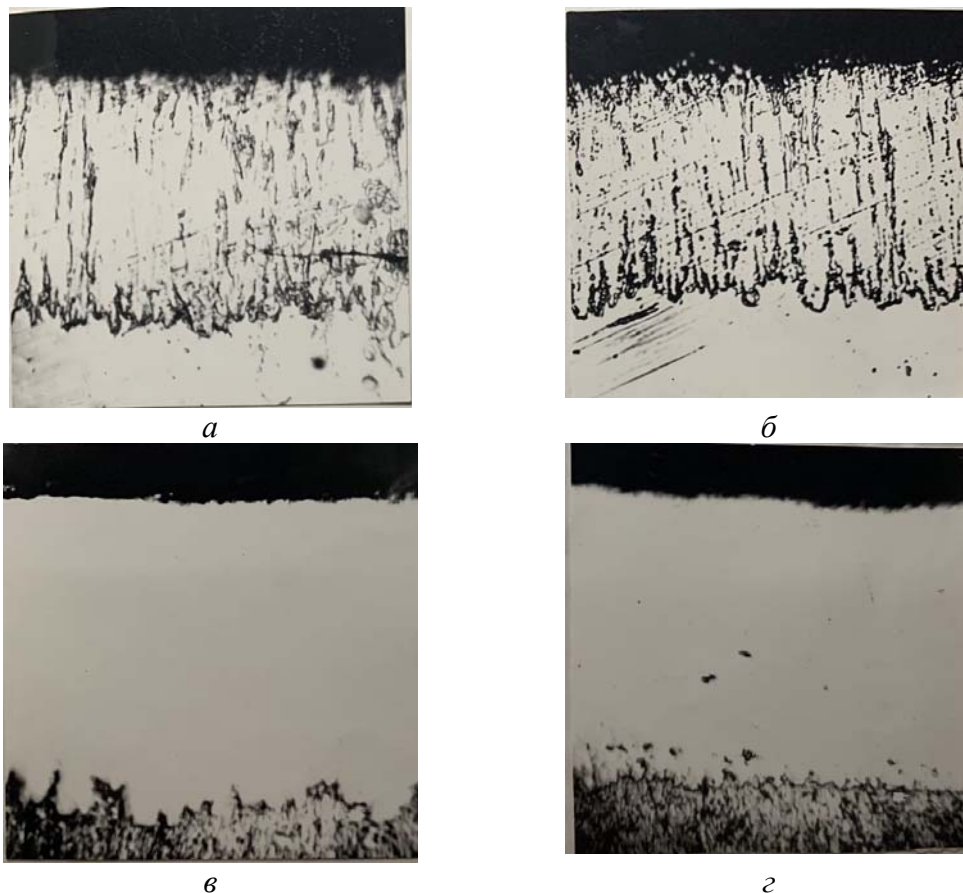


Рисунок 1 – Мікроструктура боридного покриття на тугоплавких металах, x800  
а – вольфрам; б – молибден; в – ніобій; г – тантал. Травл. 50 %  $HNO_3$ .  
 $B_4C$  –80 %;  $T = 1050$  °C;  $t = 6$  год.)

*Джерело: розроблено авторами*

В результаті взаємодії вуглецю з оксидами бору змінюється фазовий склад рідини і прискорюється відведення вуглецю від поверхні основи в розплав. У зв'язку з тим, у поверхневому шарі металу відбувається знеуглецювання і водночас прослідковується його переміщення вглибину металу. При наявності карбіду бору проходить і зустрічний процес – міграція атомів бору і вуглецю до міжфазової поверхні розплаву  $B_2O_3 - B_2O_2$  – основа, оскільки швидкість дифузії вуглецю в тугоплавкому металі на два порядки є вищою, ніж бору, то спочатку відбувається науглецювання приповерхневого шару із розширенням двофазового прошарку  $Me_2C - MeC$ . Але як тільки почнеться реакція взаємодії  $B_2O_3$  з карбідом металу, то поступлення вуглецю в

металеву основу різко обмежується. Отже, боридна фаза  $Me_2B$  проявляє функції дифузійного бар'єру. На поверхні тугоплавкого металу також проходить реакція диспропорціонування з утворенням атомарного бору, який дифундує в металеву основу. Спочатку відбувається поява твердого розчину бору в карбіді метала, а при збільшенні концентрації бора утворюється складна сполука типу  $MeCB$ . Бор поступово витісняє вуглець із карбідів і той переміщується в глибину металу. Підвищення концентрації бору в покритті приводить до послідовної зміни фаз у приповерхневому шарі металу. Боридний шар на тугоплавкому металі росте починаючи з фази  $Me_2B$ . З цього моменту фактично починається процес борування. Він проходить із великою швидкістю і не лімітує тривалість всього технологічного процесу. Присутність вуглецю і кисню в порошковому середовищі і в металевій основі впливає на фазоутворення, ріст товщини боридного шару, на процес формування покриття, а також на його характеристики критерія якості.

Силіціювання металів і сплавів у порошкових сумішах забезпечує одержання захисних жаростійких шарів, властивості яких залежать від складу, структури, якості і способу формування покриття [6, с. 19]. В зв'язку з простотою технологічного і апаратного оформлення широке розповсюдження одержав процес силіціювання металів і сплавів у контейнерах із плавким затвором. Дослідження процесу силіціювання тугоплавких металів у сумішах, у яких було від 5 до 80% кремнію і 3% фтористого натрію, показало, що на металах утворюється покриття, яке відповідає характеристикам критерія якості. Зменшення концентрації кремнію в суміші від 80 до 40% приводить до зменшення товщини шару дисиліцидних фаз на 10%. Водночас спостерігається покращення якісних характеристик покриття (рис.2).

Необхідно зазначити, що при силіціюванні металів у сумішах, які містять менше 40% кремнію, спостерігається зменшення товщини шару покриття, а також зміна його фазового складу. Після 6-годинної тривалості процесу ( $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на границі  $MeSi_2$  –  $Me$  утворюється фаза  $Me_5Si_3$  з товщиною шару 3–5 мкм. Незначне зменшення товщини шару дисиліцидних фаз на тугоплавких металах, можливо зв'язано з тим, що швидкість доставки атомів кремнію до зовнішньої границі покриття змінюється незначно, оскільки концентрація кремнію в суміші є досить великою і в силіцидному шарі забезпечується потрібний градієнт активності кремнію, який приводить до його безперервної дифузії в покритті на протязі всього процесу насичення. Відсутність нижчих силіцидних фаз при насиченні в сумішах, які містять від 40 до 80% кремнію, зв'язано з тим, що доставка дифузанта до зовнішньої границі покриття і швидкість його дифузії через шар такі, що на внутрішній границі забезпечується необхідне співвідношення компонентів для утворення тільки дисиліцидів тугоплавких металів.

Дослідження впливу температури на процес дифузійного силіціювання тугоплавких металів показало, що в інтервалі  $950$ – $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  формується однофазне покриття, яке складається із дисиліцидів металів  $MeSi_2$ . Необхідно зазначити, що подальше підвищення температури процесу насичення приводить до різкого росту товщини силіцидного шару. Особливо інтенсивно спостерігається ріст силіцидного покриття на вольфрамі. Відомо [1, с. 165], що дифузія кремнію у вольфрам може проходити не тільки по вакансіям власної підрешітки, але і поміж вузлах решітки фази  $WSi_2$ . Із підвищенням температури процесу насичення збільшується кількість вакансій в металевій решітці, що дає можливість реалізувати естафетний механізм дифузії кремнію за участю вакансій двох решіток. Отже, сумісна дія двох механізмів дозволяє одержати на вольфрамі силіцидне покриття значно більшої товщини, ніж на других тугоплавких металах. Підвищення температури насичення (вище  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) впливає не тільки на ріст товщини шару покриття, але і на його якість, зокрема, погіршується стан покритої поверхні, збільшується кількість і ширина радіальних тріщин, а також



спостерігається утворення крайового ефекту. Можна припустити, що це зв'язано з особливостями структуроутворення, об'ємними змінами і різницею коефіцієнтів термічного розширення силіциду і металевої основи, що приводить до виникнення внутрішніх напружень, які сприяють росту мікротріщин і утворенню інших дефектів.

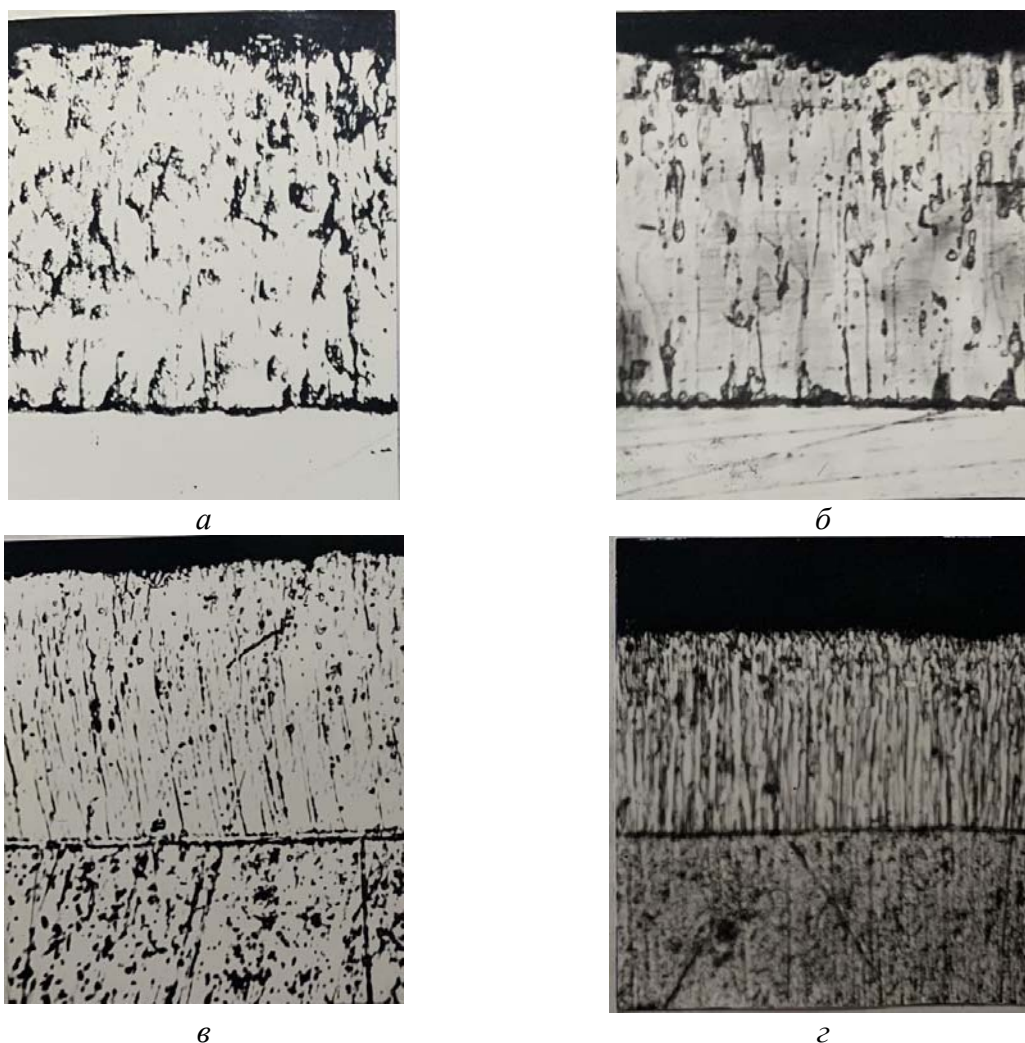


Рисунок 2. Мікроструктура силіцидного покриття на тугоплавких металах, x80  
(а – вольфрам, б – молібден, в – ніобій, г – тантал; (Травл. HF: HNO<sub>3</sub>: H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> = 1 : 1 : 1ч);  
Si=40%, NaF = 3%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> –решта.; T = 1050 °C, t = 6 год )

*Джерело: розроблено авторами*

На ніобії і танталі покриття має стовбчасту структуру. Величина кристалів дисиліцидних фаз по товщині шару змінюється незначно, лише тільки збільшення температури ( вище 1050 °C) насичення приводить до їх росту. На молібдені і вольфрамі формується приповерхневий шар товщиною до 15 мкм, що має дрібнозернисту структуру, яка в глибині покриття переходить в стовбчасту.

На підставі результатів дослідів можна запропонувати механізм утворення структури покриття на тугоплавких металах. На початковій стадії формування шару покриття кристалографічний напрям [001] ще не є основним і ріст кристалів проходить переважно по інших напрямках, що приводить до росту дрібнозернистої структури дифузійного шару. Із ростом товщини шару фази MeSi<sub>2</sub> відбувається підсилення напрямку [001] і послаблення других напрямів. Це є наслідком реалізації принципу



геометричного відбору при нормальному рості кристалів дифузійного шару. Із збільшенням віддалі від границі покриття – основа збільшується кількість кристалів у яких напрям максимальної швидкості росту паралельний нормалі до металевої основи. Необхідно зазначити, що кристалографічний напрям  $[001]$  співпадає з напрямом гвинтової вісі в структурах силіцидних фаз  $WSi_2$  і  $MoSi_2$ . Він має максимальну швидкість росту при нормальному рості кристалів. Площини кристалу, які перпендикулярні гвинтовим вісям, мають найкращу адсорбційну здатність по відношенню до атомів, які поступають із газової фази. Переміщення дифундуючих атомів вздовж гвинтової вісі не вимагає утворення в процесі росту ступенів, які характерні для тангенціального пошарового росту кристалів. Можна припустити, що сформована структура забезпечує максимальну швидкість доставки атомів кремнію від зовнішньої границі покриття до внутрішньої. Такий процес приводить до формування стовбчастої структури. На границі розділу покриття – основа ріст стовбчастих кристалів фази  $MeSi_2$  затруднений, оскільки в цій зоні відбувається процес утворення нової фази, що супроводжується збільшенням об'єму і кристали відчувають фазовий самонаклеп, який приводить до їх розорієнтації і дробленню, що підтверджується дослідженнями.

Дослідження процесу силіціювання в суміші з високим вмістом кремнію показало, що спостерігається погіршення якості покриття. Можна припустити, що це зв'язано з впливом домішок, які є в насичуючому середовищі і під час силіціювання одночасно з кремнієм дифундують у металеву основу. Під час силіціювання тугоплавких металів в суміші, що містить менше 40% кремнію, концентрація домішок насичуючому об'ємі мала і вони утворюють багатокомпонентний твердий розчин на основі фази  $MeSi_2$ . Це не викликає появи внутрішніх напружень у силіцидному покритті і порушення поверхневого шару не спостерігається. Збільшення вмісту кремнію (більше 80%) в суміші приводить до підвищення концентрації домішок у насичуючому середовищі, які в процесі силіціювання тугоплавких металів утворюють складні сполуки, внаслідок цього в покритті виникають зміни об'єму та поява внутрішніх напружень значної величини і в силіцидному шарі появляється значна кількість радіальних тріщин, що підтверджується результатами дослідів. Можна зробити висновок, що утворення тріщин в покритті залежить від концентрації домішок як в насичуючому середовищі, так і в тугоплавких металах.

Дослідження процесу силіціювання тугоплавких металів у порошковій суміші, яка містить кремній і фтористий натрій, дозволяє зробити висновок, що присутність домішок в насичуючому середовищі впливають на якість покриття, а домішки впровадження, що знаходяться в металевій основі підвищують ефективну енергію активації процесу формування силіцидного шару.

**Висновки.** Аналізуючи фундаментальні й актуальні шляхи підвищення жаростійкості елементів двигунів виготовлених із тугоплавких металів і їх сплавів встановлено, що ефективним дифузійним бар'єром є боридні фази тугоплавких металів, які забезпечують стабільність дифузійній частині багатокомпонентного покриття.

Вивчення властивостей боридних і силіцидних покриттів показало, що боридні фази по відношенню до металевої основи більш стабільні, ніж силіцидні. Завдяки утворенню на границі боридних і силіцидних шарів силікоборидних фаз забезпечується висока стабільність боросиліцидного покриття.

Присутність у металевій основі деталей домішок проникнення приводить до погіршення захисних властивостей оксидної плівки дифузійного покриття, внаслідок чого погіршується його довговічність. Запропоновано механізм перенесення домішок проникнення із глибини металу на границю з порошковим середовищем. Одержані технологічні параметри процесу насичення елементів двигунів виготовлених із

тугоплавких металів бором і кремнієм дозволяють сформувати на тугоплавких металах дифузійне покриття з дрібнозернистою структурою, а для забезпечення високих захисних властивостей необхідне проведення подальших досліджень щодо формування нашарованої частини покриття.

## Список літератури

1. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2016. 188 с.
2. Кицкай Л.І. Формування багатшарового покриття на ніобії і танталі для захисту їх від окислення : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”. Київ, 2020. 16 с.
3. Погребова І.С., Янцевич К.В. Вплив високотемпературного окислення на корозійну стійкість хромосиліційованої сталі 45 І. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2021. Вип. 6. С. 92-97.
4. Буряк М. В. Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів / М. В. Буряк та ін. *Вісник машинобудування та транспорту: зб. наук*. 2022. Том 15, №1. С. 11-16.
5. Електролітичні покриття сплавами заліза для зміцнення і захисту поверхні: монографія / Г.В. Каракуркчі, М.В. Ведь, І.Ю. Єрмоленко, М.Д. Сахненко. Харків : ФОП Панов А.Н., 2017 . 200 с.
6. Ковбашин В.І., Бочар І. Склад суміші для силіціювання та борування виробів із карбиду кремнію та дисиліциду молібдену . *Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (Тернопіль, 10-11 листопада 2022 р.)* . Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. С. 18–20.
7. Rozum R.I., Buriak M. V., Zakharchuk O. P. Innovative engines in the history of automobile building. *Modern engineering and innovative technologies*. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany) 2021. Issue 18. Part 2. P. 64 – 67.

## References

1. Afanasieva O.V. (2016). *Materialoznavstvo ta konstruktsiini materialy [Materials science and construction materials]*. Kharkiv: KhNURE [in Ukrainian].
2. Kytskai, L.I. (2020). Formuvannia bahatosharovoho pokryttia na niobii i tantali dlia zakhystu yikh vid okyslennia [Formation of a multilayer coating on niobium and tantalum to protect them from oxidation autoref]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
3. Pohrebova, I.S. & Yantsevych, K.V. (2021). Vplyv vysokotemperaturnoho okyslennia na koroziiu stiikist khromosylitsiiiovanoi stali 45 I. [The effect of high-temperature oxidation on the corrosion resistance of chromosilicized steel 45 I]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky KrNU, Issue 6, 92-97* [in Ukrainian].
4. Buriak M. V. R. I. Rozum, O. P. Zakharchuk, P. B. Prohni, P. V. Popovych, O. S. Shevchuk (2022) . Otsinka dovhovichnosti metalokonstruktii avtotransportnykh zasobiv [Assessment of durability of metal structures of motor vehicles]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu : zb. nauk. st. – Bulletin of mechanical engineering and transport: coll. of science, Vol. (15), 11-16* [in Ukrainian].
5. Karakurkchi, H.V., Ved, M.V., Yermolenko, I.Iu. & Sakhnenko, M.D. (2017). *Elektrolitychni pokryttia splavamy zaliza dlia zmitsnennia i zakhystu poverkhni [Electrolytic coatings with iron alloys to strengthen and protect the surface]* . Kharkiv : FOP Panov A.N. [in Ukrainian].
6. Kovbashyn, V.I. & Bochar, I. (2022). Sklad sumishi dlia sylitsiiuvannia ta boruvannia vyrobiv iz karbidu kremniiu ta dysylitsydu molibdeni [The composition of the mixture for silicification and boronization of products made of silicon carbide and molybdenum disilicide] . *Strength and durability of modern materials and structures : Mizhnarodna naukovu-tekhnichna konferentsia (10-11 lystopada 2022 roku) – International science and technology conf. (pp. 18-20)*. Т. : FOP Palianytsia V. A. [in Ukrainian].
7. Rozum, R.I., Buriak, M. V. & Zakharchuk, O.P. (2021). Innovative engines in the history of automobile building. *Modern engineering and innovative technologies*. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany). *Issue 18. Part 2, P. 64 – 67* [in English].

**Yuriy Dzyadykevych**, Assoc. Prof., DSc., **Olena Zakharchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Pavlo Popovich** Prof., DSc., **Ruslan Rozum**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mukola Buryak**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*  
**Viktor Shevchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Lviv National University of Nature Management, Dublyany, Ukraine*

## The Use of Boride and Silicide Coatings in Fire engines: Technological Aspect

The main regularities of the process of forming on refractory metals the single-phase, multi-phase, multi-layer composite coatings with high heat resistance and durability are examined in the article.

A study of boride coating on refractory metals was conducted, which showed that a single-phase coating is formed on metals that possesses good adhesion to the base. Based on the results of X-ray phase and micro-X-ray spectral methods of analysis, the formation of a monoboride phase on molybdenum and tungsten and a boride phase on niobium and tantalum was revealed. A study of the effect of temperature on the process of diffusion silicification of refractory metals was carried out, which showed that in the range of 950–1100 °C, a single-phase coating is formed, which consists of disilicides of MeSi<sub>2</sub> metals. A further increase in the temperature of the saturation process was found to lead to a sharp increase in the thickness of the silicide layer. It was proved that an effective diffusion barrier is the boride phases of refractory metals, which ensure the stability of the diffusion part of the multicomponent coating. The boride phases were determined to be more stable than silicide phases in relation to the metal base. Due to the formation of silicoboride phases at the border of boride and silicide layers, high stability of the borosilicide coating is ensured. The presence of penetrating impurities in the metal matrix leads to poor protection of the oxide film of the diffusion coating and, as a result, to low durability. A mechanism for the transfer of penetrating impurities from the depth of the metal to the boundary of the powder medium is proposed.

The obtained borosilicate-saturated metal technological parameters allow forming a diffusion coating with a fine-grained structure on refractory metals. To ensure high protective characteristics, the formation of the layered part of the coating should be further researched.

**engines, metal silicification process, metal boronization process, diffuse layer**

*Одержано (Received) 27.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

UDC 629.083

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.159-166](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.159-166)

**Andrii Molodan**, Prof., DSc., **Yevhen Dubinin**, Prof., DSc., **Oleksandr Polyanskyi**, Prof., DSc., **Mykola Potapov**, Assoc. Prof., PhD tech sci., **Maksim Krasnokutskyi**, post-graduate  
*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*  
*e-mail: tmirm@ukr.net*

**Oleg Pushkarenko**, post-graduate  
*State University of Biotechnology, Kharkiv, Ukraine*  
*e-mail: oleggranit10011987@ukr.net*

## Method of Engine Energy Indicators Estimating when the Cylinders are Disconnected in the Loaded Mode of Operation

Considered modes engine load operations: 1 – test of the original engine; 2 – test with disconnection of four cylinders by stopping the fuel supply; 3 – test with disconnection of four cylinders with simultaneous cessation of fuel supply and absence of pumping losses of the cylinder-piston group (CPG) in the disconnected cylinders.

The feasibility of using the method of disconnecting a part of the working cylinders of the engine, saving fuel at load modes of no more than 70% of the total and with a further increase in the effective power of the engine load, the time consumption of fuel becomes higher than in the variant without disconnection of the cylinders, has been proven.

**engine, energy parameters, cylinder shutdown, engine load, pumping losses**

© Andrii Molodan, Yevhen Dubinin, Oleksandr Polyanskyi, Mykola Potapov, Maksim Krasnokutskyi, Oleg Pushkarenko, 2023

**Formulation of the problem.** The efficiency of piston engines largely depends on their operating modes [1]. If at nominal or close to it economic indicators usually reach optimal values or close to them, then at partial loads and idling the fuel efficiency of diesel engines can noticeably deteriorate. At the same time, in the operational modes of most vehicles, idling modes and light loads make up a significant share [2].

Every year, the fleet of cars and trucks, road construction, agricultural and other machinery equipped with auto-tractor engines that consume a significant amount of fuel is increasing, in connection with this, the problem of economical use of its resources arises.

**Analysis of recent research and publications.** The works of E. Chudakov, V. Boltinsky, V. Falkevich, L. Klymenko, D. Rubtsia, V. Arkhangelskyi, M. Lurie et al.

The analysis of publications showed that the solution to this problem was connected with the design of devices for cutting off the supply of fuel to diesel cylinders. Currently, work is underway to create entire systems and complexes with processor control on various types of diesel engines [3].

Many leading institutes of the country, as well as foreign companies (Ford, MTU, BMW, General Motors, Porsche, Mercedes-Benz, and others) conduct research in the field of engine cylinder shutdown for various purposes [4].

**Setting objectives.** The purpose of this study is to improve the performance of the engine in the load mode by substantiating the number of cylinder shutdowns and determining the energy parameters of its operation.

Achieving the set goal involves solving the following tasks:

- to determine the effect of disconnection of half of the cylinders of a diesel engine on its operating parameters under load;
- to determine the nature of the influence of pumping losses in the CPG when half of the cylinders are turned off on the energy performance of the diesel engine under load.

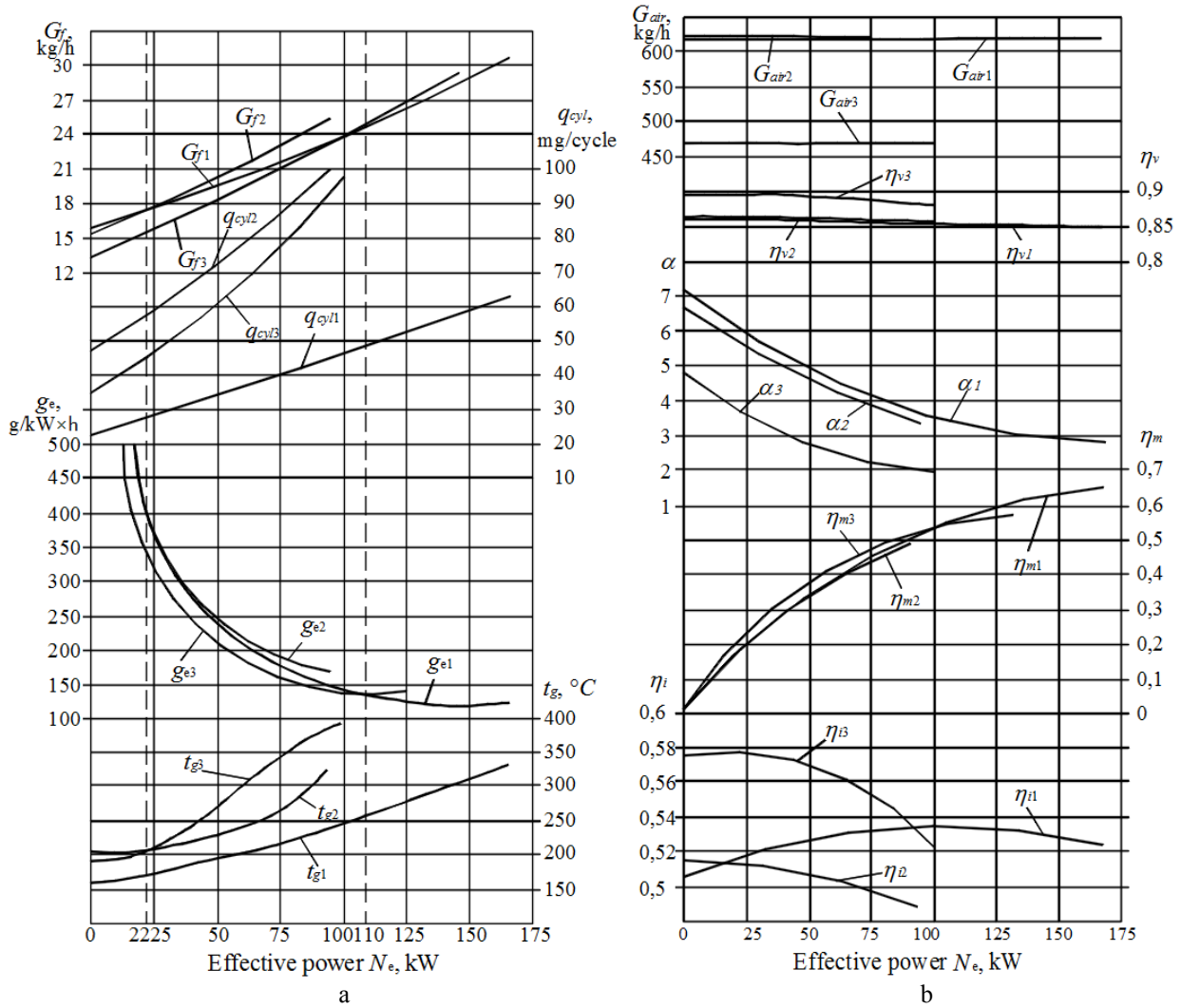
**Presenting main material.** Bench tests of the engine were carried out [5] in the conditions of KHARZ-110 and KHARZ-126 auto repair production in Kharkiv with the direct participation of the department "Technology of mechanical engineering and machine repair" of KhNADU. The brake stand was equipped with measuring devices and control equipment according to GOST 14846-81 [5] and included an electric balancing machine AKB 101-4 with the help of which the load was carried out.

The characteristics were taken according to three variants of tests at different engine crankshaft rotation frequencies:

- 1 – test of the original engine;
- 2 – test with disconnection of only fuel supply to 1, 4, 6 and 7 cylinders of the engine;
- 3 – test with the fuel supply cut off and the absence of pumping losses of the cylinder-piston group (CPG) in 1, 4, 6 and 7 disconnected engine cylinders.

It is known [6] that the load characteristic is the dependence of the specific fuel consumption and other indicators of engine operation on the effective power or on the average effective pressure at a constant crankshaft rotation frequency. Figures 1 a, b shows the results of research at the crankshaft rotation frequency  $n = 2600 \text{ min}^{-1}$

The hourly fuel consumption (Fig. 1 a) can be determined according to the dependence [7]



1 – with all working cylinders; 2 – when the fuel supply to 50% of the cylinders is cut off;  
 3 – with fuel cut-off in 50% of the cylinders and the absence of pumping cylinders in the CPG  
 a –  $G_f$  – hourly fuel consumption,  $q_{cyl}$  – cyclic fuel supply,  $g_e$  – specific effective fuel consumption,  
 $t_g = f(N_e)$  – exhaust gas temperature; b –  $G_{air}$  – actual air consumption,  
 $\eta_v$  – cylinder filling factor,  $\alpha$  – coefficient of excess air,  $\eta_m$  – mechanical efficiency,  
 $\eta_i = f(N_e)$  – indicator efficiency

Figure 1 –Load characteristics of a diesel engine ( $n = 2600 \text{ min}^{-1}$ )

Source: developed by the author

$$G_f = g_e \cdot N_e = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_e} \cdot \frac{P_e \cdot V_h \cdot i_{cyl}'' \cdot n}{30 \cdot \tau} = K \cdot \frac{P_e \cdot V_h \cdot i_{cyl}'' \cdot n}{\eta_e} = K \cdot \frac{(P_i - P_{ml}) \cdot V_h \cdot i_{cyl}'' \cdot n}{\eta_i \cdot \eta_m}, \text{ kg/h} \tag{1}$$

where  $K = \frac{3600}{H_u \cdot 30 \cdot \tau} = \frac{3600}{42,7 \cdot 30 \cdot 4} = 0,7$  – constant for this diesel engine;

$\tau = 4$  – the number of beats;

$H_u = 42,7$  – lower calorific value of diesel fuel, MJ/kg;

$g_e$  – specific effective fuel consumption, g/kWh;

$N_e$  – effective power, kW;  
 $P_e$  – average effective pressure, MPa;  
 $P_i$  – average indicator pressure, MPa;  
 $P_{ml}$  – conventional pressure of mechanical losses, MPa;  
 $\eta_e$  – effective efficiency;  
 $\eta_i$  – indicator efficiency;  
 $\eta_m$  – mechanical efficiency;  
 $V_h$  – volume of one cylinder in liters;  
 $n$  – crankshaft rotation frequency,  $\text{min}^{-1}$ ;  
 $i_{cyl}^*$  – the number of working cylinders.

Hourly fuel consumption  $G_{f2}$  when only the fuel supply is turned off (option 2) compared to option 1, it is 7% less, in the power range from 0 to 22 kW, due to the improvement of the combustion process, and then it becomes more. When the fuel is turned off and there are no CPG pumping losses in the disconnected cylinders (option 3), the time consumption of fuel  $G_{f3}$  at low modes, the load decreases, compared to the first option, by 1.73 kg/h, or 21%, which is explained by the increase in indicator and mechanical efficiency, and the decrease in pumping losses in disconnected cylinders. With a further increase in effective power over 110 kW, the time consumption of fuel becomes higher than in option 1.

Cyclic fuel supply  $q_{cyl}$  (Fig. 1 a) can be determined by the dependence [7]

$$q_{cyl} = \frac{10^4 \cdot G_f \cdot \tau}{1,2 \cdot n \cdot i_{cyl}^*} = \frac{10^4 \cdot 4 \cdot G_f}{1,2 \cdot n \cdot i_{cyl}^*} = 3,3 \cdot 10^4 \cdot \frac{G_f}{i_{cyl}^* \cdot n}, \text{ mg/cycle.} \quad (2)$$

When the load changes at the nominal crankshaft rotation frequency ( $2600 \text{ min}^{-1}$ ) for all test options, the cyclic fuel supply increases, since  $G_f$  increases, and  $n = \text{const}$ .

The cyclic supply curve when only fuel is turned off (option 2) is higher than the initial one, this is explained by the fact that when turning off the fuel supply in the cylinders to maintain the engine shaft speed and load  $q_{cyl}$  was increased due to more pressure on the gas pedal.

Cyclic supply curve  $q_{cyl3}$  when fuel is turned off and pumping losses are eliminated in cylinders 1, 4, 6, and 7, it is located slightly lower, which is associated with a decrease in the power of mechanical losses by the amount of pumping losses in the four disconnected cylinders.

Specific effective fuel consumption  $g_e$  (Fig. 1a) with all variants of tests at low load modes, about  $1200\text{-}1400 \text{ min}^{-1}$  equals infinity, since  $\eta_m \approx 0$ . As the load increases  $g_e$  sharply decreases, as the mechanical and indicator efficiency increases [7]

$$g_e = \frac{G_f \cdot 10^3}{N_e} = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_m \cdot \eta_i}, \text{ g/kW}\cdot\text{h.} \quad (3)$$

In the second version of the tests, compared to the original one,  $g_e$  does not change, and when the fuel is turned off and pump losses are eliminated, the specific effective fuel consumption  $g_{e3}$  the lowest due to an increase in indicator and mechanical efficiency (Fig. 1 b).

Exhaust gas temperature  $t_g$  (Fig. 1 a) increases with increasing load in all test options, and according to the second and third options  $t_g$  higher than the initial one, as the amount of released heat changes due to an increase in the cyclic supply of fuel. In the second option, the temperature is lower than in the third due to the mixing of exhaust gases with the air coming out of idle cylinders.

Actual air consumption  $G_{air}$  (Fig. 1 b) in all test options with increasing load changes very little. This is caused by a slight decrease in air density due to heating in the intake manifold. When turning off only the fuel supply  $G_{air2}$  practically does not change compared to the original option, but with the third option  $G_{air3}$  almost twice as low as in the first and second options due to disconnection of the supply of fresh charge to cylinders 1, 4, 6 and 7.

Fill factor  $\eta_v = G_{air}/G_{Tair}$  (Fig. 1 b) practically does not change with all three options, since the ratio of the actual and theoretical amount of air does not change significantly.

Excess air factor  $\alpha$  (Fig. 1 b) decreases due to a slight decrease in actual air consumption and an increase in hourly fuel consumption (Fig. 1 a) [7]

$$\alpha = \frac{G_{air}}{14,7 \cdot G_f} \quad (4)$$

When disconnecting only the fuel supply (option 2)  $\alpha_2$  practically does not change. When the fuel supply is turned off and the pumping losses are eliminated, the coefficient of excess air  $\alpha_3$  lower, which is associated with a significant decrease in air flow (due to the installation of a bypass valve in the disconnected engine cylinder), although fuel consumption also decreases, especially in the load operating mode with a rotation frequency of 1200-1400  $\text{min}^{-1}$ .

Mechanical efficiency  $\eta_m$  (Fig. 1 b) in all test options increases due to an increase in the indicator power, since the power of mechanical losses is assumed to be independent of the load [7]

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_{in}} = 1 - \frac{N_{ml}}{N_{in}}, \quad (5)$$

where  $N_{in}$  – indicator power, kW;

$N_{ml}$  – power of mechanical losses, kW.

With all options  $\eta_m$  changes in the same way, since the power of mechanical losses [8], which depends mainly on the frequency of rotation of the crankshaft, remains constant. According to the third option, the mechanical efficiency is higher to a greater extent due to a reduction in the power of mechanical losses (reduction in pumping losses).

Indicator efficiency  $\eta_i$  (Fig. 1 b), which characterizes the perfection of the combustion process, first increases and then decreases. Reduction  $\eta_i$  at low loads, it is explained by the deterioration of mixture formation caused by low temperature (deterioration of fuel evaporation), impaired atomization and possible fuel injection failures (due to insignificant cyclic fuel supply); reduction  $\eta_i$  at nominal loads is explained mainly by the deterioration of the combustion process due to a lack of air, which is also evidenced by the coefficient of excess air:  $\alpha$  below 1.4 leads to incomplete combustion of fuel, increased smoke of exhaust gases. Incomplete combustion is accompanied by the prolongation of the combustion process according to the expansion stroke and, as a result, overheating of the parts of the cylinder-piston group, coking of the fuel and excessive soot deposition.

Figure 2 shows fuel economy depending on engine crankshaft speed at different loads.

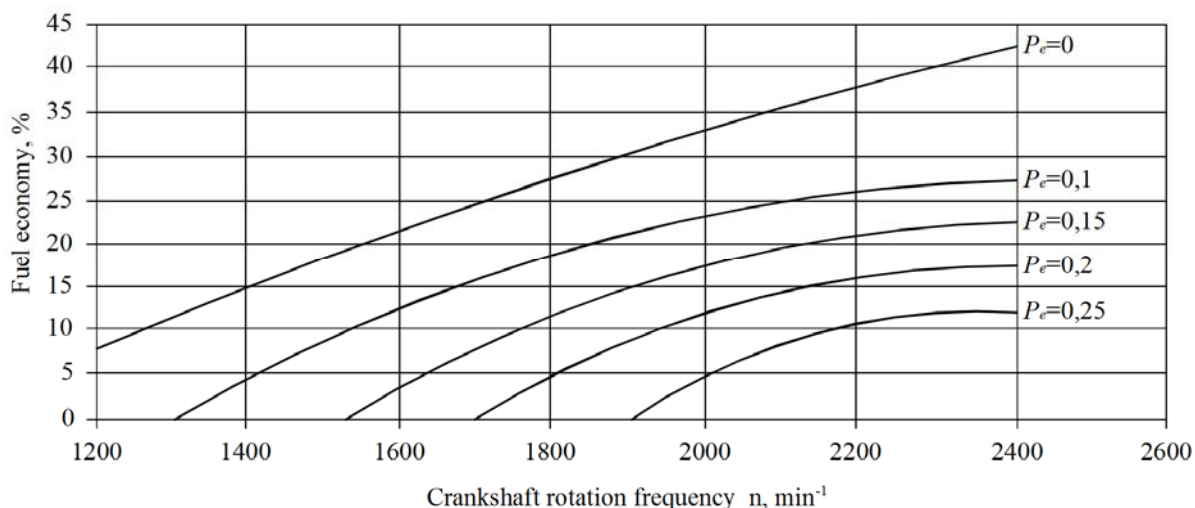


Figure 2 – Fuel economy depending on the speed of rotation crankshaft under different loads

Source: developed by the author

As can be seen from Figure 2, the maximum fuel economy occurs at a low load mode at the crankshaft rotation frequency  $n = 1400 \text{ min}^{-1}$  ( $P = 0$ ), moreover, the greater the frequency of rotation of the engine shaft, the less the economy, at the nominal frequency the fuel economy  $\Delta G_f$  reaches 1.73 kg/h. As the load increases, fuel economy decreases and at  $P_e = 0,25$  ( $n = 2600 \text{ min}^{-1}$ ) becomes minimal – 0.39 kg/h, and with a further increase in the load, fuel consumption occurs.

One of the measures to ensure the dynamic properties of wheeled vehicles and power on their drive wheels while reducing fuel consumption is the operation of the automobile and tractor engine in the mode of disconnection of the cylinders. Insufficient attention is paid to this problem, there are no studies of the load process and the method of control of vehicle engine systems, which affect the reliability and functional stability of the wheeled machine, and methods of diagnosis.

The work is aimed at solving the current scientific and practical problem of ensuring the reliability and functional stability of wheeled vehicles in the mode of disconnection of the cylinders. An effective method of further improving the fuel efficiency of the vehicle engine when disconnecting part of the cylinders at low loads and speeds can be the transition to neural networks controlled by the fuel supply system, which have feedback using the sensors of the standard on-board system. The use of an artificial neural network also allows to improve the latest technologies for monitoring and diagnosing the technical condition of the elements of wheeled vehicles, in particular internal combustion engines.

The combination of the method of disconnecting part of the cylinders and the latest technologies for monitoring and diagnosing the technical condition of the elements of wheeled vehicles will provide the required level of technical characteristics, which determines the relevance and prospects.

### Conclusions.

1. The criteria are substantiated and a method of evaluating the energy indicators of the engine when the cylinders are disconnected in the loaded mode of operation is proposed. The following modes are considered engine load operations: 1 – test of the original engine; 2 – test with disconnection of four cylinders by stopping the fuel supply; 3 – test with



disconnection of four cylinders with simultaneous cessation of fuel supply and absence of pumping losses of the cylinder-piston group (CPG) in the disconnected cylinders.

2. It was established that when the engine is operating under load, the hourly fuel consumption when only the fuel supply is turned off is 7-0% less, in the power range from 0 to 22 kW, due to the improvement of the combustion process, and then increases.

3. It was also established that when the fuel is turned off and CPG pumping losses are eliminated in the disconnected cylinders, the time consumption of fuel at low load modes decreases, compared to the first version of work, by 1.73 kg/h, or 21%, which is explained by the increase in indicator and mechanical efficiency, the decrease in pumping losses in disconnected cylinders.

4. The feasibility of using the method of disconnecting a part of the working cylinders of the engine, saving fuel at load modes of no more than 70% of the total and with a further increase in the effective power of the engine load, the time consumption of fuel becomes higher than in the variant without disconnection of the cylinders, has been proven.

## List of references

1. Полянський О.С., Молодан А.О., Власенко О.В. Підвищення паливної економічності колісних машин відключенням частини циліндрів двигуна . *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 9. С. 57-61.
2. Polyanskii A., Molodan A., Potapov N. Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders . *Транспорт, екологія – устойчиво развитие*: сб. докл. XXVI научн.-техн. конф. с межд. участ. Варна: Технически университет, 2020, 8-10 октября. С. 132-137.
3. Капралов Б.И., Красильников А.С., Мазинг М.В. Оптимизация параметров топливной аппаратуры дизеля грузового автомобиля . *Двигателестроение*. 1987. №5. С. 20-22.
4. Драгунов, Г.Д., Медведев А.Н. Метод оценки эффективности отключения цилиндров автомобильного дизеля . *Двигателестроение*. 2007. № 4(230). С. 20-22.
5. Молодан А.А. Оценка технического состояния цилиндро-поршневой группы двигателя с учетом разделения потоков газов, проходящих в картере: дис. ... канд. техн. наук. Харьков, ХНАДУ, 2011. 184 с.
6. Молодан А.О. Наукові основи забезпечення надійності і функціональної стабільності колісних машин в режимі відключення частини циліндрів: дис. ... д-р техн. наук.: 05.22.20 / Харківський національний автомобільно-дорожній ун-т . Харків, 2021. 387 с.
7. Molodan A., Polyanskyi O., Potapov M.. Change of power and mechanical losses of a wheel vehicle engine with cylinders cutout . *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2018. Vol.20. No.1. P. 99-103.
8. Куций П.В. Поліпшення експлуатаційних показників транспортних засобів в неусталених режимах оптимізацією способу регулювання дизелів: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.20 / Національний транспортний ун-т. Київ, 2015. 206 с.

## References

1. Polyansky, O.S., Molodan, A.O. & Vlasenko O.V. (2017). Improving fuel economy wheeled vehicles disconnection of cylinder [Pidvyschennia palyvnoi ekonomichnosti kolisnykh mashyn vidkliuchenniam chastyny tsylindriv dvyhuna]. *Tekhnichnyj servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes : Scientific journal*, 9, 57-61 [in Ukrainian].
2. Polyanskii, A., Molodan, A. & Potapov N. (2020). Cause and investigative failure analysis in nominal engine operation and partial disabling of cylinders . *Transport, ecology - sustainable development : XXVI nauchno-tekhnycheska konferentsiya s mezhdunarodno uchastye (2020, 8-10 Oktomvry) – Sat. report XXVI Scientific&Technical. Conf. From Int. Participation* (Pp.132-137). Varna: Tekhnichesky unyversytet [in English].
3. Kapralov, B.I., Krasil'nikov, A.S. & Mazing, M.V. (1987). Optimizacija parametrov toplivnoj apparatury dizelja gruzovogo avtomobilja [Optimization of the parameters of the fuel equipment of a truck diesel engine]. *Dvigatelistroenie – Engine building*, 5, 20-22 [in Russian].

4. Dragunov, G.D. & Medvedev, A.N. (2007). Metod ocenki jeffektivnosti otkljuchenija cilindrov avtomobil'nogo dizelja [Method for evaluating the efficiency of turning off the cylinders of an automobile diesel engine]. *Dvigatelistroenie – Engine building*, 4(230), 20-22. [in Russian].
5. Molodan, A.A. (2011). Otsenka tekhnicheskogo sostoianiya tsylindro-porshnevoi hruppy dvyhatelia s uchetom razdeleniya potokov hazov, prokhodiashchyykh v karter [Assessment of the technical condition of the cylinder-piston group of the engine, taking into account the separation of gas flows passing into the crankcase]. *Candidate's thesis*. Kharkiv, KhNADU [in Ukrainian].
6. Molodan, A.O. (2021). Naukovi osnovy zabezpechennia nadiinosti i funktsionalnoi stabilitii kolisnykh mashyn v rezhymi vidkliuchennia chastyny tsylindriv [Scientific bases of ensuring the reliability and functional stability of wheeled vehicles in the mode of disconnection of part of the cylinders]. *Doctor's thesis*. Kharkiv, KhNADU [in Ukrainian].
7. Molodan, A., Polyanskyi, O. & Potapov, M. (2018). Change of power and mechanical losses of a wheel vehicle engine with cylinders cutout. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.20, No. 1*, 99-103 [in English].
8. Kutsyi, P.V. (2015). Polipshennia ekspluatatsiinykh pokaznykiv transportnykh zasobiv v neustalenykh rezhymakh optymizatsiiei sposobu rehuliuвання dyzeliv [Improvement of operational indicators of vehicles in unstable modes by optimizing the method of regulating diesel engines]. *Candidate's thesis*. Science Kyiv: NTU [in Ukrainian].

**А.О. Молодан**, проф., д-р техн. наук, **Є.О. Дубінін**, проф., д-р техн. наук, **О.С. Полянський**, проф., д-р техн. наук, **М.М. Потапов**, доц., канд. техн. наук, **М.В. Краснокутський**, асп.  
*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна*

**О.Ю. Пушкарєнко**, асп.

*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна*

### **Метод оцінки енергетичних показників двигуна при відключенні циліндрів в навантаженому режимі роботи**

Метою даного дослідження є підвищення ефективності роботи двигуна в режимі навантаження шляхом обґрунтування кількості відключень циліндра та визначення енергетичних параметрів його роботи. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань: визначити вплив відключення половини циліндрів дизеля на параметри його роботи під навантаженням; визначити характер впливу насосних втрат в ЦПП при вимкнених половині циліндрів на енергетичні характеристики дизеля під навантаженням.

Ефективність поршневого двигуна значною мірою залежить від режимів їх роботи. Якщо при номінальних або близьких до них економічних показниках зазвичай досягають оптимальних або близьких до них значень, то при часткових навантаженнях і холостому ході паливна ефективність дизелів може помітно погіршуватися. При цьому в режимах роботи більшості транспортних засобів значну частку складають режими холостого ходу та невеликі навантаження. В роботі розглянуті режими роботи навантаження двигуна: 1 – випробування вихідного двигуна; 2 – випробування з відключенням чотирьох циліндрів припиненням подачі палива; 3 – випробування з відключенням чотирьох циліндрів одночасним припиненням подачі палива і відсутністю насосних втрат циліндро-поршневої групи (ЦПП) у відключених циліндрах.

Доведено про доцільність використання способу відключення частини працюючих циліндрів двигуна, економії палива в режимах навантажень не більш як 70% від загального та при подальшому збільшенні ефективної потужності навантаження двигуна часова витрата палива стає вище, ніж у варіанті без відключення циліндрів.

**двигун, енергетичні параметри, відключення циліндрів, навантаження двигуна, насосні втрати**

*Одержано (Received) 06.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**В.В. Аулін**, проф., д-р техн. наук, **Д.В. Голуб**, доц., канд. техн. наук  
*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,  
Україна*  
e-mail: [AulinVV@gmail.com](mailto:AulinVV@gmail.com), [Dimchik529@gmail.com](mailto:Dimchik529@gmail.com)

## Обґрунтування механізму функціонування мехатронної системи склоочищення автомобіля

В статті обґрунтовано чотириохланковий механізм мехатронної системи склоочищення автомобіля на основі аналізу параметрів закономірності руху щітки по склу і визначення можливості управління ними через мехатронні інтерфейси даної системи. Представлено математичну модель механізму склоочищення в середовищі Matlab/Simulink та проведений його кінематичний синтез.  
**мехатронна система, моделювання, механізм склоочищення, автомобіль, щітки, гумовий елемент, передатний механізм, кут відхилення**

**Постановка проблеми.** Зі збільшенням швидкостей та щільності руху автомобілів на дорогах нерідко виникають ситуації, коли ручне управління режимом роботи склоочисників значно підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій транспортного процесу відволікаючи водія [1]. Режими роботи даних пристроїв жорстко регламентовані, що є не зовсім економічно ефективним і призводить до передчасного зносу частин механізмів, зокрема гумових елементів склоочисника. В зв'язку з цим і були розроблені мікропроцесорні системи автоматичного управління склоочисником, в яких роль сенсора виконував датчик дощу, яким на сьогоднішній день обладнані практично всі автомобілі середнього і вищого цінового класу.

Більшість подібного роду систем, засновані на використанні як датчиків оптичних систем, практично не здатні відрізнити сухий бруд на склі від забрудненої води, що призводить до перевантаження склоочисників у разі попадання на скло усохлого важкорозчинного бруду [2]. Зазначимо, що практично усі оптичні системи контролюють обмежену площу вітрового скла, що призводить до неадекватної роботи системи у разі локального забруднення, збільшення ж числа датчиків на склі погіршує огляд водієві і ускладнює систему регулювання, що збільшує її вартість. Саме ці чинники роблять актуальними дослідження в області дослідження автомобільних мехатронних систем склоочищення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз відомостей з літератури і публікацій як по проблемах створення систем склоочищення, так і по загальних проблемах моделювання і проектування автомобільних мехатронних систем [3-6], показав, що такий підхід до підбору джерел визначається тим, що дана система, безумовно маючи усі ознаки мехатронної, ніколи не описувалася в термінах мехатроніки.

Оскільки в якості виконавчого механізму системи управління склоочисником використовуються різноманітні щітки, то основні функції щітки полягають в рівномірному розподілі сили притискання до скла через систему важелів і опорі спливанню при русі по склу [7]. Важливу роль в забезпеченні чистоти скла і комфорту руху відіграє структура і властивості матеріалу гумового елемента щітки склоочисника.

Датчиками включення для цієї системи можуть виступати оптичні або ємнісні датчики дощу. Зважаючи на вузькість робочих частот регулювання коливань щіток склоочисника можливості їх використання для інтелектуального управління системою обмежені. Також в системі використовуються кінцеві датчики положення щітки і сенсори контролю режиму роботи двигуна [8].

Протягом останніх 10 років було опубліковано велику кількість праць, в яких у якості основних напрямів підвищення ефективності функціонування мехатронної системи склоочиснення автомобілів розглядається вдосконалення системи управління і алгоритмів її роботи, а також поліпшення властивостей гумового елемента щітки склоочисника [9, 10]. Набагато менша увага приділяється дослідженню впливу на якість роботи системи передатного механізму. Дослідження в цій області направлені, в основному, на зміну геометрії області очищення вітрового скла [11]. Питання ж впливу конструктивних параметрів передатного механізму на якість очищення скла практично не розглядалися. В той же час саме передатний механізм визначає закон руху щітки по скла, що робить прямий вплив на процеси напіврідного тертя щітки по скла, а відповідно і на якість очищення скла і знос елементів щіток.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є обґрунтування механізму склоочиснення автомобілів на основі аналізу параметрів закономірності руху щітки по скла і визначення можливості управління ними через мехатронні інтерфейси даної системи.

**Виклад основного матеріалу.** Зв'язок структури мехатронної системи управління склоочисниками із суміжними підсистемами забезпечення комфорту і безпеки автомобіля представлено на рис. 1.



Рисунок 1 – Зв'язок системи склоочиснення з підсистемами забезпечення комфорту і безпеки автомобіля

*Джерело: розроблено авторами*

Система управління склоочисниками є мехатронною по своїй структурі і принципам функціонування. Її структура показана на рис. 2.

ІС – силовий (енергетичний) інтерфейс, який перетворює програму управління в сигнали, необхідні і зрозумілі приводу;

ІМ – механічний інтерфейс, який перетворює силову інформацію з приводу в механічний рух виконавчого механізму;

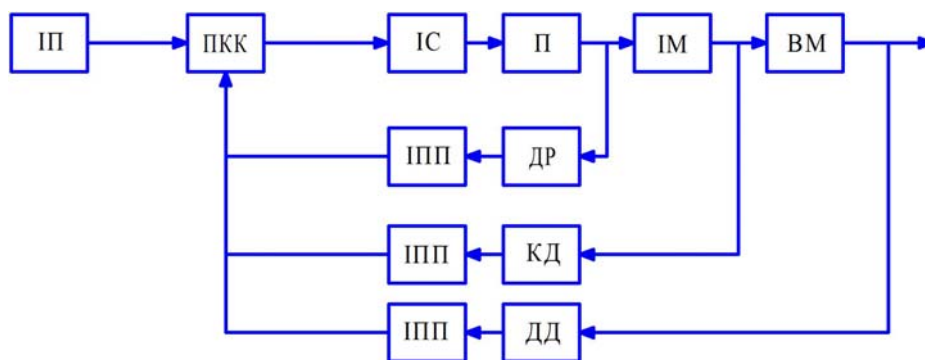


Рисунок 2 – Структура мехатронної системи склоочиснення автомобіля

Джерело: розроблено авторами

ІПП – інформаційно-програмний перетворювач, за допомогою якого здійснюється корекція програми управління для необхідної корекції закону руху;

ПКК – пристрій комп'ютерного керування, за допомогою програми якого здійснюється визначення сигналів керування для приводу склоочисника і візуалізації режиму роботи для водія;

ВМ – виконавчий механізм;

П – привід;

ДР – датчик руху;

ДД – датчик дощу;

КД – контроль двигуна.

Можна бачити, що передатний механізм склоочисника є чотириланковим. Проведений аналіз і синтез чотириланкового передатного механізму склоочисника автомобіля, каже, що він відіграє визначальну роль у формуванні закону руху щітки по склу. Унікальною особливістю роботи цього механізму є фактична відсутність режиму холостого ходу. Вона є значно важливою при оптимізації кінематичних і динамічних параметрів механізму, в першу чергу коефіцієнта середньої швидкості прямого (зворотного) ходу.

Основою для розробки механізму склоочисника є чотириланковий механізм. Кінематичний аналіз механізму полягає у визначенні руху ланок механізму по заданому руху їх початкових положень. Основними завданнями кінематичного аналізу є визначення положень ланок, включаючи і визначення траєкторій точок ланок, а також визначення швидкостей і прискорень. При вирішенні цих завдань вважаються відомими закономірності руху початкових ланок та кінематична структура механізму, тобто візуальна структурна схема механізму із зазначенням розмірів, необхідних для кінематичного аналізу.

Основною метою дослідження є обґрунтування відповідності передбачуваних кінематичних характеристик чотириланкових механізмів, заданих при їх синтезі, і при моделюванні, а також отримання динамічних характеристик механізму, які використовуються при моделюванні коливальних процесів гумового елемента щітки при русі її по склу. Середовищем моделювання вибрано пакет Matlab/Simulink розширення системи для фізичного моделювання. В результаті моделювання визначалися періоди повних коливань для прямого (зворотного) ходу, по яких визначали відношення середніх швидкостей механізмів. Результат, отриманий для системи з меншим кутом розмаху забезпечує велику точність коливання і краще співвідношення середньої швидкості прямого (зворотного) ходу. Крім того, такий механізм у меншій мірі залежить від технологічних похибок виготовлення деталей. В

той же час механізм з великим кутом розмаху має найпривабливіші кінематичні характеристики, мінімізуючи періоди руху з малою швидкістю, що знижує небезпеку виникнення автоколивальних процесів.

Для двох систем, працюючих на один кут розмаху щітки менше навантаження на опори здійснює механізм із співвідношенням середніх швидкостей прямого (зворотного) ходу ближчим до 1. Окрім переваг, пов'язаних з роботою механізму, режим роботи із співвідношенням середніх швидкостей близьким до 1 є більш вигідний з точки зору зносу робочих кромek гумового елемента склоочисника.

Проведений аналіз процесу руху щітки по склу показав, що окрім кінематичних характеристик механізму на якість роботи системи склоочиснення здійснюють значний вплив автоколивальні процеси гумового елемента щітки склоочисника. В якості спрощень для розрахунку прийняті наступні положення: верхня частина гумового елемента склоочисника і його губка вважаються абсолютно твердими тілами; шийка склоочисника вважається шарніром, на який закріплена губка гумового елемента склоочисника.

Пружність шийки враховується введенням кутової пружини, пружність якої прямо пропорційна куту повороту губки гумового елемента склоочисника. Через затиск на верхню частину гумового елемента і через неї на шарнір діє сила притиснення щітки склоочисника. У загальному випадку вона залежить від конструкції щітки склоочисника, наявності спойлера та інших факторів.

При русі з невеликою швидкістю ця сила визначається пружними властивостями притискної пружини щітки. В процесі розгону зі швидкістю більшою за 100 км/год починає великий вплив здійснювати сила аеродинамічного опору руху. Через затиск на верхню частину гумового елемента склоочисника і шарнір діє рушійна сила, яка визначається крутним моментом на вихідному валу мотор-редуктора склоочисника. У точці дотику губки із склом на неї діє сила опору скла, яку можна розкласти на дві складові: силу нормальної реакції, що чинить опір тиску притиснення, спрямовану вертикально і рівну по модулю силі притиснення щітки до скла і силу тертя, в загальному випадку залежну від властивостей скла і швидкості переміщення щітки по склу.

Диференціальне рівняння кутових коливань губки склоочисника відносно шарніра, отримане згідно з рівнянням Лагранжа, має вигляд.

$$J \cdot \ddot{\varphi} = -\mu_e \cdot \dot{\varphi} - c_e \cdot \varphi + F_{mp} \cdot (H \cdot \cos \varphi + h) + N \cdot H \cdot \sin \varphi + F_{ру} \cdot L_M, \quad (1)$$

де  $J$  – момент інерції губки склоочисника;

$\varphi$  – кут відхилення губки гумового елемента від вертикалі;

$c_e$  – еквівалентна пружність шийки склоочисника;

$\mu_e$  – еквівалентна в'язка пружність шийки склоочисника;

$H, h$  – висота губки і шийки відповідно;

$L_M$  – висота закріпленої в утримувачі частини гумового елемента;

$F_{ру}$  – рушійна сила;

$F_{mp}$  – сила тертя;

$N$  – сила нормальної реакції опори при русі.

Сила тертя гумового елемента по склу включає як сухе, так і вологе тертя і в першому наближенні дорівнює:

$$F_{mp} = \mu \cdot \omega + F_{cmp} \cdot \text{sign}(\omega), \quad (2)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт вологого тертя щітки по склу;

$F_{cmp}$  – модуль сухого тертя;

$\omega$  – кутова швидкість руху щітки по склу.

Найважливішим чинником фактором, що визначає якість очищення скла є жорсткісні і демпфуючі властивості матеріалу гумового елемента склоочисника. У диференціальному рівнянні (1) вони визначають коефіцієнти зворотних зв'язків по куту і кутовій швидкості переміщення гумового елемента, причому абсолютна величина відхилення визначається жорсткісними параметрами матеріалу гумового елемента, а вид перехідного процесу – демпфуючими. Відмітимо, що підвищення демпфуючого коефіцієнта дозволяє добитися зникнення коливальних перехідних процесів. Подальше збільшення цього відношення призводить до згладжування графіку, зниження піків перерегулювання, пов'язаних з кінематичними властивостями передатного чотириланкового механізму.

При роботі щітки з малим зносом автоколивальні процеси можуть виникати через вплив надмірної сили притиснення і при роботі в режимі сухого тертя. Мала сила притиснення щітки до скла також недопустима завдяки нездатності обмежувати амплітуду гідродинамічних збурень при роботі щітки зі значним шаром води на склі. Надмірне притискання щітки до скла призводить до підвищення зносу гумового елемента і при великих значеннях жорсткості пружини може привести до виникнення візуально помітних автоколивальних.

Режим сухого тертя найбільш несприятливий для системи склоочищення, проте виникнення близьких до нього за характеристиками режимів неминує при роботі в умовах низьких температурах і попаданні на скло бруду і пилу, або при роботі в переривчастому режимі при слабкому дощі. На підставі аналізу моделі щітки при невеликому шарі води на склі можна зробити висновки про те, що незношена щітка за рахунок демпфуючих властивостей матеріалу здатна згладжувати фрикційні автоколивання, забезпечуючи прийнятну якість очищення. Візуально помітні смуги можуть утворюватися в режимі сухого тертя на краях скла. З погіршенням властивостей гумового елемента при зносі ширина можливих областей автоколивальних розширюється. В процесі розгляду впливу гідродинамічного опору на закон руху щітки по склу, виявлено, що губка гумового елемента щітки склоочисника, спрямована під кутом  $45^\circ$  до скла утворює силу лобового опору її руху, яка матиме як горизонтальну, так і вертикальну складові, залежні від кута атаки губки гумового елемента щітки склоочисника.

Розглянувши сили, що діють на сектор гумового елемента, при русі його по склу, для одиничного відрізка гумового елемента отримано наступні рівняння руху, зв'язані з траєкторією руху по склу ( $x$ ) і вертикаллю до неї ( $y$ ):

$$m \cdot \ddot{x} = F_{px} - F_{on} \cdot \cos \alpha = m \cdot l \cdot \ddot{\varphi} - C_x \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot l^2 \cdot \varphi^2}{2} \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

$$m \cdot \ddot{y} = F_{py} - F_{on} \cdot \sin \alpha = -c \cdot y \cdot \frac{1}{l} + C_x \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot l^2 \cdot \varphi^2}{2} \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

де  $m$  – маса одиничного елемента гумової частини щітки;

$\alpha$  – кут атаки щітки;

$l$  – відстань від опори склоочисника до даного елемента;

$S$  – міделевий переріз гумового елемента;

$F_{np}$  – сила притискання щіток склоочисників;

$F_{on}$  – сила аеродинамічного опору руху;

$\varphi$  – кутове переміщення коромисла чотириланкового механізму;

$\rho$  – щільність рідини на склі;

$c$  – пружність притискної пружини.

Отримані рівняння дозволяють розглянути процеси спливання гумового елемента щітки при русі по склу, з можливими відхиленнями і затримкою в русі щітки. Зазначене викликано гідродинамічним опором різних шарів води при русі щітки по склу.

Аналіз результатів досліджень свідчить, що в нормальному режимі роботи гідроопір робить незначний вплив на роботу системи. За наявності на склі значної маси води при русі щітки по склу виникають області, на яких миттєві значення параметрів руху визначаються значною мірою саме дією гідроопору. При цьому критичні зони розташовані в областях низьких швидкостей, а саме старт - зупинка системи, і мають тенденцію до розширення у міру збільшення шару води на склі.

Розгляд процесу руху щітки по склу з урахуванням регенераційного ефекту показав, що режим роботи по сліду є однією з головних причин втрати системою стійкості, зниження якості очищення і підвищеного зносу гумового елемента щітки. Проведені дослідження показали, що робота системи здійснюється по сліду, що залишається попереднім робочим ходом і наявність такого зворотного зв'язку значно знижує вібростійку системи. Для різкого підвищення вібростійкої системи склоочисника і забезпечення її надійності на усіх режимах роботи можна досягти, розриваючи зворотний зв'язок по сліду.

Здійснити умовний розрив додаткового зворотного зв'язку із запізнюванням можна двома способами. Перший ґрунтується на закономірності руху щітки по склу, щоб зрушення по фазі між слідом і коливаннями гумового елемента щітки склоочисника, дорівнював нулю. Інший пропонується спосіб підвищення вібростійкої динамічної системи склоочисника заснований на частотному зміщенні спектру сліду відносно спектру коливань гумового елемента щітки склоочисника, що обумовлює його. Розглядаючи коливання, що виникають при русі щітки по склу, як суму незалежних гармонійних складових, отримаємо, що кожна гармонійна складова спектру коливань породжує одну гармонійну складову спектру сліду з довжиною хвилі  $l$ , що визначається співвідношенням між частотою коливань і швидкістю руху щітки по склу.

Якщо змінювати при кожному ході щітки миттєві значення кутової швидкості щітки склоочисника, то виявиться, що коливання гумового елемента щітки залишають на склі «слід» з довжиною хвилі  $l_i$ , відмінної від початкової довжини хвилі, залишеної на склі попереднім робочим ходом щітки.

Відомо, що в динамічній системі існує два види збурень: зміна налаштування  $y(t)$  або зовнішня дія  $f(t)$ . Передатні функції замкнутої системи по зовнішній дії дорівнюють:

$$W_f = \frac{x(t)}{f(t)} = \frac{W_{enc}}{1 + W_{pc}}, \quad (5)$$

де  $x(t)$  – вихідна величина (амплітуда коливань гумового елемента);

$f(t)$  – кінематична або силова зовнішня дія;

$W_{enc}$  – передатна функція еквівалентної пружної системи;

$W_{pc}$  – передатна функція розімкненої системи.

По зміні налаштування маємо:

$$W_y = \frac{x(t)}{y(t)} = \frac{W_{pc}}{1 + W_{pc}}, \quad (6)$$

де  $y(t)$  – вхідна координата (параметри налаштування руху).

$$W_{pc} = W_{enc} W_{np} (1 - W_t), \quad (7)$$



де  $W_{np}$  – передатна функція процесу руху щітки по склу;

$W_t$  – передатна функція ланки додаткового зворотного зв'язку із запізнюванням.

В динамічній системі процес поділяється на два робочих ходи:

$$A \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow A_1 \cdot \sin(\omega t + F_1) - 1\text{-й робочий хід};$$

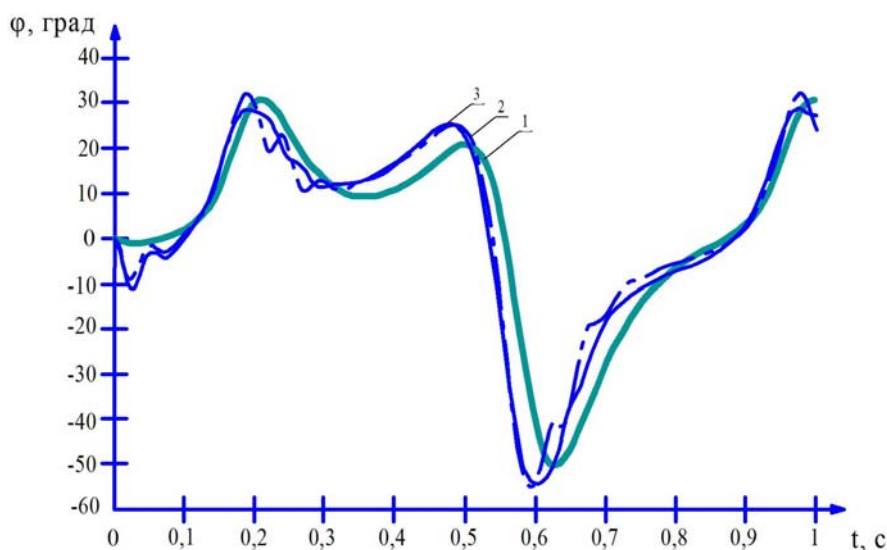
$$A \cdot \sin(\omega t) + A_1 \cdot \sin(\omega_1 t + F_1) - A_1 \cdot \sin(\omega_1 t + F_1) - 2\text{-й робочий хід}.$$

Виявлено, що відмінність частот гармонійної складової і сліду невелика, тому сумарне коливання вже на другому робочому ході можна розглядати як квазігармонійне з несучою частотою  $\omega$  і повільно змінними в часі амплітудою і фазою:

$$x(t) = A(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi(t)). \quad (9)$$

Такі коливання мають характер биття, їх амплітуда періодично стає рівною нулю. Замкнута система ніби розмикається і втрата нею стійкості вимикається. Описане розмикання є умовним. Головною перевагою способу підвищення вібростійкості системи управління склоочисником є його універсальність. Він застосовується при будь-яких динамічних збуреннях: як високочастотних, так і при низькочастотних, розмикаючи замкнену динамічну систему, робить непотрібними попередні динамічні випробування з метою виявлення «небезпечних» частот.

На основі моделі руху щітки по склу було здійснено моделювання впливу накладення мікроколивань на якість очищення скла. На рис. 3 приведені графіки зміни кута відхилення гумового елемента щітки від вертикалі в режимах без дії сухого тертя (1), з сухим тертям без накладення мікроколивань на закон руху щітки по склу (2), з сухим тертям при накладенні мікроколивань на закономірність руху щітки по склу (3).



1 – без дії сил сухого тертя; 2 – з дією сил сухого тертя; 3 – з дією сил сухого тертя при накладенні мікроколивань на закономірність руху

Рисунок 3 – Графік кута відхилення від вертикалі гумового елемента щітки склоочисника в різних режимах роботи

Джерело: розроблено авторами

Визначено, що накладення мікроколивань на закономірність руху щітки по склу підвищує стійкість досліджуваної системи, зменшуючи амплітуду автоколивань в 5...8 разів. Використання накладення мікроколивань на закономірність руху щітки по склу сприятиме зменшенню зносу гумового елемента щітки склоочисника та підвищенню

якості очищення скла і комфорту водія. Розгляд електронного інтерфейсу передачі сигналів від контролера до приводу системи склоочищення для двигунів з електромагнітним збудженням і зі збудженням від постійних магнітів показав, що вихідними сигналами для управління рухом щітки по склу можуть служити широтно-імпульсна модуляція (ШИМ) - сигнали контролера, відповідним чином посилені блоком силової комутації.

Визначені параметри, необхідні для генерації ШИМ - сигналу і обмеження на їх використання. Показано, що в якості вихідної величини регулятора системи склоочищення може бути використана відсоткова вихідна потужність, в подальшому апаратно перетворювана контролером в шпаруватість ШИМ - сигналу за допомогою стандартних вбудованих алгоритмів. Можливість реалізації алгоритму управління з використанням однієї із стандартних мов програмування програмованого логічного контролю (ПЛК) або їх комбінації відбувається на основі стандарту ІЕК 61131-3, а також суміщення із спеціалізованими контролерами для автомобільної промисловості.

#### **Висновки:**

1. З'ясовано зв'язок системи склоочищення з підсистемами забезпечення комфорту і безпеки автомобілів та запропоновано модель чотирьохланкового механізму мехатронної системисистеми склоочищення автомобіля в середовищі Matlab/Simulink з використанням різних співвідношень ланок і аналіз їх кінематичних і динамічних характеристик.

2. Отримано математичну модель руху щітки по склу для випадку близького до рівномірного розподілу тиску по довжині щітки з урахуванням нерівномірності руху щітки по склу, що пов'язана з роботою чотирьохланкового механізму мехатронної системисистеми склоочищення автомобіля.

3. Розглянуто вплив властивостей матеріалу гумового елемента щіток автомобіля на якість очищення скла та отримані значення величин, що характеризують пружні і дисипативні властивості шийки елемента в граничних для роботи системи режимах. Показана можливість виникнення регенераційних автоколивань при зниженні дисипативних властивостей шийки елемента внаслідок зносу або агресивного впливу середовища.

4. Виявлена наявність в системі можливості виникнення регенераційних автоколивань в критичних режимах роботи, що вимагає введення в закон руху щітки по склу мікроколивань, здатних ефективно понизити амплітуди вказаних автоколивань.

5. Запропоновані аналітичні залежності розрахунку параметрів програмного забезпечення для реалізації управління динамічними характеристиками мехатронної системи склоочищення автомобіля шляхом накладення на закономірність руху мікроколивань.

#### **Список літератури**

1. Konrad Reif. Automotive mechatronics. Automotive networking, driving stability systems, electronics. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2015. 549 p.
2. Fijalkowski B.T. Automotive mechatronics: operational and practical issues. Heidelberg : Springer, 2011. Volume I. 612 p.
3. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія. / Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В. та ін. Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
4. Аулін В.В., Голуб Д.В. Методи оцінки і аналізу надійності автомобільних транспортних систем. Міжнародна наук.-техн. конф. молодих учених та студентів: зб. тез доповідей, 16-17 листопада 2017 р. Том III. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. С.14-15.
5. Панков А.О., Аулін В.В., Голуб Д.В. та ін. Розробка інтелектуального мехатронного модуля для системи управління дозуванням. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-*

- 2019)": зб. тез Дванадцятій міжнар. наук.-практ. конф., 21-22 травня 2019 року, Київ, Україна. К.: НАУ, 2019. 173-175.
6. Аулін В.В., Голуб Д.В., Агапоненко М.І. Розробка критерію вдосконалення системи технічної експлуатації засобів транспорту з врахуванням необхідної діагностичної інформації. *Наукові нотатки* : міжвуз. зб. 2018. №62. С.17-20.
  7. Голобородько О.О., Коробочка О.О. Мехатронні системи автомобільного транспорту: навч. посіб. Харків: ТОВ «СМІТ», 2006. 300 с.
  8. Levent Güvenc, Bilin Aksun Güvenc, Burak Demirel. Control of mechatronic systems. London : The Institution of Engineering and Technology, 2017. 217 p.
  9. William Bolton. Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering. Harlow : Pearson, 2015. 663 p.
  10. Uwe Kiencke, Lars Nielsen. Automotive control systems for engine, driveline, and vehicle. Berlin : Springer-Verlag, 2005. 521 p.
  11. Robert H. Bishop. Mechatronic Systems, Sensors, And Actuators. Boca Raton: CRC Press, 2007. 656 p.

## References

1. Konrad Reif (2015). *Automotive mechatronics. Automotive networking, driving stability systems, electronics*. Wiesbaden : Springer Fachmedien [in English].
2. Fijalkowski, B.T. (2011). *Automotive mechatronics: operational and practical issues*. Heidelberg : Springer. Volume I. [in English].
3. Aulin, V.V., Golub, D.V. & Grinkiv, A.V. (2017). *Metodologichni i teoretichni osnovi zabezpechennya ta pidvishennya nadijnosti funkcionuvannya avtomobilnih transportnih sistem: monografiya [Methodological and theoretical bases of maintenance and increase of reliability of functioning of automobile transport systems]*. Kropivnickij: Vidavnictvo TOV "KOD" [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V. & Holub, D.V. (2017). Metody otsinky i analizu nadijnosti avtomobil'nykh transportnykh system [Methods of evaluating and analyzing the reliability of automobile transport systems]. *Mizhnarodna nauk.-tekhn. konf. molodykh uchenykh ta studentiv (16-17 lystopada 2017 r. ) – International Scientific and Technical conf. young scientists and students (p.14-15)*. Vol. III.. Ternopil': Ternopil's'kyj natsional'nyj tekhnichnyj universytet imeni Ivana Puliuiua [in Ukrainian].
5. Pankov A.O., Aulin V.V., Golub D.V. ta in. (2019). Rozrobka intelektualnogo mehatronnogo modulya dlya sistemi upravlinnya dozuvannyam [Development of an intelligent mechatronic module for the dosing control system]. *Integrated intelligent robotic complexes (IIRTK-2019)": Dvanadcyata mizhnarodna naukovopraktichna konferencija (21-22 travnya 2019 roku, Kiyiv) – 12 international scientific and practical conference (p. 173-175)*. Kyiv: NAU [in Ukrainian].
6. Aulin, V.V., Golub, D.V. & Agaponenko, M.I. (2018). Rozrobka kryteriiu vdoskonalennia systemy tekhnichnoi ekspluatatsii zasobiv transportu z vrakhuvanniam neobkhidnoi diahnostychnoi informatsii. [Development of criteria for improving the system of technical operation of means of transport, taking into account the necessary diagnostic information]. *Naukovi notatky : mizhvuz. zb. – Scientific notes: an interuniversity collection, 62*, 17-20 [in Ukrainian].
7. Goloborodko, O.O. & Korobochka, O.O. (2006). *Mehatronni sistemi avtomobilnogo transportu: navch. posib [Mechatronic systems of road transport]*. Harkiv: TOV «СМІТ» [in Ukrainian].
8. Levent Güvenc, Bilin Aksun Güvenc, Burak Demirel (2017). *Control of mechatronic systems*. London : The Institution of Engineering and Technology [in English].
9. William Bolton (2015). *Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering*. Harlow : Pearson [in English].
10. Uwe Kiencke & Lars Nielsen (2005). *Automotive control systems for engine, driveline, and vehicle*. Berlin : Springer-Verlag [in English].
11. Robert, H. Bishop (2007). *Mechatronic Systems, Sensors, And Actuators*. Boca Raton: CRC Press [in English].

**Viktor Aulin**, Prof., DSc., **Dmytro Holub**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

## Justification of the Mechanism of the Functioning of the Mechatronic System of Car Windshield Cleaning

The four-link mechanism of the car's mechatronic windshield cleaning system is substantiated using different ratios of links and analysis of their kinematic and dynamic characteristics. A mathematical model of the glass cleaning mechanism in the Matlab/Simulink environment is presented and its kinematic synthesis is carried out.

A mathematical model of the movement of the brush on the glass was developed for the case of close to uniform pressure distribution along the length of the brush, taking into account the unevenness of the law of movement associated with the operation of the transmission mechanism. The influence of the material properties of the rubber element on the quality of glass cleaning and the obtained values of the values characterizing the elastic and dissipative properties of the neck in the limit modes of the system are considered. The possibility of regeneration self-oscillations is shown when the dissipative properties of the neck are reduced as a result of wear or an aggressive environment.

The processes of dry friction and hydraulic movement resistance occurring in the system are clarified, the limits of possible visually noticeable self-oscillations depending on the parameters of the friction mode and system operation are shown. It was found that the presence in the system of the possibility of regenerative self-oscillations in critical operating modes requires the introduction of micro-oscillations into the law of movement of the brush on the glass, which can effectively reduce the amplitudes of these self-oscillations.

Analytical dependencies are proposed for calculating the parameters of the software, which implements the management of the dynamic characteristics of the system by superimposing the law of motion of micro-oscillations. The necessary hardware and software requirements for the controller are shown, as well as the possibility of saving the windshield wiper control unit as a functional unit of the mechatronic system for ensuring the comfort of movement.

**mechatronic system, modeling, window cleaning mechanism, car, brushes, rubber element, transmission mechanism, deflection angle**

*Одержано (Received) 24.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 621.317

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.176-186](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.176-186)

**Д.М. Квашук**, доц., канд. екон. наук, докторант, **В.Ю. Ларін**, проф., д-р техн. наук, **С.Ф. Філоненко**, проф., д-р техн. наук, **А.П. Стахова**, доц., канд. техн. наук

*Національний авіаційний університет, Київ, Україна*

*e-mail: dmytro.kvashuk@npp.nau.edu.ua,*

*vitalii.larin@npp.nau.edu.ua,*

*serhii.filonenko@npp.nau.edu.ua, anzhelika.stakhova@npp.nau.edu.ua*

## Моделювання витрат та вимірювання електричної енергії електродвигунів

Діяльність з визначення енергоефективності електродвигунів включає кілька етапів робіт. До них належать моделювання експлуатації двигунів за допомогою спеціалізованих програмних продуктів, що дозволяє визначити необхідні параметри споживання електричної енергії, навантаження, та обертальні параметри у різних режимах роботи. Проте, найефективнішим є спосіб отримати реальні робочі характеристики електродвигуна на випробувальних стендах. Це зумовлено багатьма факторами, від механічних несправностей до невідповідності технічних характеристик заявлених виробником. Разом з тим, як для першого, так і іншого способу проблема полягає в оптимізації вимірювального обладнання, що потребує зменшення похибки, збільшення швидкодії та чутливості вимірювальних перетворювачів. До параметрів, які вимагають особливої уваги можна віднести витрати електричної енергії, які в окремих сферах промисловості є вирішальними під час проектування технологічних майданчиків, визначення промислової політики, обсягів виробництва, тощо. У даній статті запропоновано спосіб встановити залежність між цими параметрами, практичне значення якого, в різних режимах роботи електродвигуна дасть можливість оцінити як економічну ефективність електричної машини так і можливі ризики, що пов'язані із безпечною подальшою експлуатацією, строком експлуатації та можливостями створювати необхідні моменти прискорення при заданих навантаженнях.

**вимірювання електричної енергії, обертальний момент, лічильник електричної енергії, вимірювання, математична модель, перетворювач, зворотній зв'язок**

© Д.М. Квашук, В.Ю. Ларін, С.Ф. Філоненко, А.П. Стахова, 2023

**Постановка проблеми.** Необхідність забезпечення енергоефективності та раціонального використання електричних машин призвела до потреб розробки методик питомої витрати електроенергії під час здійснення технологічних процесів. Враховуючи, що найенергоємнішим технологічним елементом на багатьох підприємствах є електродвигуни, на які доводиться до близько 60% всієї споживаної підприємством електроенергії, а їх комплектуючі досить часто використовуються такі, що вже морально застаріли, постає питання реструктуризації електроенергетичного обладнання промислового комплексу України, що дозволить скоротити час для приведення у відповідність вітчизняних виробничих норм до Європейських стандартів.

Усе це, та багато інших проблем пов'язаних із обліком та прогнозуванням витрат електричної енергії в різних режимах роботи електродвигунів потребує покращення засобів моделювання витрат електричної енергії, як на рівні апаратної частини, так і методологічних підходів до вирішення цієї проблеми загалом. Вже існуючі прилади значно покращують роботу з обліком електричної енергії, але разом з тим існує необхідність в збільшенні їх точності та швидкодії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Враховуючи, що цифрові лічильники електроенергії використовують середньоквадратичні значення струмів та напруг для обчислення складових потужності та оцінки спожитої енергії, проблема не визначення показників під час миттєвих навантажень, пов'язана із інтегральним обчисленням середньоквадратичних значень за миттєвими відліками часу набула широкого наукового розвитку [1], [2], [3], [4].

Згідно з Міжнародним протоколом вимірювання та верифікації (IPMVP), можна виділити невизначеність вимірювання, як одну із складових похибки, яка може виникнути при під час миттєвих навантажень електродвигунів, які можуть бути не визначені лічильником електричної енергії [5].

Миттєві навантаження, які швидко змінюються з часом, складно виміряні традиційними лічильниками електроенергії. Це пояснюється тим, що лічильники зазвичай вимірюють загальну кількість спожитої енергії за певний період часу. Щоб вирішити цю проблему, були розроблені розумні лічильники з розширеними можливостями вимірювання, які можуть вимірювати як споживання енергії, так і миттєві навантаження. Ці лічильники надають більш точну та детальну інформацію про те, як використовується енергія, і можуть допомогти комунальним підприємствам краще керувати своїми мережами, щоб забезпечити надійне та ефективне обслуговування [6]. Порівняти часові характеристики миттєвих навантажень, які пов'язані з роботою електричних машин, а також реактивні витрати електричної енергії задача досить складна. По перше залежно від моделі та типу лічильника максимально допустимі миттєві сплески навантажень можуть відрізнятися. Зазвичай виробники лічильників вказують так коефіцієнт перевантаження, який показує, наскільки максимально допустиме навантаження може перевищувати номінальне. Однак, навіть при дотриманні максимально допустимих значень миттєві сплески навантажень можуть викликати проблеми точного контролю навантаження.

Існує два підходи до визначення похибок лічильника: метод перевірки із еталонним лічильником та метод стабілізованої потужності, що задається. Тоді похибка лічильника, може бути визначена за формулою [1]:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{C_{\Pi} N_{\Pi} - C_{ET} N_{ET}}{C_{ET} N_{ET}}, \quad (1)$$

де  $C_{\Pi}$  – постійна лічильника, що перевіряється;

$C_{ET}$  – стала еталонного лічильника;

$N_{ET}$ ,  $N_{II}$  – число імпульсів з випробувального виходу і еталонного відповідно (за час вимірювання).

Недоліком такого обчислення похибки є значна методична похибка дискретності пов'язаної з квантуванням безперервного часу дискретними імпульсами, що виникає через те, що імпульси з повіреного та еталонного лічильників не завжди синхронізовані між собою. Тому, інтервал часу, протягом якого підраховуються імпульси, синхронізують із сигналом випробувального виходу того із лічильників, частота якого менша. В такому випадку похибка дискретності дорівнюватиме нулю, але для другого лічильника вона залишиться.

Для зменшення даної похибки збільшують кількість імпульсів з цього лічильника, збільшувати час вимірювань. Але такий даний метод є незручним при масовому виробництві лічильників, де час операції відіграє значну роль. Цей недолік також можна нівелювати, якщо замість підрахунку кількості імпульсів вимірювати їхній період. Тоді відносну похибку лічильника можна визначити за формулою:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{\frac{C_{II} - C_{ET}}{T_{II}}}{\frac{C_{ET}}{T_{ET}}}, \quad (2)$$

де  $T_{II}$ ,  $T_{ET}$  – періоди імпульсів з випробувального виходу і еталонного відповідно.

Недоліком такого методу є складність встановлення вихідних сигналів генератора в точно задані значення. Крім того, у даному методі використовувати генератор та зразковий лічильник.

Метод стабілізованої потужності вимагає еталонного ватметра, амперметрів та вольтметрів, а також еталонних перетворювачів струму та напруги. Зазвичай, ці прилади входять до складу генератора, що дозволяє точно задати та підтримувати необхідний режим на постійному рівні.

Для вимірювання використовують показання лічильника, що повіряється, через тривалість періодів, або частоту проходження імпульсів. Щоб зменшити випадкові похибки, які можуть виникати від шумів на сигналі з випробувального виходу, зазвичай вимірюють середнє значення періоду за кілька періодів імпульсів. Це дозволяє визначити похибку лічильника, що повіряється, за наступною формулою:

$$\gamma_{\lambda} = \frac{\frac{C_{II} - P_{ET}}{T_{II}}}{P_{ET}}, \quad (2)$$

де  $P_{ET}$  – потужність, що задається генератором, яка береться безпосередньо з установок генератора, який задає її точно в межах свого класу точності.

В роботі [7] досліджувались похибки індукційних лічильників електричної енергії, а також електричні втрати в асинхронному двигуні в умовах високого рівня гармонік у кривих струму та напруги при використанні окремих частотних перетворювачів. Це дозволило встановити, що при одних і тих же значеннях навантаження на електродвигун в умовах несинусоїдальних режимів у ланцюгах з ШІМ, основна похибка індукційних лічильників електроенергії в кілька десятків разів перевищує їх основну похибку при синусоїдальному режимі. За основу було узятو спеціально розроблений електронний лічильник, який забезпечує високу точність обчислення поточного значення електроенергії  $W(t)$  порівняно з індукційним лічильником:

$$W(t) = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt, \quad (3)$$

де  $u(t)$  – миттєве значення напруги при навантаженні;

$i(t)$  – миттєве значення струму навантаження;

$t$  – поточний час вимірювань.

Лічильник використовує перемножувач миттєвих значень, імпульсний перемножуючий пристрій, імпульсний інтегратор та цифровий лічильник імпульсів. Завдяки цим компонентам вимірювання електроенергії можуть мати сумарну похибку в близько кількох десятках часток відсотка (0,1-0,2%), навіть в умовах високого рівня вищих гармонік на частотах кратних 50 Гц, аж до частот кілька десятків кілогерц [7].

Таким чином, реактивна складова, що формується під час роботи електродвигуна змінного струму, накладаючись на додаткові імпульсні фактори впливу, в залежності від окремих гармонік напруги може бути належним чином не визначена. Для цього під час вимірювання електричної енергії, яка споживається електричними двигунами, незважаючи на можливі засоби компенсації реактивної напруги, можна збільшити кількість інформативних параметрів та встановити корегуючий зворотній зв'язок з вихідним сигналом лічильника. Таким параметром, може виступати обертальний момент електродвигуна, або кількість миттєвих імпульсних навантажень за певний проміжок часу.

**Постановка завдання.** Дослідити залежність між точністю лічильника електричної енергії та імпульсними характеристиками потужності електродвигунів змінного струму в різних режимах роботи.

*Залежність імпульсних навантажень асинхронного електродвигуна та точності лічильника електричної енергії.*

Для визначення залежності точності вимірювального лічильника від імпульсних характеристик навантаження на електродвигун [7], розглянемо технічні характеристики моделі асинхронного електродвигуна з урахуванням [8]:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= r(1 + T_s' s) i_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\alpha} - k_r p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\beta}, \\ u_{s\beta} &= r(1 + T_s' s) i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\beta} + k_r p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\alpha}, \\ 0 &= -R_r k_r i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\alpha} + p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\beta}, \\ 0 &= -R_r k_r i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\beta} - p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} p k_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}), \quad J \frac{d\omega_{\text{Mex}}}{dt} = M - M_c. \end{aligned} \quad (4)$$

де  $u_{s\alpha}$  – напруга ротора;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  – струм ротора, статора;

$u_{s\beta}$  – напруга статора;

$\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$  – потокощеплення обмоток ротора та статора;

$r = R_s + R_r k_r^2$  – еквівалентний опір;

$R_s, R_r$  – активні опори статора та ротора, відповідно;

$k_r = \frac{L_m}{L_r}$  – коефіцієнт, що виражає відношення індуктивності повітряного зазору

та індуктивності ротора;

$T'_S = \frac{L'_S}{r}$  – еквівалентна постійна часу статора;

$L'_S = L_s - \frac{L_m^2}{L_m}$  – еквівалентна індуктивність статора;

$S = \frac{d}{dt}$  – оператор диференціювання.

Визначивши із (4) напруги статора та ротора, можна змодельувати роботу електродвигуна в сталому режимі (рис. 1), представивши перехідні процеси по напрузі асинхронного електродвигуна.

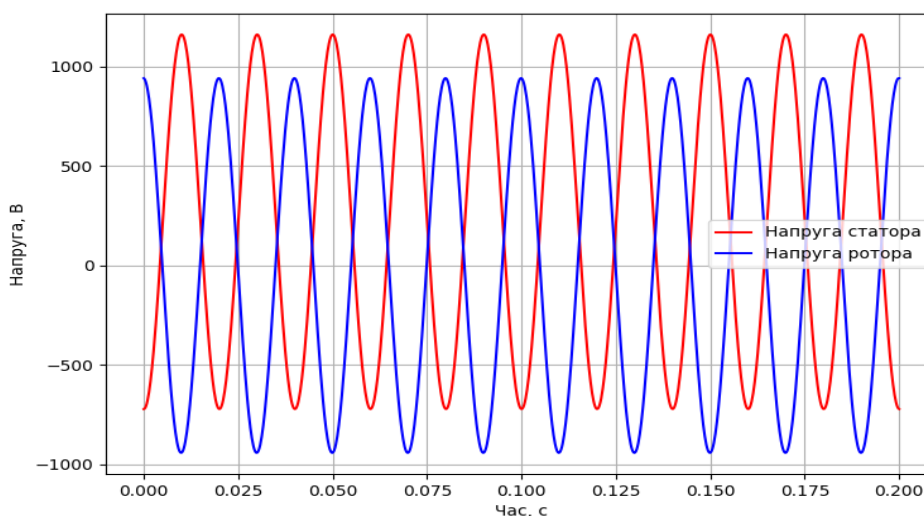


Рисунок 1 – Перехідні процеси однофазного асинхронного електродвигуна

Джерело: розроблено авторами

Щоб зрозуміти принцип дії однофазного асинхронного двигуна розкладемо пульсуюче магнітне поле на два однакових кругових поля, що мають амплітуду рівну  $\frac{\Phi_{max}}{2}$  і обертаються в протилежні сторони з однаковою частотою:

$$n = \frac{f_1 \cdot 60}{p}, \quad (5)$$

де  $n$  – швидкість обертання магнітного потоку, об/хв частота обертання магнітного поля у прямому напрямку, об/хв;

$f_1$  – частота струму статора, Гц;

$p$  – кількість пар полюсів.

Враховуючи залежність імпульсних характеристик напруги від точності лічильників електричної енергії, розглянемо вирази, що характеризують навантаження на валу електродвигуна (табл. 1) та структурну модель електричного лічильника разом із процесом вимірювального перетворення [9], (рис. 2).



Таблиця 1 – Характеристики основних параметрів роботи асинхронного електродвигуна

Формула	Позначення	
1	2	
$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{3U_f \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}}$	$I_{\text{ном}}$ - Номінальний струм статора; $U_f$ - Напряга однієї фази; $\eta_{\text{ном}}$ - Ефективність роботи електродвигуна; $\varphi$ - кута фази.	6)
$M_{\text{Em ном}} = M_{\text{ном}} + M_0 = M_{\text{ном}} + \frac{\Delta P_{\text{mech ном}} + \Delta P}{\omega_0}$	$M_{\text{Em}}$ - номінальний момент; $M_{\text{ном}}$ - номінальний момент; $M_0$ - початковий момент; $P_{\text{mech ном}}$ - номінальна механічна потужність; $\omega_0$ - кутова швидкість початкова; $\Delta P_{\text{mech ном}}$ - зміна механічної потужності при зміні навантаження на двигун	7)
$R_1 = \frac{\Delta P_1}{3I_1^2} = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{3I_1^2} = \frac{\frac{\Delta P_{\text{ном}}}{1 + K_3^2} - M_{\text{Em ном}} \omega_0 S_{\text{ном}}}{3I_1^2}$	$R_1$ - активний опір статора; $I$ - струм споживання статора;	8)
$X_s = \frac{U_{s,\text{ном}}}{\sqrt{3}I_{s,\text{ном}}} \sin(\varphi_{s,\text{ном}} - \varphi_s)$	$U_{s,\text{ном}}$ - номінальна напряга живлення статора, $I_{s,\text{ном}}$ - номінальний струм статора, $\varphi_{s,\text{ном}}$ - номінальний кут зсуву фаз між напрягою та струмом в статорі, $\varphi_s$ - кут зсуву фаз між напрягою та струмом в статорі при поточних умовах роботи двигуна.	9)

Джерело: розроблено авторами

Із запропонованого в роботі [9] розробленого цифрового лічильника електричної енергії, на рис. 2 можна спостерігати структуру вимірвального перетворення.

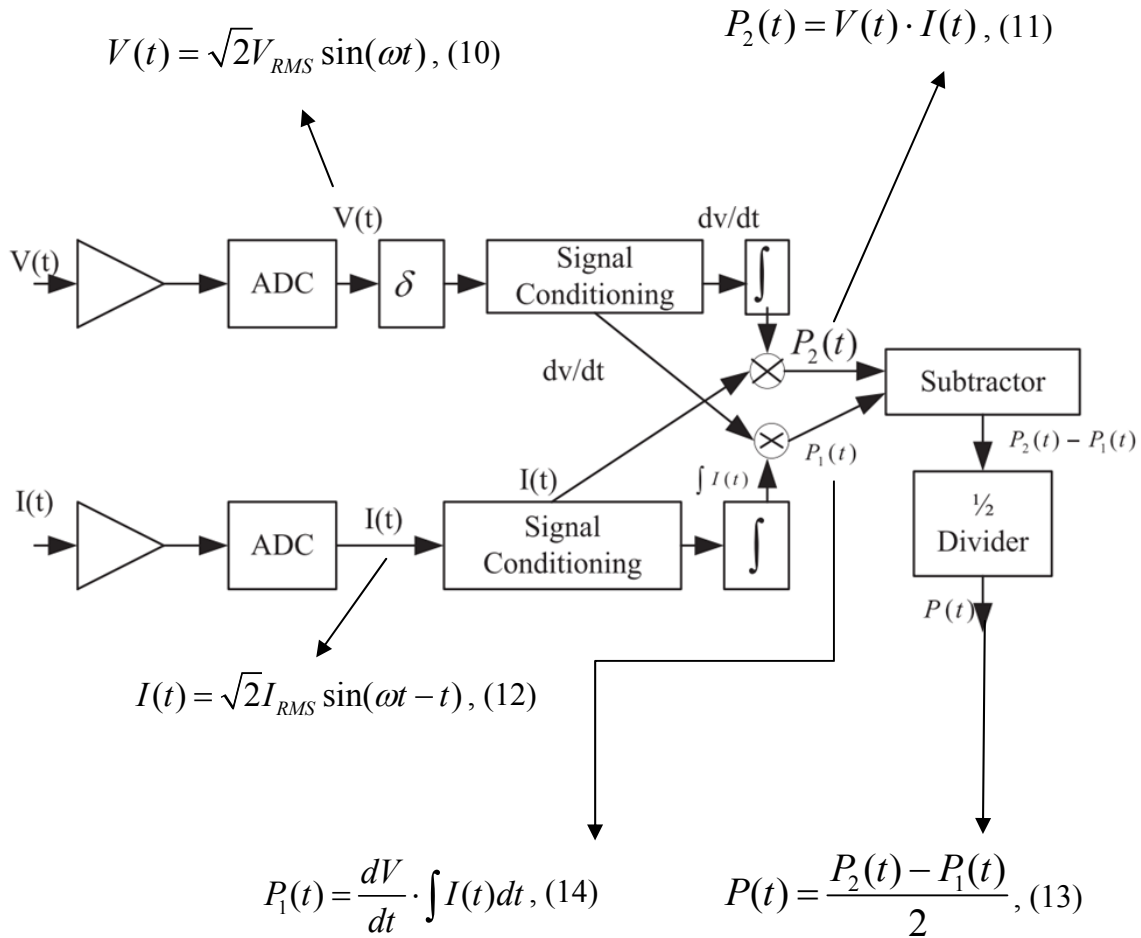


Рисунок 2 – Структурна схема вимірального перетворення електричного лічильника  
Джерело: [9]

З урахуванням виразу (4) та рис. 1, який побудовано на його основі, перехідні характеристики струмів статора та ротора мають залежність від частоти струму, яка також визначається лічильником. А також, беручи до уваги дослідження імпульсного впливу на точність лічильника під час роботи асинхронного електродвигуна [7] та враховуючи, що миттєві імпульси можуть виникати під час пускових моментів та різних статичних моментів, інтегруючи складову, яка представлена виразами (11), (14) на рис. 2 можна доповнити зворотним зв'язком, який буде реалізувати визначення миттєвих імпульсів під час навантаження на роботу електродвигуна. Для цього необхідно в структуру передавальних ланцюгів додати фільтр, миттєвих імпульсів та лічильник їх кількості (рис. 3). Так, враховуючи абсолютну похибку лічильника, яка пов'язана із виникненням миттєвих імпульсів під час роботи електродвигуна, можна представити блок її корекції (рис. 3), який включає: 1 алгоритм корекції, побудований на основі підрахунку миттєвих імпульсів за певний час; 2. фільтру миттєвих імпульсів; 3 пристрою для корегування показників лічильника; 4. лічильника миттєвих імпульсів; 5. перетворювача обертового моменту електродвигуна.

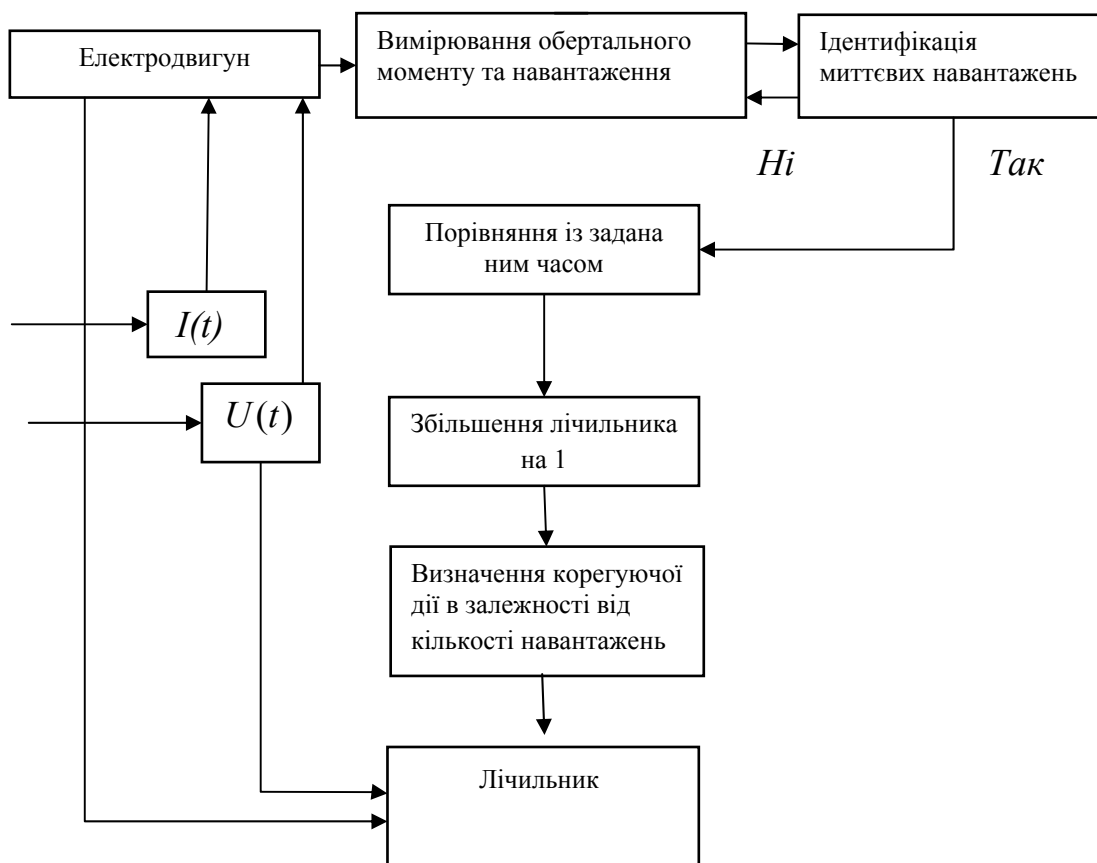


Рисунок 3 – Алгоритм корекції похибки лічильника електричної енергії з урахуванням миттєвих навантажень електродвигуна в процесі вимірювання витрат електричної енергії.

Джерело: розроблено авторами

Ідентифікувати миттєві імпульси, можна використовуючи перетворювачі обертальних моментів на базі тензометричної, або індуктивної технологій.

Залежність між кількісними характеристиками миттєвих навантажень за певний період часу та точністю лічильника можна отримати з урахуванням виразів (3), (1) та (7):

$$\frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f S \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt, \quad (15)$$

де  $m_1$  – коефіцієнт корисної дії двигуна (ККД);

$U_1^2$  – квадрат напруги живлення статора;

$r_2'$  – опір обмотки ротора;

$p$  – кількість пар полюсів ротора;

$f$  – частота живлення статора;

$S$  – коефіцієнт форми статора;

$r_1$  – опір обмотки статора на одну фазу;

$r_2'$  – реактивний опір обмотки ротора на одну фазу;

$x_1$  – реактивний опір обмотки статора на одну фазу;

$x_2'$  – опір реактивної складової обмотки ротора на одну фазу.

Застосовуючи рівняння (15) в запропонованому алгоритмі (рис. 3) циклічно, за умов, його вірності, коли механічні імпульси будуть співпадати з електричними, можна збільшувати лічильник таких імпульсів на 1 за певний час дискретизації сигналу. Таким чином, створивши новий інформаційний параметр  $k_m$ , який буде дорівнювати кількості отриманих миттєвих навантажень за сталий проміжок часу.

Врахувавши його у виразі (4), отримуємо систему рівнянь із додатковим корегуючим параметром:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= r(1 + T'_s s) i_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\alpha} - k_r p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\beta}, \\ u_{s\beta} &= r(1 + T'_s s) i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\beta} + k_r p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\alpha}, \\ 0 &= -R_r k_r i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\alpha} + p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\beta}, \\ 0 &= -R_r k_r i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\beta} - p \omega_{\text{Mex}} \psi_{r\alpha}, \\ M &= \frac{3}{2} p k_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}), \\ J \frac{d\omega_{\text{Mex}}}{dt} &= k_m \left[ \frac{3}{2} p k_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_c \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким чином, змінна  $k_m$  відповідає за коефіцієнт пропорційності між обертальним моментом, струмом та кількістю миттєвих навантажень.

Змодельовавши вираз (16) для умовних параметрів електричної машини, отримуємо додаткову величину, що характеризує точність лічильника електричної енергії рис. 4.

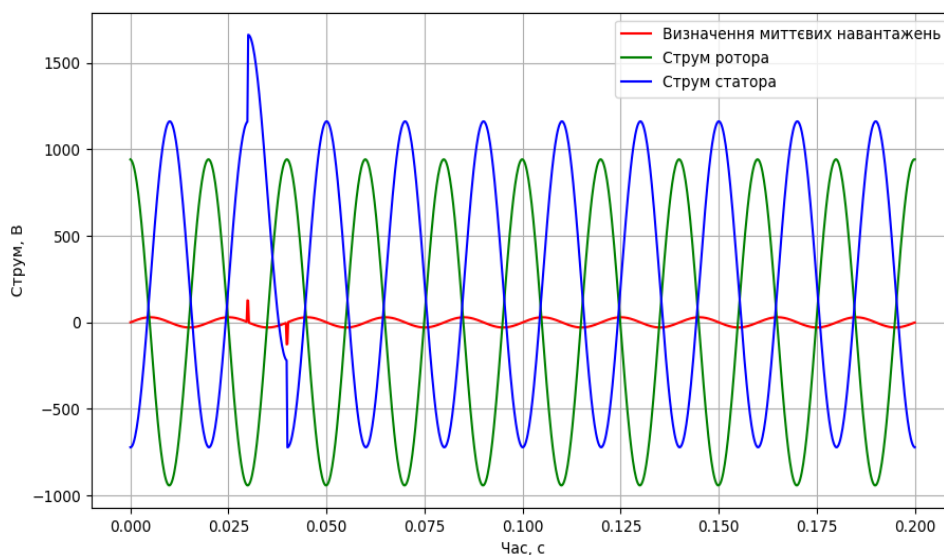


Рисунок 4 – Перехідні процеси однофазного асинхронного електродвигуна з урахуванням додаткового інформаційного параметра, що характеризує кількість миттєвих імпульсів

Джерело: розроблено авторами

Так, на рис. 4. представлено перехідну характеристику асинхронного двигуна з урахуванням додаткового інформаційного параметра, який дозволяє встановити кількість миттєвих навантажень у заданий період. Кількісні показники миттєвих імпульсів згідно із проведеними дослідженнями, під час вимірювання витрат електричної енергії електричних двигунів, можуть характеризувати точність лічильників електричної енергії.

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження метрологічних характеристик вимірювальних лічильників, встановлено залежність їх точності від миттєвих, імпульсних навантажень під час вимірювання витрат електричної енергії асинхронних електродвигунів, що дозволило розробити алгоритм корекції похибки на основі нового інформаційного параметра. Такий параметр характеризується кількістю миттєвих навантажень, що обумовлені механічними, або індуктивними факторами впливу на роботу електродвигунів у певному, фіксованому проміжку часу. Таким чином, безпосереднє вимірювання обертальних моментів електродвигунів під діагностики споживання електричної енергії, дозволяє збільшити точність лічильників шляхом виявлення додаткових імпульсних, дестабілізуючих факторів впливу.

## Список літератури

1. Pasinkov Y.A., Savinykh M.A. Tekhnologicheskii kontrol' metrologicheskikh kharakteristik schetchikov elektroenergii na proizvodstve [Technological control of metrological characteristics of electricity meters in manufacturing]. *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*. 2018. no.1 (70). pp. 177–188. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188.
2. Kudrya S.O. Unconventional and renewable energy sources: a textbook . Kyiv: National Technical University of Ukraine («KPI»), 2011. 494 p.
3. Концепція побудови автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії в умовах енергоринку : затверджена спільним наказом Мінпаливенерго, НКРЕ, Держкоменергозбереження, Держстандарту, Держбуду, Держпромполітики № 32/28/28/276/75/54 від 17 квітня 2000 р. URL: [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/FIN4936.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN4936.html) (дата звернення: 14.03.2023)
4. Tarafdar Hagh M., Mahaei S. M., Zare K. Improving bad data detection in state estimation of power system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2011. Vol. 1, № 2. P. 85–92.
5. International Performance Measurement And Verification Protocol. U.S. Dep. of Energy. 2002. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31505.pdf>.
6. Денисюк С. П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах . *Енергетика: економіка, технології, екологія : наук. журнал*. 2014. № 1(35). С. 7–20.
7. Попов А.П., Чугулёв А.О., Горшенков А.А., Клеванский С.М . Влияние широтно-импульсной модуляции на погрешность индукционных счетчиков электроэнергии и на потери в асинхронном двигателе . Сиб. гос. автомоб. дор. академия. Омск, 2003. 6с.
8. Визгина, Е. И. (2011). Математическая модель высоковольтного асинхронного двигателя большой мощности. *Вестник Чувашского университета*, (3), 44-52.
9. Devendra M. Jaiswal, Mohan P. Thakre, Modeling & designing of smart energy meter for smart grid applications. *Global Transitions Proceedings*, Vol. 3, Issue 1, 2022, P. 311-316. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2022.03.017>.

## References

1. Pasinkov, Y.A. & Savinykh, M.A. (2018). Tekhnologicheskii kontrol' metrologicheskikh kharakteristik schetchikov elektroenergii na proizvodstve [Technological control of metrological characteristics of electricity meters in manufacturing]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university, no.1 (70)*, pp. 177–188. doi: 10.17212/1814-1196-2018-1-177-188 [in English].
2. Kudrya, S.O. (2011). Unconventional and renewable energy sources: a textbook . Kyiv: National Technical University of Ukraine («KPI») [in English].
3. Kontseptsiya pobudovy avtomatyzovanykh system komertsyynoho obliku elektroenerhiyi v umovakh enerhorynku : zatverdzhena spil'nym nakazom Minpalyvenerho [The concept of building automated

- systems of commercial electricity accounting in the conditions of the energy market: approved by a joint order of the Ministry of Fuel and Energy]. (nd.). NKRE, Derzhkomenerhozberezhennya, Derzhstandartu, Derzhbudu, Derzhprompolityky № 32/28/28/276/75/54 vid 17 kvitnya 2000 r. Retrieved from [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/FIN4936.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/FIN4936.html) (data zvernennya: 15 kvitnya 2023 r).
4. Tarafdar, Hagh M., Mahaei, S. M. & Zare, K. (2011). Improving bad data detection in state estimation of power system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 1, № 2. P. 85–92 [in English].
  5. International Performance Measurement And Verification Protocol. U.S. Dep. of Energy. (2002). *nrel.gov*. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31505.pdf> [in English].
  6. Denysiuk, S.P. (2014). Tekhnolohichni oryentyry realizatsiyi kontseptsiyi Smart Grid v elektroenerhetychnykh systemakh [Guidelines of technological concepts of Smart Grid in power system]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia : naukovyj zhurnal – Power Engineering: economics, technique, ecology, (1)*, 7-20 [in Ukrainian].
  7. Popov, A.P., Chugulov, A.O., Gorshenkov, A.A. & Klevanskiy, SM . (2003). *Vliyaniye shiroti-impul'snoy modulyatsii na pogreshnost' induktsionnykh schetchikov elektroenergii i na poteri v asinkhronnom dvigatele [Influence of pulse-width modulation on the error of induction electricity meters and on losses in an asynchronous motor]* . Omsk, Sib. gos. avtomob. dor. akademiya. [in Russian].
  8. Vizgina, Ye. I. (2011). Matematicheskaya model' vysokovol'tnogo asinkhronnogo dvigatelya bol'shoy moshchnosti [Mathematical model of a high-voltage asynchronous motor of high power]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta – Bulletin of the Chuvash University, (3)*, 44-52 [in Ukrainian].
  9. Devendra, M. Jaiswal & Mohan, P. (2022). Thakre, Modeling & designing of smart energy meter for smart grid applications, *Global Transitions Proceedings, Vol. 3, Issue 1*, Pages 311-316. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2022.03.017> [in English].

**Dmytro Kvashuk**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., Doctoral student, **Vitali Larin**, Prof., DSc., **Serhii Filonenko**, Prof., DSc., **Anzhelika Stakhova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*National Aviation University, Kyiv, Ukraine*

### **Cost Modeling and Measurement of Electrical energy of Electric Motors**

The activity of determining the energy efficiency of electric motors includes several stages of work. These include modeling the operation of engines with the help of specialized software products, which allows you to determine the necessary parameters of electrical energy consumption, load, and rotational parameters in various operating modes. However, the most effective way is to obtain the real operating characteristics of the electric motor on test stands. This is due to many factors, from mechanical malfunctions to inconsistencies in the technical characteristics declared by the manufacturer. At the same time, both for the first and other methods, the problem lies in the optimization of the measuring equipment, which requires reducing the error, increasing the speed and sensitivity of the measuring transducers.

The parameters that require special attention include the consumption of electrical energy, which in certain areas of industry is decisive during the design of technological sites, determination of industrial policy, production volumes, etc. This article proposes a way to establish the relationship between these parameters, the practical value of which, in different operating modes of the electric motor, will make it possible to evaluate both the economic efficiency of the electric machine and the possible risks associated with safe further operation, the period of operation and the ability to create the necessary acceleration moments at given loads.

As a result of the study of the metrological characteristics of measuring meters, the dependence of their accuracy on instantaneous, impulse loads during the measurement of electrical energy consumption of asynchronous electric motors was established, which made it possible to develop an error correction algorithm based on a new information parameter. This parameter is characterized by the number of instantaneous loads caused by mechanical or inductive factors influencing the operation of electric motors in a certain, fixed period of time. Thus, the direct measurement of the torques of electric motors under the diagnosis of electric energy consumption allows to increase the accuracy of the counters by detecting additional impulse, destabilizing factors of influence.

**electric energy measurement, torque, electric energy meter, measurement, mathematical model, converter, feedback**

*Одержано (Received) 24.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**В.В. Кальченко**, проф., д-р техн. наук, **В.І. Венжега**, доц., канд. техн. наук,  
**Г.В. Пасов**, доц., канд. техн. наук  
*Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна*  
*e-mail: chntu@ukr.net*

## Підвищення точності та продуктивності обробки плоских поверхонь деталей, що входять до вузлів і агрегатів автомобілів

Використання нових резервів процесу шліфування плоских поверхонь деталей автомобілів дозволить істотно підвищити продуктивність обробки, знизити нерівномірність зносу профілю круга і підвищити точність та якість оброблених поверхонь, отже є актуальною науковою проблемою, вирішення якої має важливе народногосподарське значення. Проведений аналіз досліджень і публікацій показав важливість розробки і впровадження технологій шліфування зі схрещеними вісями шліфувальних кругів і заготовок, для чого проводиться спеціальна профільна правка круга, що дає змогу отримати на поверхні круга ділянку для зняття чорнового припуску та калібрувальну ділянку. При цьому весь припуск зрізується на ділянці, прилеглій до калібрувальної. Калібрувальна ділянка на вході деталей в зону обробки не приймає участь у зрізуванні припуску, має високу стійкість і на виході формує остаточну точність торцевих поверхонь. В роботі за допомогою матриць перетворення систем координат, які моделюють рухи і повороти вздовж і навколо координатних осей, описано калібрувальну ділянку торця інструмента при його профілюванні на верстаті алмазним олівцем, запропоновано оптимальну довжину калібрувальної ділянки та співвідношення кутів орієнтації шліфувальних кругів в горизонтальній і вертикальній площинах, які дають найкращі результати по точності.

**двостороння торцешліфувальна обробка, комбінована правка кругів, профільовані та орієнтовані шліфувальні круги, точність обробки торцевих поверхонь**

**Постановка проблеми.** Вимоги по точності розмірів, відхиленню форми та взаємного розміщення, шорсткості плоских поверхонь деяких деталей, що входять до складу вузлів і агрегатів автомобілів надзвичайно високі і можуть бути досягнені тільки за допомогою обробки шліфуванням. Так торцеве биття внутрішніх і зовнішніх кілець підшипників із сталі ШХ4 твердістю 61...64 HRC класів точності 2 і Т не повинно перевищувати 1,5 мкм при відхиленні ширини 1,5 мкм і шорсткості 0,32 мкм. До торцевих поверхонь роликів підшипників кочення висуваються високі вимоги по точності розмірів, відхилень форми та якості торцевих поверхонь при забезпеченні високої продуктивності обробки. Ролики повинні виготовлятися з підшипникової сталі ШХ 15, бути термічно оброблені до твердості 60...65 HRC, не мати тріщин, раковин, корозії, слідів припалів. Стандартом встановлено для роликів три ступені точності I, II, та III для яких нормуються основні параметри. Так, наприклад, для ступені точності I при довжині ролика до 30 мм верхній граничний відхил  $es = +1,5\text{ мкм}$ , нижній  $ei = -7,5\text{ мкм}$ , випуклість торця до 2 мкм. Увігнутість торців роликів не допускається.

В роботі потрібно провести дослідження відомих способів обробки плоских поверхонь деталей та процесу шліфування цих же поверхонь на модернізованому для цього двосторонньому торцешліфувальному верстаті 3342АДО для забезпечення необхідної точності і шорсткості та високої продуктивності обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Плоскі поверхні деталей автомобілів в основному обробляють струганням, фрезеруванням, протягуванням і шліфуванням [1, 2, 3]. Якість обробки деталей визначається такими параметрами:

- точністю відстаней між окремими поверхнями;
- непрямолінійністю поверхні в подовжньому і поперечному напрямках;
- непаралельністю і неперпендикулярністю окремих поверхонь між собою;
- розташуванням поверхні під необхідним кутом;
- необхідною шорсткістю поверхні;
- якістю поверхневого шару.

Вказані умови задають залежно від призначення деталі і даної поверхні й проставляють на кресленні.

Непрямолінійність, непаралельність, неперпендикулярність повинні призначатися по ГОСТ 10356–63 при особливих вимогах, витікаючих з умов роботи, виготовлення або вимірювання деталей. За відсутності вказівок про граничні відхилення ці відхилення обмежують полем допуску на розмір або регламентують в нормативних матеріалах на допуски. Шорсткість обробленої поверхні задають залежно від призначення цієї поверхні.

Стругання проводять на повздовжньо–стругальних і поперечно– стругальних верстатах. Ці верстати мають широке застосування в одиничному, дрібно- і середньосерійному виробництвах внаслідок універсальності, простоти, достатній точності і меншій вартості в порівнянні з фрезерними верстатами. Стругання розділяють на чорнове і чистове. Чистове стругання проводять з малою подачею або різцями з широкою різальною кромкою при великій подачі. Швидкості різання при цих видах обробки невеликі (4–20 м/хв.). Точність роботи на стругальних і довбальних верстатах 0,1–0,2 мм на 1 м довжини, шорсткість поверхонь при чорновому струганні  $Ra = 6,3–25$  мкм, при чистовому  $Ra = 0,8–6,3$  мкм.

Найбільш поширений спосіб обробки плоских поверхонь деталей, які не потребують високої точності, на вертикально і горизонтально фрезерних верстатах торцевими і циліндричними фрезами. Фрезерування торцевими фрезами більш продуктивне, ніж фрезерування циліндричними. Це пояснюється тим, що при торцевому фрезеруванні різання металу відбувається одночасно великим числом зубів, а при фрезеруванні циліндричними фрезами двома–трьома зубами. Крім того, можна використовувати торцеві фрези великих діаметрів (до 700 мм), з великим числом зубів або ножів з припаяними або непереточуваними пластинками. Торцеві фрези закріплюють в шпинделі верстата, забезпечуючи при цьому значну жорсткість. Точність фрезерування досягається по 8–11 квалітету, а шорсткість поверхні  $Ra = 0,4–0,8$  мкм.

Обробка протягуванням зовнішніх, заздалегідь не оброблених поверхонь, за один хід протяжки не надто поширений метод обробки, хоч при цьому і досягається висока точність і мала шорсткість поверхні. Суть цього методу полягає в тому, що в процесі обробки кожний різальний зуб протяжки знімає шар металу, що є частиною припуску, а калібруючі зуби зачищають поверхню. При цьому вони довго не втрачають своєї різальної здатності і форми.

Найкращі результати по точності розмірів, відхиленню форми та взаємного розміщення, шорсткості можна отримати при шліфуванні [4,5,6]. Застосовується обдирне і чистове шліфування. Обдирне шліфування поверхонь може бути попередньою або остаточною операцією, якщо не потрібна висока точність і мала шорсткість поверхні. Припуск для обдирного шліфування повинен бути значно меншим ніж для фрезерування і стругання. При великих припусках обдирне шліфування



неекономічне. Обдирне шліфування поверхонь використовують у тому випадку, коли тверда кірка на поверхні заготовки або велика твердість матеріалу утрудняють фрезерування чи стругання. Його застосовують також при обробці плоских поверхонь нежорстких заготовок.

Чорнове і чистове шліфування поверхонь проводять для отримання більш високої точності і малої шорсткості поверхні, коли цього не можна досягти фрезеруванням чи струганням [7,8]. Чистове шліфування поверхонь проводять частиною торця або периферією круга. При шліфуванні торцевою частиною круга застосовують круги чашкової або тарілчастої форми. Шліфування торцем круга більш продуктивне, ніж шліфування периферією, оскільки, звичайно, діаметр круга більший, ніж ширина оброблюваної поверхні, внаслідок чого вона вся піддається обробці. Шліфування периферією круга проводять з поперечною подачею, і тому воно менш продуктивне, але при цьому досягається більш висока точність, ніж при шліфуванні торцем круга.

При плоскому обдирному шліфуванні сталевих заготовок застосовують круги з електрокорунду, а для відливань з чавуна, міді і алюмінію круги з карбіду кремнію зернистістю 80–160 на керамічній або бакелітовій зв'язці. В порівнянні з керамічною бакелітова зв'язка володіє деякою змащувальною дією, забезпечуючи меншу шорсткість оброблюваної поверхні.

Для попереднього і остаточного шліфування сталевих заготовок застосовують переважно круги з електрокорунду, зернистістю 30–80 середньої твердості (С1–С2) і середньої м'якості (СМ1–СМ2) [9,10]. Для шліфування заготовок з чавуну – круги з карбіду кремнію, зернистістю 50–80 і твердістю С1–СМ2. Керамічну зв'язку використовують переважно в кругах при шліфуванні периферією, а бакелітову – в кругах при шліфуванні торцем. Швидкість шліфувальних кругів 30–40 м/с, при швидкісному шліфуванні – 50–60 м/с. Швидкість переміщення заготовки 10–50 м/хв. Глибина різання (0,005–0,03 мм) залежить від зернистості крута, необхідної шорсткості і точності. Подачу при шліфуванні периферією круга вибирають 0,2–0,6 ширини круга за хід столу. При плоскому шліфуванні периферією круга  $H_o = 0,4–0,8$  мкм, при тонкому шліфуванні  $R_a = 0,05–0,1$  мкм. При тонкому шліфуванні круг правлять алмазом, глибина шліфування 3–5 мкм, швидкість заготовки (столу) 2–4 м/хв.

Останнім часом отримало розвиток шліфування з великим зніманням металу (600 см<sup>3</sup>/хв. при обробці сталевих заготовок і 750 см<sup>3</sup>/хв. при обробці чавунних заготовок) [11,12]. Таке шліфування (силове) у багатьох випадках заміняє стругання, фрезерування, точіння, особливо при обробці поверхонь, що мають окалину, нерівності, значну твердість і ін. Силове шліфування здійснюють двома способами: 1) з великою глибиною різання (6 мм) і малою швидкістю подачі заготовки (1–2 м/хв.); 2) з невеликою глибиною різання і високою швидкістю подачі заготовки. Силове шліфування здійснюють на плоско- і круглошліфувальних верстатах. Для силового шліфування виготовляють круги підвищеної міцності, допускаючи окружні швидкості 70 м/с, що збільшують знімання металу в 2–3 рази в порівнянні зі звичайними методами шліфування. Шліфувальні круги для силового шліфування виготовляють на керамічній або бакелітовій зв'язках, грубозернистими і високопористими. При плоскому шліфуванні торцем круга використовують переважно сегментні круги. Змащувально-охолоджуючі рідини (ЗОР) зменшують нагрів і тертя між кругом і заготовкою. Застосовують наступні ЗОР: 1) емульсії прості і з добавками жирів для шліфування з високим тиском (20 кгс/см<sup>2</sup>); 2) шліфувальні масла; 3) хімічні рідини з добавками антикорозійних і поверхневих активних речовин. Кількість використання ЗОР до 60 л/хв.

**Постановка завдання.** Розробити високопродуктивний спосіб обробки для високоточних плоских поверхонь деталей, що входять до вузлів і агрегатів автомобілів, на двосторонніх тоцешліфувальних верстатах, спеціально профільованими кругами з калібрувальною ділянкою.

**Виклад основного матеріалу.** До складу вузлів і агрегатів автомобілів входить багато деталей, які мають плоскі поверхні, що потребують механічної обробки на металорізальних верстатах. В залежності від призначення деталей, вимог до точності розмірів, відхилень форми і розташування поверхонь, шорсткості, твердості, площі оброблюваних поверхонь застосовуються різноманітні методи обробки, серед яких найпоширенішими є стругання, фрезерування, протягування, шліфування. Серед деталей велику групу складають деталі, що потребують високоточної двосторонньої обробки торцевих поверхонь. Це поршневі пальці, пружини стиску дисків зчеплення, напівмуфти, хрестовини карданних валів, хрестовини муфт, роликові підшипники кочення в яких необхідна обробка внутрішніх, зовнішніх кілець та роликів. Підвищення точності та продуктивності обробки їх торцевих поверхонь є важливою науково-практичною задачею, вирішення якої дозволить як підвищити термін служби вузлів та агрегатів, так і здешевити їх виробництво, а отже підвищити рівень конкурентоспроможності продукції.

Отримання високої точності і продуктивності обробки на двосторонніх торцешліфувальних верстатах забезпечується за рахунок зняття припуску за один прохід, одночасної обробки відразу двох торців кількох деталей, що знаходяться в зоні обробки, простоти завантаження-вивантаження з можливістю автоматизувати цей процес, мінімізації похибки базування, суміщення в часі процесів завантаження, обробки та вивантаження, створення неперервності потоку заготовок [4].

При шліфуванні кругами з плоскими торцями, паралельними один одному і торцям оброблюваних деталей спочатку весь припуск зрізається периферійною ділянкою круга на вході в зону різання, а потім, після обробки партії деталей, забірним конусом, що утворився в результаті зносу. Чистове шліфування та виходжування здійснюється торцями кругів. Даний спосіб шліфування має низьку продуктивність, так як на торцевій поверхні круга знімання металу не відбувається. Відсутність орієнтування кругів забезпечує шліфування без розрахункової геометричної похибки, тому його застосовують для обробки високоточних торців з малими припусками на обробку, а також при обробці великогабаритних плоских поверхонь (пластин, магнітів, кришок, фланців) на напівавтоматах для двостороннього і одностороннього шліфування, де орієнтування не допускається необхідною точністю

Для підвищення ефективності шліфування, зменшення теплового впливу необхідна профільна правка круга. Найбільш раціональним є комбінований спосіб правки, представлений на рисунку 3.

Круги 1 орієнтують в горизонтальній площині на кут  $\gamma$  і у вертикальній - на кут  $\nu$  з метою зняття припуску за один прохід. Спочатку вся торцева поверхня круга правиться в площині, перпендикулярній осі обертання круга за допомогою стаціонарного пристрою верстата. Після цього, алмазними олівцями 4, закріпленими на диску подачі заготовок 2, правлять ділянки, які прилягають до зовнішніх діаметрів кругів. При цьому величина радіуса правки, по якому переміщується вершина алмазного олівця, вибирається в залежності від форми та розмірів оброблюваної заготовки. У робочому циклі шліфування комбінована правка дає можливість розподілити весь припуск між чорною і чистою ділянками, збільшити робочу довжину дуги контакту деталей з кругом, що підвищує продуктивність обробки, знижує температуру в зоні обробки. Висока точність форми торця деталі

забезпечується на калібрувальній ділянці, прилеглий до зовнішнього діаметру круга, при виході із зони обробки. При цьому калібрувальна ділянка при вході в зону шліфування не приймає участь у зніманні припуску і має високу стійкість, так як напрямні елементи 5 унеможливають її контакт із заготовками.

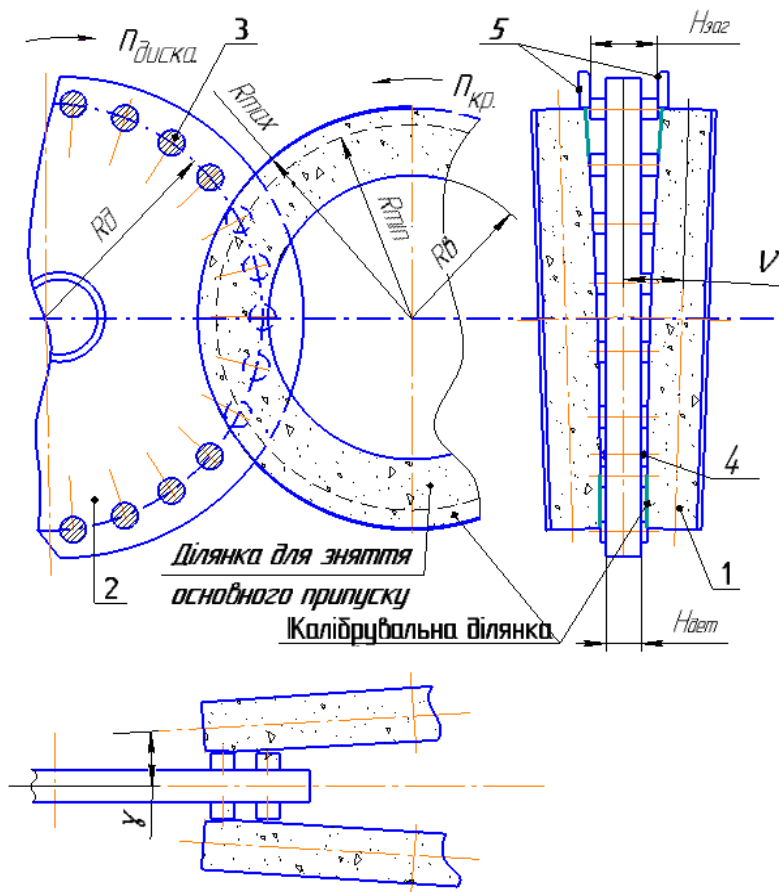


Рисунок 1 – Комбінований спосіб правки

Джерело: розроблено авторами

Проведем дослідження точності формоутворення деталей при запропонованому способі шліфування кругами з калібрувальною ділянкою

Радіус-вектор  $\vec{R}_i$  точок калібрувальної ділянки торцевої поверхні шліфувального круга визначається траєкторією руху алмазного олівця:

$$\vec{R}_i(\theta_B, \theta) = A^6(\theta) \cdot A^1(-X_c) \cdot A^5(\nu) \cdot A^4(\gamma) \cdot A^2(Y_c) \cdot A^1(X_c) \cdot A^3(Z_c) \cdot A^6(-\theta_B) \cdot A^1(R_B) \cdot e^{-4} \quad (1)$$

де  $A^1, \dots, A^6$  – матриці перетворення систем координат, які моделюють рухи і повороти вздовж і навколо координатних осей;

$\theta, \theta_B$  – параметри поверхні різального інструменту, які відповідають за кутове і радіальне положення точки робочої поверхні круга;

$X_c, Y_c, Z_c$  – розміри, що визначають положення центра сферичного пальця відносно барабана подачі і робочої площини круга,

$\gamma, \nu$  – кути орієнтації шліфувальної бабки в горизонтальній і вертикальній площинах;

$R_B$  – радіальний розмір розташування осей заготовок в барабані подачі;  
 $e4 = (0,0,0,1)^T$  – радіус-вектор вершини діамантового олівця, що співпадає з початком координат.

Рівняння 1 описує калібрувальну ділянку торця інструмента при його профілюванні на верстаті, яка наведена на рис. 2.

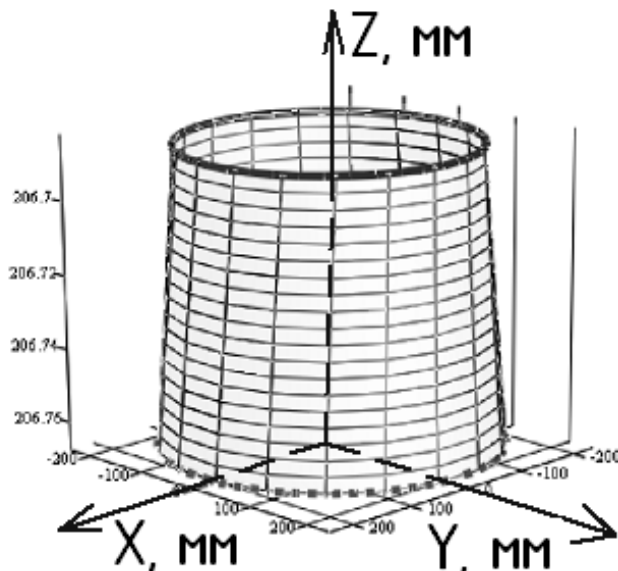


Рисунок 2 – Калібрувальна ділянка круга при збільшенні розмірів вздовж вісі Z в 1000 разів  
*Джерело: розроблено авторами*

Проведені в роботі [4] теоретичні дослідження впливу довжини калібрувальної ділянки, обертання заготовок, кутів орієнтації кругів на точність обробки показали наступні результати.

1. Довжина калібрувальної ділянки повинна бути не меншою діаметру оброблюваної заготовки, але робити її надто великою недоцільно, оскільки точність при цьому фактично не збільшується, а довжина лінії контакту деталі з кругом зменшується.

2. Для підвищення точності обробки необхідно щоб заготовка що обробляється, якщо вона циліндричної форми, обернулась на калібрувальній ділянці не менше одного разу.

3. Найкращі по точності результати отримані при співвідношенні кутів орієнтації в вертикальній  $\nu$  і горизонтальній  $\gamma$  площинах  $\gamma = 1,57 \cdot \nu$ . Чим більше відрізняється це співвідношення, тим нижча точність.

Для подачі заготовок в зону обробки між двома шліфувальними кругами залежно від конфігурації та розмірів конкретної заготовки може застосовуватись один із способів (рис.3): а- з прямолінійним рухом заготовок на прохід; б- з круговим рухом заготовок на прохід; в- з маятниковим рухом заготовок; г – врізанням. На рисунку: 1- шліфувальний круг; 2 – заготовка; 3 – напрямні лінійки; 4 – диск; 5 – маятник. Найбільш продуктивним і таким, що потребує мінімального переналагодження верстату є спосіб шліфування з круговим рухом заготовок на прохід. Верстат у заводському виконанні оснащений механізмом подачі заготовок в зону обробки завантажувальним диском, що приводиться до обертання двигуном постійного струму від редуктора, тому дуже легко і в широкому діапазоні можна змінювати величину подачі.

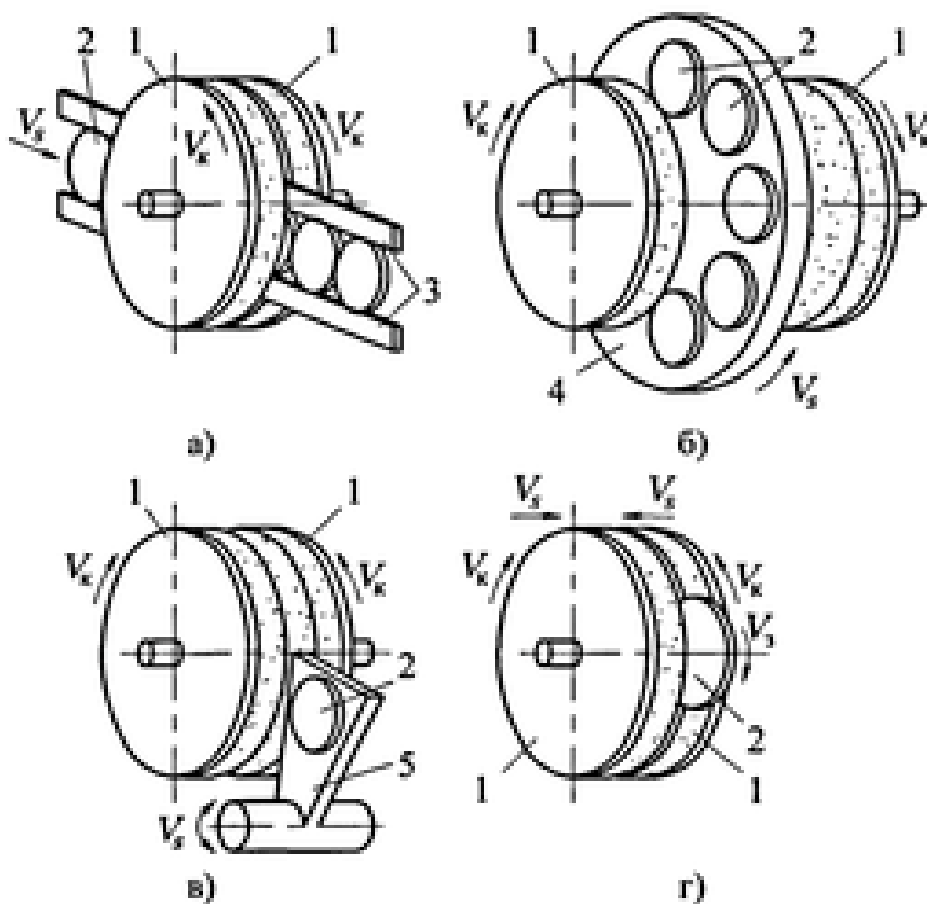


Рисунок 3 - Способи двостороннього торцевого шліфування

Джерело: на підставі [4]

**Висновки.** У роботі досліджено та запропоновано високопродуктивний спосіб обробки для плоских поверхонь деталей, що входять до складу вузлів і агрегатів автомобілів, в противіс силовому шліфуванню, на двосторонньому торцешліфувальному верстаті спеціально профільованими кругами з конічною калібрувальною ділянкою на торці. Це дозволяє підвищити їх параметри точності, шорсткості та продуктивності обробки, що є важливою науково-практичною задачею, вирішення якої дозволить як підвищити термін служби вузлів та агрегатів, так і здешевити їх виробництво, а отже підвищити рівень конкурентоспроможності продукції.

#### Список літератури

1. Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гудь В.З., Левкович М.Г., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. Основи технології виробництва і ремонту автомобілів: навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ ім Івана Пулюя, 2021. 544 с.
2. Кальченко В. І., Кальченко В. В., Венжега В. І. Відновлення деталей автомобілів: навч. посіб. Чернівці: ЧНТУ, 2013. 192 с.
3. Радик Д. Л., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик М. Д. Технологічні методи ремонтного відновлення деталей машин: навч. посіб. Тернопіль: ТНТУ, 2014. 213 с.
4. Венжега В.І. Підвищення ефективності шліфування торців при схрещених осях деталі та круга з калібрувальною ділянкою: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Національний технічний ун-т

- "Харківський політехнічний ін-т". Харків, 2009. 214с.
5. Kalchenko V., Kalchenko V., Kolohoida A., Kalchenko O., Kalchenko, D. Building a model of the process of shaping tapered calibrating areas of wheels at the two-sided grinding of round ends. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 1(116). P. 62–70.
  6. Кальченко В.І., Кальченко Д.В., Следнікова О.С. 3D-модельовання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при двосторонньому торцевому шліфуванні некруглих деталей орієнтованими кругами. *Збірник наукових праць Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Високі технології в машинобудуванні*. 2016. Вип. 1 (26). С. 31-39.
  7. Кальченко В.І., Венжега В.І., Следнікова О.С., Кальченко Д.В. Теоретичне та експериментальне дослідження процесів зняття припуску, зносу кругів, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування торців деталей. *Збірник наукових праць Чернігівського національного технологічного університету. Технічні науки та технології*. 2016. Вип.4 (6). С. 25-34.
  8. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Следнікова О.С., Кальченко Д.В. Дослідження процесу шліфування торців орієнтованих деталей профільованими кругами. *Вісник Черкаського державного технічного університету. Сер. Технічні науки*. 2016. Вип. 4. С. 69-79.
  9. Kalchenko D. Theoretical and experimental study of double-sided grinding process of round face ends by orientated wheels with calibrating sections. *Scientific Journal of TNTU. Manufacturing engineering and automated processes*. 2018. Vol 89. No 1. P. 100–112.
  10. Сіра Н.М., Кологойда А.В., Литвин О.О., Кальченко Д.В. Теоретичне та експериментальне дослідження процесу двостороннього шліфування торців деталей із різними діаметрами. *Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»*. 2018. Т. 29 (68), ч. 1. С. 19-26.
  11. Kalchenko Volodymyr, Kalchenko Vitaliy, Kolohoida Antonina, Yeroshenko Andrii, Kalchenko Dmytro . Building a Model of Dressing the Working Surfaces of Wheels During the Two-Side Grinding of Round End Faces at CNC Machines . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1, No. (1 (115)). P. 86–93. (Scopus)
  12. Kalchenko Volodymyr, Kalchenko Vitaliy, Kolohoida Antonina, Kalchenko Olga, Kalchenko Dmytro. Building a Model of the Process of Shaping Tapered Calibrating Areas of Wheels at the Two-Sided Grinding of Round Ends . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 2, No.1 (116). P.62–70. (Scopus)

## References

1. Gevko, I.B., Rohatynskiy, R.M., Lyashuk, O.L., Gud, V.Z., Levkovich, M.G., Stashkiv, M.Ya. & Sipravskaya, M.D. (2021). *Osnovy tekhnologii vyrobnystva i remontu avtomobiliv: navchal'nyy posibnyk*. [Fundamentals of automobile production and repair technology: a study guide]. Ternopil: Ivan Pulyuy TNTU [in Ukrainian].
2. Kalchenko, V.I., Kalchenko, V.V. & Venzhega, V.I. (2013). *Vidnovlennia detalej avtomobiliv* [Restoration of car parts]. Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].
3. Radikm D.L., Levkovychm M.G., Vasylykivm V.V. & Radikm M.D. (2014). *Tekhnologichni metody remontnoho vidnovlennia detalej mashyn* [Technological methods of repairing machine parts]. Ternopil: TNTU [in Ukrainian].
4. Venzhega, V.I. (2009). Pidvyschennia efektyvnosti shlifuvannia tortsiv pry skhreschenykh osiakh detali ta kruha z kalibruval'noiu diliankoiu [Increasing the efficiency of grinding the ends with crossed axes of the part and the circle with a calibration area]. *Candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
5. Kalchenko V., Kalchenko V., Kolohoida A., Kalchenko O. & Kalchenko, D. (2022). Building a model of the process of shaping tapered calibrating areas of wheels at the two-sided grinding of round ends. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(116), p. 62–70 [in English].
6. Kalchenko, V.I., Kalchenko, D.V. & Slednikova, O.S. (2016). 3D-modeliuvannia instrumentiv, protsesu zniattia pryusku ta formoutvorennia pry dvostoronn'omu tortsevomu shlifuvanni nekrulnykh detalej oriientovanykh kruhamy [3D modeling of tools, the process of allowance removal and forming during two-sided face grinding of non-round parts with oriented circles]. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyy instytut». Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni – Collection of scientific works of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. *High technologies in mechanical engineering, Vol. 1 (26)*, 31-39 [in Ukrainian].
7. Kalchenko, V.I., Venzhega, V.I., Slednikova, O.S. & Kalchenko, D.V. (2016). Teoretychne ta eksperymental'ne doslidzhennia protsesiv zniattia pryusku, znosu kruhiv, tochnosti formoutvorennia ta

- teplonapruzhnosti pid chas shlifuvannia tortsiv detalej [Theoretical and experimental study of the processes of removal of allowance, wear of wheels, accuracy of forming and thermal stress during grinding of the ends of parts]. *Zbirnyk naukovykh prats' Chernihivs'koho natsional'noho tekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Collection of scientific papers of the Chernihiv National University of Technology. Technical sciences and technologies, Issue 4 (6)*, 25-34. [in Ukrainian].
8. Kalchenko, V.I., Kalchenko, V.V., Slednikova, O.S. & Kalchenko, D.V. (2016). Doslidzhennia protsesu shlifuvannia tortsiv oriientovanykh detalej profil'ovanykh kruhamy [Study of the process of grinding the ends of oriented parts with profiled circles]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Ser. Tekhnichni nauky – Bulletin of the Cherkasy State Technical University. Ser. Technical sciences, Issue 4*, 69-79 [in Ukrainian].
  9. Kalchenko, D. (2018). Theoretical and experimental study of double-sided grinding process of round face ends by oriented wheels with calibrating sections. *Scientific Journal of TNTU. Manufacturing engineering and automated processes, Vol 89, No. 1*, 100–112 [in English].
  10. Syra, N.M., Kologoyda, A.V., Lytvyn, O.O. & Kalchenko, D.V. (2018). Teoretychne ta eksperymental'ne doslidzhennia protsesu dvostoronn'oho shlifuvannia tortsiv detalej iz riznymy diametramy [Theoretical and experimental study of the process of two-sided grinding of the ends of parts with different diameters]. *Naukovyj zhurnal «Vcheni zapysky Tavrijs'koho natsional'noho universytetu imeni V.I. Vernads'koho» – Scientific journal "Scientific Notes of the Tavra National University named after V.I. Vernadsky", Vol. 29 (68), Part 1*, 19-26 [in Ukrainian].
  11. Kalchenko, V., Kalchenko, V., Kolohoida, A., Yeroshenko, A. & Kalchenko, D. (2022). Building a Model of Dressing the Working Surfaces of Wheels During the Two-Side Grinding of Round End Faces at CNC Machines *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1, No. 1 (115). P. 86–93 [in English].
  12. Kalchenko, V., Kalchenko, V., Kolohoida, A., Kalchenko, O. & Kalchenko, D. (2022). Building a Model of the Process of Shaping Tapered Calibrating Areas of Wheels at the Two-Sided Grinding of Round Ends. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* Vol. 2, No. 1 (116), P.62–70 [in English].

**Volodymyr Kalchenko**, Prof., DSc., **Volodymyr Venzhega**, Assoc. Prof., PhD tech sci.,

**Hennadiy Pasov**, Assoc. Prof., PhD tech sci.

*Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine*

### **Increasing the Accuracy and Productivity of Processing Flat Surfaces of Parts that Are Part of Car Assemblies and Assemblies**

The use of new reserves of the process of grinding the flat surfaces of parts allows to significantly increase the productivity of processing, reduce the uneven wear of the wheel profile and increase the accuracy and quality of the processed surfaces, therefore, it is an urgent scientific problem, the solution of which is of important national economic importance.

The analysis of research and publications showed the importance of the development and implementation of grinding technologies with crossed axes of grinding wheels and workpieces, for which a special profile adjustment of the wheel is carried out, which makes it possible to obtain an area for removing the rough allowance and a calibration area on the surface of the wheel. At the same time, the entire allowance is cut in the area adjacent to the calibration area. The calibration section at the entrance of the parts to the processing area does not participate in cutting the allowance, has high stability and at the exit forms the final accuracy of the end surfaces. The paper describes the calibration area of the tool end when it is profiled on a machine with a diamond pencil using the transformation matrices of coordinate systems that model movements and rotations along and around the coordinate axes, the optimal length of the calibration area and the ratio of the orientation angles of the grinding wheels in the horizontal and vertical planes are proposed, which give the best results in terms of accuracy.

This method makes it possible to increase their parameters of accuracy, roughness and processing productivity, which is an important scientific and practical task, the solution of which will allow both to increase the service life of nodes and aggregates, and to reduce the cost of their production, and therefore to increase the level of competitiveness of products. **double-sided face grinding, combined grinding wheels, profiled and oriented grinding wheels, accuracy of end surface processing**

*Одержано (Received) 28.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 01.04.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 629.02

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.196-204](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.196-204)

**Я.В. Кужельний**, канд. техн. наук, **О.О. Аксьонова**, асист., **Д.С. Машковцев**, асист.  
Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна  
e-mail: [k.y.v.immortal@gmail.com](mailto:k.y.v.immortal@gmail.com)

## Аналіз конструктивних особливостей різних типів коробок перемикачів передач автомобілів

У роботі проведено аналіз конструкцій різних типів коробок перемикачів передач автомобілів. Наведено призначення, вплив на тягово-швидкісні властивості, а також, основні вимоги, які повинні забезпечувати КПП. Розглянуто особливості конструкції механічних двовальних та тривальних КПП. Наведено будова та основні елементи конструкції гідромеханічної передачі (ГМП), КПП із варіаторами та коробки передач із подвійним зчепленням. Виділено основні переваги та недоліки кожного типу розглянутих КПП, перспективи їх подальшого розвитку.

**коробка перемикачів передач, механічна, гідромеханічна передача, автоматична КПП, клиноремінний варіатор, тороїдний варіатор, КПП із подвійним зчепленням**

**Постановка проблеми.** Автомобілі комплектуються різними типами коробок перемикачів передач. Саме ці механізми впливають на тягово-швидкісні та динамічні властивості автомобіля. В залежності від типу коробки перемикачів передач керування ними може бути ручним, автоматичним або комбінованим. Аналіз конструктивних особливостей коробок перемикачів передач дає можливість визначити їх вплив на експлуатаційні властивості автомобілів, визначити їх переваги та недоліки, можливі напрямки розвитку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основи конструкції сучасного автомобіля розглянуто в роботах [1, 2].

У роботі [3] досліджено динаміку розгону автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння та обладнаним безступінчастою автоматичною коробкою передач.

Робота [4] присвячена дослідженню динаміки автомобіля з дискретно-змінною і неперервно-змінною трансмісією. Розглянуто структуру, отримано залежності та показано ефективність автомобіля з неперервно-змінною трансмісією.

В роботі [5] проаналізовано та проведено порівняння сучасних конструкцій здвоєних зчеплень в складі трансмісій транспортних засобів. Наведено варіант удосконалення будови здвоєного зчеплення, яке забезпечує зменшення витрат енергії на управління та при передачі крутного моменту.

У роботі [6] було спроектовано комбіновану коробку передач легкового автомобіля. Ця коробка передач складається з механічної частини та варіаторної (безступінчастої). Проведено дослідження використання механічних коробок передач у автомобільних заторах. Описано принцип роботи спроектованої коробки передач та проведено дослідження температури нагріву фрикційного диску.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є аналіз конструктивних особливостей різних типів коробок перемикачів передач автомобілів.

**Виклад основного матеріалу.** До головних елементів трансмісії автомобіля відноситься коробка перемикачів передач (КПП). КПП призначена для зміни та передачі крутного моменту двигуна автомобіля в широкому діапазоні відповідно до сил зовнішнього опору та швидкості руху автомобіля. Також, коробка перемикачів передач дає можливість рухатись автомобілю заднім ходом.



КПП впливає на тягово-швидкісні властивості, що являють собою сукупність властивостей, які визначають можливі діапазони швидкостей руху і граничну інтенсивність розгону при русі автомобіля на тяговому режимі в різних експлуатаційних умовах. Чим кращі тягово-швидкісні властивості, тим менші витрати часу на перевезення. Відповідно, це сприятиме зростанню продуктивності автомобіля [7].

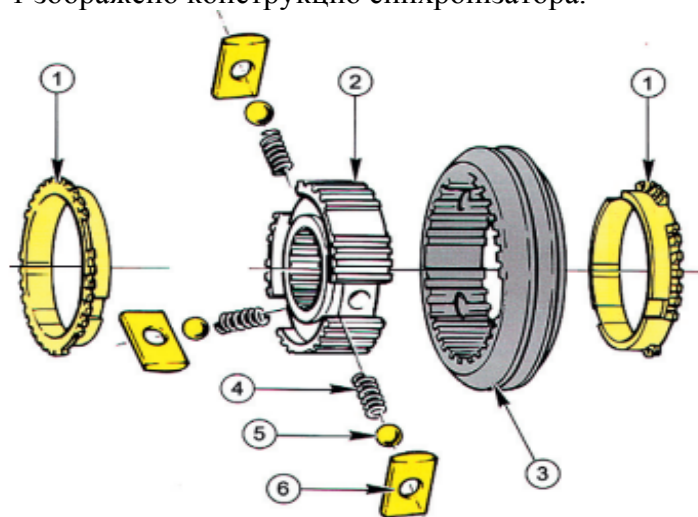
Коробка перемикачів передач повинна забезпечувати наступні вимоги:

- 1) високий коефіцієнт корисної дії;
- 2) необхідні тягово-швидкісні властивості автомобіля при заданих характеристиках двигуна;
- 3) легкість у керуванні та переключенні передач, безшумність під час роботи.

КПП, в залежності від конструкції, поділяються на: ступінчасті, безступінчасті та комбіновані.

До ступінчастих відносяться механічні КПП із зубчастими шестернями. Найчастіше, вони мають чотири, п'ять або шість передач переднього ходу та одну передачу заднього ходу. Також ступінчасті коробки передач у своїй конструкції можуть мати різне число валів. Відносно довгий час на автомобілях застосовувалися лише тривальні коробки передач. Крутний момент від двигуна передається за допомогою зчеплення на ведучий вал (первинний) коробки передач, на якому знаходиться шестерня. Паралельно ведучому валу розташовується проміжний вал з набором з'єднаних з ним шестерень. Ведучий вал знаходиться на одній осі з веденим (вторинним) валом і може бути з'єднаний з ним на пряму для отримання прямої передачі з передавальним числом, що дорівнює одиниці. Крім того, одна з шестерень проміжного валу знаходиться в постійному зачепленні з шестернею ведучого валу, а інші - з шестернями, що вільно обертаються на веденому валу. Для руху автомобіля заднім ходом встановлено ще одну шестерню між шестернею проміжного та шестернею веденого валу, що дозволяє веденому валу змінити напрямок свого обертання. Перемикачів передач здійснюється пересуванням шестерень, які по черзі входять у зачеплення з іншими шестернями, або блокуванням шестерень на валу за допомогою синхронізаторів [8].

На рисунку 1 зображено конструкцію синхронізатора.



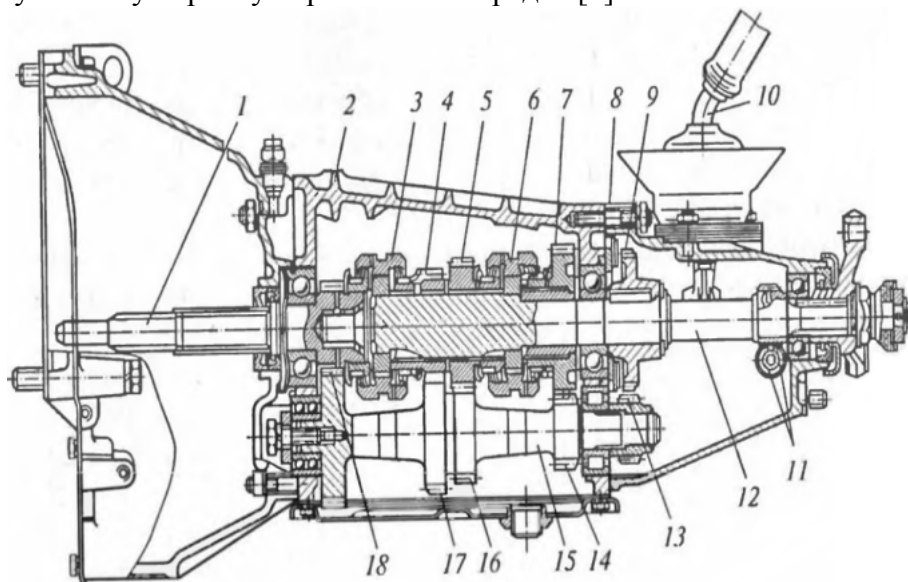
1 – блокуючі кільця; 2 – маточина; 3 – ковзуюча муфта включення; 4 – пружина;  
5 – кулька; 6 – сухар

Рисунок 1 – Конструкція синхронізатора

Джерело: [2]

Синхронізатор – спеціальна фрикційна муфта, яка забезпечує вирівнювання кутових швидкостей шестерень, що вільно обертаються на валу, з кутовою швидкістю самого валу і не допускає їх з'єднання поки кутові швидкості шестерні та вала не зрівняються.

В залежності від кількості валів, коробки перемикання передач бувають двовальні, тривальні та багатовальні. На рисунку 2 зображено трьохвальну чотирьохступінчасту коробку перемикання передач [9].



1 – ведучий вал; 2 – картер; 3,6 – синхронізатори; 4,5,7,9 – шестерні веденого вала; 8 – кришка;  
10 – ричаг; 11 – черв'ячна пара; 12 – ведений вал; 13 – шестерня заднього ходу; 15 – проміжний вал;  
14,16,17 – шестерні проміжного вала; 18 – шестерня ведучого вала

Рисунок 2 – Трьохвальна чотирьохступінчаста коробка перемикання передач

Джерело: [9]

Трьохвальні коробки характеризуються наявністю прямої передачі. При цьому на прямій передачі тривальна коробка має більш високий ККД, ніж двовальна, тому що в цьому випадку зменшуються втрати на тертя. На решті передач тривальної коробки в зачепленні знаходяться дві пари зубчастих коліс, у той час як у двох вальних — одна.

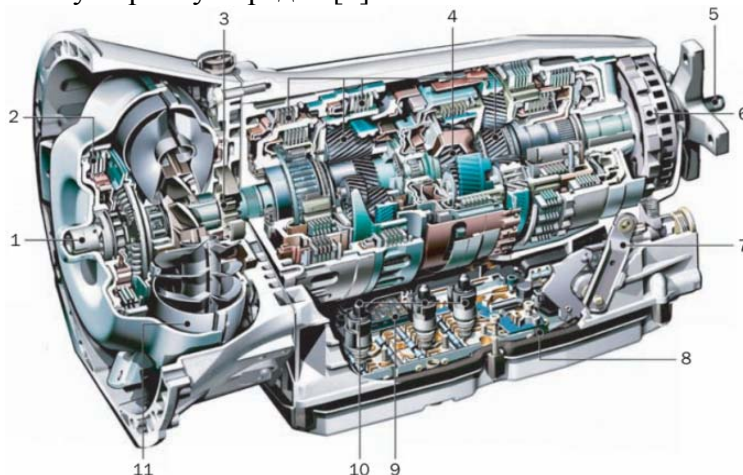
Двовальні коробки передач застосовуються в передньопривідних та задньопривідних (із заднім розташуванням двигуна) автомобілях. Конструктивно їх поєднують в одному блоці з двигуном, зчепленням, головною передачею та диференціалом. Поперечне розташування коробки дозволяє застосовувати головну передачу з циліндричними шестернями. При поздовжньому компонуванні застосовується головна передача з конічними або гіпоїдними шестернями, остання є більш складною у виготовленні та регулюванні. Основні переваги двовальних коробок передач: простота конструкції, невелика маса, високий ККД на проміжних передачах (при передачі крутного моменту бере участь лише одна пара шестерень).

У той же час у двовальній коробці передач немає прямої передачі (коли в передачі моменту не беруть участь шестерні) і максимальний ККД на вищій передачі нижче, ніж на прямій передачі тривальної коробки. Максимальне передавальне число однієї зубчастої пари коробки передач не повинно перевищувати деякої межі, близької до 4, перевищення якої призводить до збільшення габаритів і підвищення рівня шуму. Це обмежує сферу застосування двовальних коробок передач тільки легковими автомобілями малого класу.

Коробка, яка розміщена повздовжньо, може бути легко збільшена по довжині для розміщення додаткових передач. Поперечно розташований двигун та коробка передач мають обмеження по ширині, що визначається відстанню між колісними арками автомобіля.

Автоматична коробка перемикачів передач призначена для зміни передавального відношення в автоматичному режимі. До автоматичних КПП відносяться гідромеханічна коробка передач, клиноремінний та тороїдний варіатори, коробка передач із подвійним зчепленням.

Гідромеханічна передача (ГМП) має у своїй будові три основних частин: гідротрансформатор, механічна коробка передач та система керування. На рисунку 3 зображено гідромеханічну коробку передач [9].



- 1 – ведучий вал; 2 – фрикціон блокування гідротрансформатора з гасителем крутильних коливань;  
3 – масляний насос з контролем тиску; 4 – фрикціони та планетарні передачі; 5 – вихідний вал;  
6 – стоянкове гальмо; 7 – селектор; 8 – електронний блок керування; 9 – електронний блок  
переключення передач; 10 – високошвидкісні соленоїди; 11 – гідротрансформатор

Рисунок 3 – Гідромеханічна коробка передач

Джерело: [9]

КПП із варіаторами відносяться до безступінчастих та дають можливість отримати будь-яке передавальне число в заданому обмеженому діапазоні.

Особливість конструкції тороїдного варіатора полягає у тому, що між двома колесами, які мають тороїдну робочу поверхню, розміщуються ролики. Одне колесо ведуче, інше – ведене [9]. На рисунку 4 зображено загальний вигляд тороїдного варіатора.

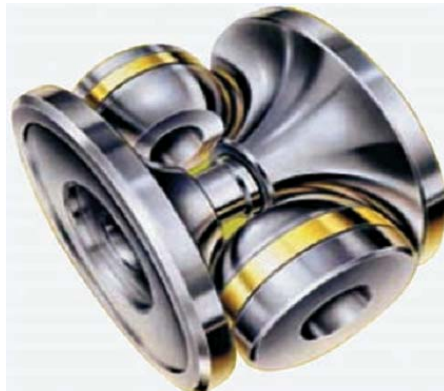


Рисунок 4 – Загальний вигляд тороїдного варіатора

Джерело: [9]

Передача крутного моменту здійснюється за рахунок сил тертя між колесами та роликками. Зміна передавального числа тороїдного варіатора відбувається за рахунок зміни положення осі роликів в поперечній площині.

На рисунку 5 наведено загальний вигляд коробки передач з клиноремінним варіатором.

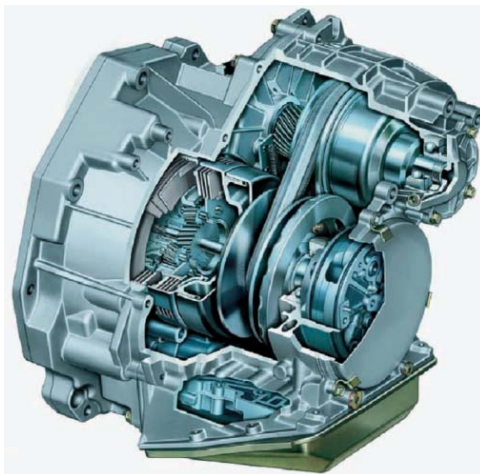


Рисунок 5 – Загальний вигляд коробки передач з клиноремінним варіатором

Джерело: [9]

До основних частин клиноремінного варіатора відносяться: шків, ремінь та система керування. Зміна крутного моменту відбувається за рахунок переміщення шківів. На рисунку 6 зображені положення роботи варіатора.

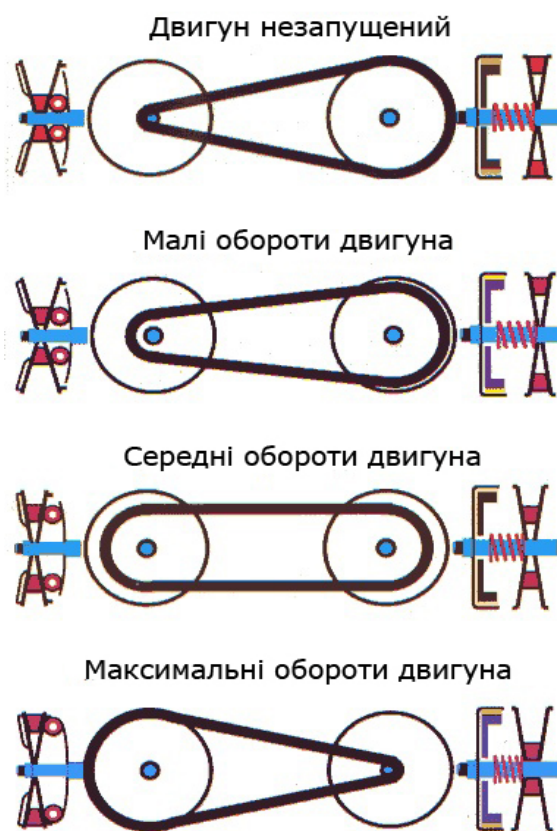


Рисунок 6 – Положення роботи варіатора

Джерело: [10]



Особливістю конструкції клиноремінного варіатора є розрізні конусні шківів ведучого і веденого валів, з'єднані приводним ремнем.

Момент тут передається, як і в будь-якій ремінній передачі, але її передавальне відношення може змінюватися. Для цього зсувають і розсувають конічні диски, що утворюють шківів ремінної передачі, зазвичай це робиться гідравлічним приводом під контролем електроніки. Причому переміщення конусів на обох шківів відбувається одночасно.

Якщо розсувати ведучі диски та здвигати ведені, то радіус обкатування на ведучих дисках зменшується, а на ведених збільшується – таким чином збільшується момент та зменшується швидкість. Коли обидва шківів перебувають у середньому положенні, передавальне відношення дорівнює одиниці. Якщо розсувати ведені диски і здвигати ведучі, то радіус обкатування на ведучих збільшується, а на ведених зменшується – збільшується швидкість і зменшується крутний момент.

Особливістю конструкції коробки передач із подвійним зчепленням полягає у перемиканні передач без розриву потоку потужності. У коробці передач такого типу крутний момент від двухмасового маховика двигуна передається на два багатодискові зчеплення, які пов'язані з відповідними співвісними ведучими валами. Один із цих валів розміщується всередині іншого [9].

Паралельно ведучим валам розташовані два ведені вали. З одним із ведучих валів жорстко пов'язані ведучі шестерні непарних передач (1, 3, 5), а з іншим — ведучі шестерні парних передач (2, 4, 6 та передача заднього ходу). На ведених валах знаходяться шестерні постійного зачеплення відповідних передач, які можуть жорстко з'єднуватися з веденими валами за допомогою синхронізаторів. На рисунку 7 зображено коробку передач із подвійним зчепленням.

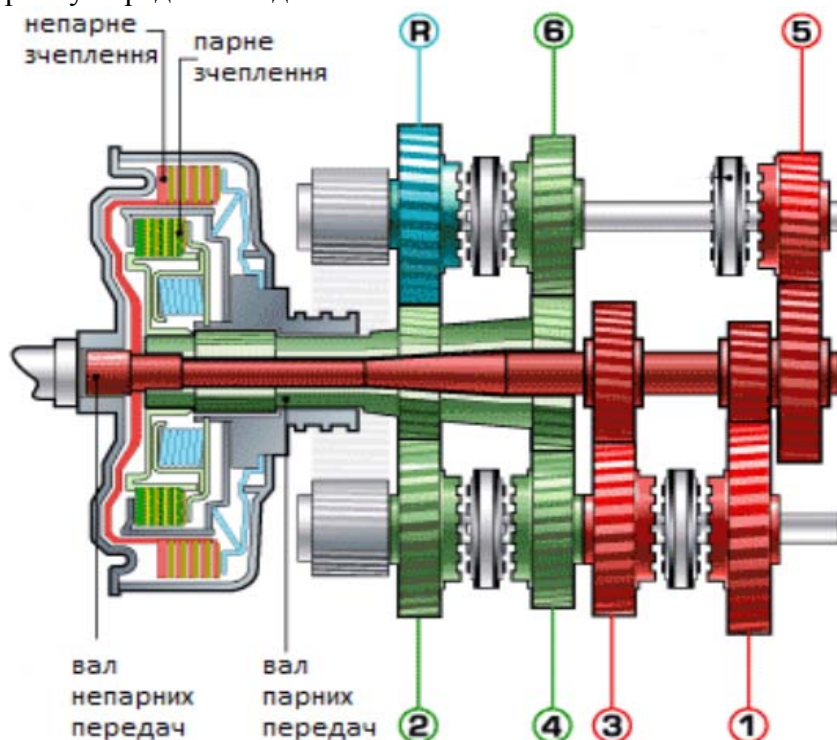


Рисунок 7 – Коробка передач із подвійним зчепленням

Джерело: [11]

Керування зчепленнями та переміщенням синхронізаторів здійснюється за допомогою гідравлічних виконавчих пристроїв. Необхідний тиск у гідравлічній системі

створюється електричним гідронасосом. Керує роботою коробки передач електронний блок керування, який отримує інформацію від датчиків, які розташовані у коробці, та пов'язаний високошвидкісною шиною з електронним блоком керування двигуном. На рисунку 8 наведено основні складові коробки передач із подвійним зчепленням.

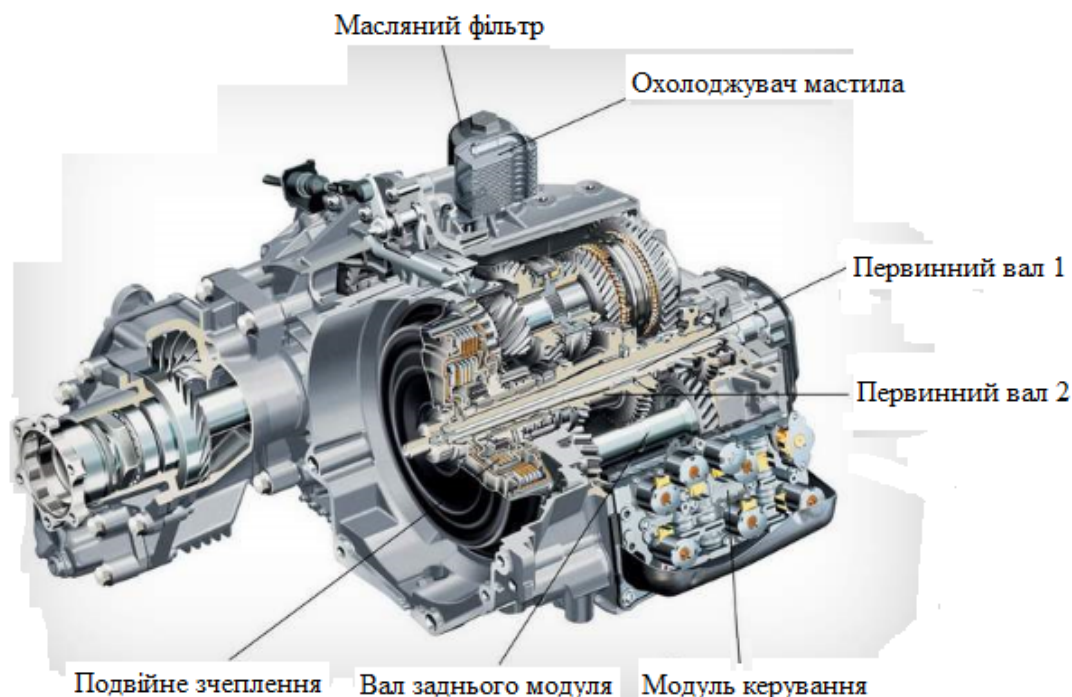


Рисунок 8 – Основні складові коробки передач із подвійним зчепленням

Джерело: [11]

**Висновки.** Проаналізувавши різні конструкції КПП, можна виділити їх переваги та недоліки.

Переваги механічної КПП полягають у простоті конструкції, невисокої вартості, простоті в обслуговуванні, діагностуванні та ремонті. Також деталі для ремонту мають невисоку вартість.

До недоліків можна віднести обмежений діапазон передавальних чисел, розрив потоку потужності під час перемикання передач (при цьому зменшуються тягові та швидкісні характеристики, погіршується динаміка розгону).

До основних переваг ГМП можна віднести відсутність педалі зчеплення, відсутність розриву потоку потужності при переключенні передач, що підвищує прохідність автомобіля, підвищення довговічності деталей трансмісії та двигуна за рахунок того, що гідротрансформатор знижує динамічні навантаження.

Основні переваги автоматичних коробок перемикання передач: простота та комфортність керуванням автомобілем, що призводить до зменшення втомленості водія, безрозривна передача потоку потужності, більший діапазон передавальних чисел, висока швидкодія.

До основних недоліків ГМП та автоматичних КПП відносяться: складність конструкції, висока вартість виготовлення, діагностування та ремонту, підвищена витрата потужності, яка обумовлена роботою виконавчих механізмів. На даний час конструктивні особливості варіаторів (для клиноремінного – ремінь, для торойдного – пляма контакту диска та ролика) обмежують їх використання з двигунами великої потужності.

Механічна КПП зарекомендувала себе як простий у конструкції та надійний в експлуатації агрегат. Щодо автоматичних КПП, то перспективи їх розвитку полягають у розробці нових електронних систем керування та використання сучасних матеріалів із високими експлуатаційними показниками. Також одним із варіантів підвищення ефективності виробництва коробок перемикач є використання високопродуктивних способів механічної обробки [12, 13].

## Список літератури

1. Сирота В.І., Сахно В.П. Автомобілі. Основи конструкції. Навчальний посібник. Київ: Арістей, 2007. 288 с.
2. Tom Denton. Automobile mechanical and electrical systems: automotive technology: vehicle maintenance and repair. Elsevier Ltd, 2011. Pp. 512.
3. Подригало М.А., Коряк О.О. Динаміка автомобіля з автоматичною безступінчастою коробкою передач. *Вісник ХНАДУ*. 2020. № 90. С. 73–79. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.73.
4. Миськів Т. Г. Динаміка автомобіля з дискретно-змінною і неперервно-змінною трансмісією. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів*. 2017. Т. 866. С. 181–187.
5. Сергієнко М.С., Свідло В.С., Кузьменко Л.В. Аналіз сучасних конструкцій здвоєних зчеплень транспортно-тягових машин. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2018. № 49 (1325). С. 50–57.
6. Островерх О.О. Розробка і впровадження комбінованої коробки передач та її застосування на легкових автомобілях. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія Автомобіле- та тракторобудування*. 2021. №1 С. 22–31. DOI: 10.20998/2078-6840.2021.1.03.
7. Волков В.П., Вільський Г.Б. Теорія руху автомобіля: Підручник. Суми: Університетська книга, 2010. 320 с.
8. Кисликов В.Ф., Лущик В. В. Будова й експлуатація автомобілів: підруч.. 6-ге вид. Київ: Либідь, 2006. 400 с.
9. Кальченко В.В., Кальченко В.І., Кужельний Я.В., Скляр В.М. Аналіз конструкцій коробок перемикач передач автомобілів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: зб. матеріалів конф. XI-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 26 - 27 травня 2021 р. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. Т. 1. С.108-109.
10. Вариатор. *Принцип роботи*: веб-сайт. URL: <http://zauto.com.ua/variator-pryntsyp-roboty/> (дата звернення: 17.03.2023).
11. Механічна коробка передач. *Роботизована КПП*: веб-сайт. URL: <https://avtoad.com.ua/base/mechanicna-korobka-peredac-robotizovana-kpp> (дата звернення: 17.03.2023).
12. Kalchenko V., Kalchenko V., Sira N., Kuzhelnyi Ya., Sklyar V. Model of milling the root and connecting rod necks of the crankshaft for one manufacturing process. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. Pp. 160-169. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4\_16.
13. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Кужельний Я.В., Морочко В.В. Експериментальне дослідження чистового однопрохідного шліфування циліндричної поверхні вала орієнтованим інструментом *Технічні науки та технології*. 2019. №2 (16). С. 54–61. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-2(16)-54-61.

## References

1. Syrota, V.I. & Sakhno, V.P. (2007), *Avtomobili. Osnovy konstruktсии. Navchalnyi posibnyk [Basics of construction. Tutorial]*. Kyiv: Aristei [in Ukrainian].
2. Tom, D. (2011). *Automobile mechanical and electrical systems: automotive technology: vehicle maintenance and repair*. Elsevier Ltd [in English].
3. Podryhalo, M.A. & Koriak, O.O. (2020). Dynamika avtomobilia z avtomatychnoiu bezstupinchastoiu korobkoiu peredach [Dynamics of a car with an automatic continuously variable transmission]. *Visnyk KhNADU – Visnyk KhNADU, 90, 73–79* [in Ukrainian].
4. Myskiv, T. (2017). Dynamika avtomobilia z dyskretno-zminnoiu i neperervno-zminnoiu transmissiieiu. [Vehicle dynamics with discrete-variable and continuously-variable transmission] . *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhniky". Serie: Dynamika, mitsnist ta proektuvannia mashyn i pryladiv – Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Dynamics, strength and design of machines and devices, Vol. 866, 181–187* [in Ukrainian].

5. Serhiienko, M.Ie., Svidlo, V.S. & Kuzmenko, L.V. (2018). Analiz suchasnykh konstruktzii zdvoienykh zcheplen transportno-tiahovykh mashyn [Analysis of modern designs of double clutches of transport and traction machines]. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU "KhPI", 49 (1325), 50–57.* [in Ukrainian].
6. Ostroverkh, O.O. (2021). Rozrobka i vprovadzhennia kombinovanoi korobky peredach ta yii zastosuvannia na lehkovykh avtomobiliakh. [Development and implementation of a combined gearbox and its application on passenger cars]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriiia Avtomobile- ta traktorobuduvannia – Bulletin of NTU "KhPI". Series of automobile and tractor construction, 1, 22–31.* [in Ukrainian].
7. Volkov, V.P. & Vil'skyi, H.B. (2010). *Teoriia rukhu avtomobilia [Theory of car movement]*. Sumy: Universytetska knyha [in Ukrainian].
8. Kyslykov, V.F. & Lushchuk, V.V. (2006). *Construction and operation of cars.* (6d ed.). Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
9. Kalchenko, V.V., Kalchenko, V.I., Kuzhelnyi, Ya.V. & Skliar, V.M. (2021). Analiz konstruktzii korobok peremykannia peredach avtomobiliv. [Analysis of car gearbox designs]. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: XI-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (26 - 27 travnia, 2021 r.) – XI International Science and Practice Conf* (pp. 108-109). Chernihiv: NU «Chernihivska politehnika», Issue 1 [in Ukrainian].
10. Variator. Pryntsyp roboty [Variator. Principle of operation]. *zauto.com.ua*. Retrieved from <http://zauto.com.ua/variator-pryntsyp-roboty/> [in Ukrainian].
11. Mekhanichna korobka peredach [Mechanical gearbox. Robotic checkpoint]. *avtoad.com.ua*. Retrieved from <https://avtoad.com.ua/base/mehanicna-korobka-peredac-robotizovana-kpp>. [in Ukrainian].
12. Kalchenko, V., Kalchenko, V., Sira, N., Kuzhelnyi, Ya. & Sklyar, V. (2021). Model of milling the root and connecting rod necks of the crankshaft for one manufacturing process. *Lecture Notes in Mechanical Engineering.* [in English].
13. Kalchenko, V.I., Kalchenko, V.V., Kuzhelnyi, Ya.V. & Morochko, V.V. (2019). Eksperymentalne doslidzhennia chystovoho odnoprokhidnoho shlifuvannia tsylindrychnoi poverkhni vala oriientovanyim instrumentom [Experimental research of fine single-pass grinding of the cylindrical surface of the shaft with an oriented tool]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies, 2 (16), 54–61* [in Ukrainian].

**Yaroslav Kuzhelnyi**, PhD in Tech. Sci., **Olga Aksonova**, assistant, **Dmytro Mashkovtsev**, assistant  
*Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine*

### **Analysis of Design Features of Different Types of Car Gearboxes**

One of the important components of the car design is the gearbox, which is part of the transmission. It is the gearbox that is responsible for changing the direction of the car and its speed. This affects traction and dynamic properties in general. The purpose of this article is to analyze the design features of various types of car gearboxes.

The work analyzes the design features of various types of car gearboxes. The purpose of the gearbox, the effect on the traction-speed properties, which are a set of properties that determine the possible speed ranges and the maximum intensity of acceleration when the car is moving in the traction mode in various operating conditions, are given, as well as the main requirements that it should provide. The peculiarities of the construction of mechanical gearboxes, their structure, the principle of operation and the possibility of placement in a car are considered. The structure and main elements of the hydromechanical transmission (HMT) design are presented. It consists of three main parts: a torque converter, a manual gearbox and a control system. The design features of the gearbox with V-belt and toroid variators are considered. The principle of operation of variators, which ensures a stepless change of the gear ratio within the established limits, is presented. The design of the gearbox with a double clutch is considered, which ensures uninterrupted transmission of the power flow to the drive wheels. The gearbox is controlled by an electronic control unit, which receives information from sensors located in the box and is connected by a high-speed bus to the engine's electronic control unit.

The main advantages and disadvantages of each type of considered gearboxes are highlighted. The mechanical gearbox has proven itself as a unit that is simple in design and reliable in operation. The prospects for the development of the gearbox are the development of new electronic control systems, the use of modern materials with high performance indicators and the use of high-performance methods of mechanical processing.

**gearbox, mechanical, hydromechanical transmission, automatic gearbox, V-belt variator, toroidal variator, Dual-clutch gearbox**

*Одержано (Received) 24.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 29.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*



**Г.В. Пасов**, доц., канд. техн. наук, **В.І. Венжега**, доц., канд. техн. наук,  
**А.В. Кологойда**, доц., канд. техн. наук

*Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна*

*e-mail: genapasov@gmail.com, vivenzhega@gmail.com, k.y.v.immortal@gmail.com*

## Вивчення роботи механізмів, які працюють у автомобілебудуванні із застосуванням анімаційного симулятора

В статті запропоноване використання в учбовому процесі анімаційного симулятора для вивчення роботи різноманітних вузлів та механізмів. Симулятор дозволяє вивчати роботу різноманітних вузлів та механізмів кульково-гвинтових, рейкових, мальтійських механізмів, механізмів періодичного обертального руху при виконанні лабораторних робіт, дозволяє краще зрозуміти процес, а також є більш наочним. Проте в даній програмі не можна робити інтерактивне їх керування (наприклад, змінювати геометричні параметри, швидкісні характеристики та інше). В подальшому планується удосконалення цього симулятора.

**навчальний процес; кульково-гвинтова, рейкова, черв'ячно-рейкова, зубчаста передачі; симулятор**

**Постановка проблеми.** Будь яка машина, агрегат, автомобіль, верстат складається з вузлів та окремих деталей, які необхідні для виконання ними службових функцій. Для реалізації різноманітних рухів: обертальних, прямолінійних, періодичних та інших, а також перетворення одних видів рухів в інші (наприклад обертальних в прямолінійні, постійних в періодичні та навпаки, зі зміною кінематичних показників) в машинах присутні різноманітні механізми. Це можуть бути кульково-гвинтові передачі, мальтійські механізми, зубчасті сектори, рейкові, черв'ячно-рейкові та інші. Одними з навчальних освітніх компонент, які саме займається цими механізмами, є “Деталі машин”, “Деталі машин та підйомно-транспортне обладнання” та інші учбові дисципліни.

Одним з засобів, які використовуються у сучасному учбовому процесі є дуже розповсюджене використання комп'ютерної техніки. Проте ще потрібно мати й відповідне програмне забезпечення. Використання у навчальному процесі спеціального програмного забезпечення, наприклад, імітаційних моделей з можливістю анімації досліджуємих явищ дозволяє застосовувати їх при виконанні лабораторних робіт з різноманітних навчальних дисциплін. Наприклад, досліджувати різноманітні процеси у теорії різання, теорії автоматичного керування, гідравліці, при складанні керуючих програм для верстатів з числовим програмним керуванням та інше.

Тому анімаційне моделювання різноманітних механізмів – це важлива задача.

Освіта є основою будь-якого суспільства, як у минулому так і сучасному. В процесі вивчення різноманітних навчальних освітніх компонент можуть використовуватись різноманітні джерела інформації: підручники, навчальні посібники, збірники статей та тез конференцій, Інтернет ресурси тощо. В теперішній час актуальним є використання спеціальних імітаційних, анімаційних програмних продуктів при навчанні та вивченні різних учбових дисциплін [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Здобувачі вищої освіти технічних та будь-яких інших спеціальностей повинні бути присутніми на різнопланових структурних учбових елементах: лекціях, лабораторних та практичних заняттях. На цих заняттях, як правило, часто використовують двовимірні та тривимірні зображення: рисунки різноманітних машин, конструкцій, процесів та інше [2-5]. Для кращого розуміння процесу роботи різноманітних явищ використовують комп'ютери та відповідні програмні продукти, що надають навчальному процесу більш інтенсивного та інтерактивного змісту [6-10].

Здобувачі вищої освіти напрямів навчання “Галузеве машинобудування” та “Автомобільний транспорт” вивчають такі дисципліни як “Деталі машин”, “Деталі машин та підйомно-транспортне обладнання”. Окрім теорії їм необхідно отримати ще й практичні навички, які здобувачі одержують на лабораторних заняттях.

При виконанні лабораторних робіт здобувачам вищої освіти необхідно використовувати передові інформаційні технології, наприклад, анімаційний симулятор, який дозволяє вивчати різноманітні механізми для утворення обертового, прямолінійного, періодичного та інших рухів, які здійснюються у різноманітних механізмах машинобудівельного та автомобілебудівельного напрямів сучасного виробництва.

**Постановка завдання.** Таким чином, метою роботи є пропозиція використання в учбовому процесі анімаційного симулятора для вивчення роботи різноманітних вузлів та механізмів.

**Виклад основного матеріалу.** В Національному університеті “Чернігівська політехніка” на кафедрі автомобільного транспорту та галузевого машинобудування при вивченні навчальних дисциплін “Деталі машин та підйомно-транспортне обладнання” здобувачам напряму навчання “Автомобільний транспорт”, “Деталі машин” здобувачам напряму навчання “Галузеве машинобудування”, “Обладнання та транспорт механоскладальних цехів” здобувачам напряму навчання “Технологія машинобудування”, запропоновано використовувати навчальний симулятор для вивчення роботи різноманітних механізмів, які працюють у вузлах автомобілів, металообробних верстатів, промислових роботів та іншому машинобудівельному обладнанні.

Під час розробки анімаційного моделювання роботи: кульково-гвинтової передачі для створення прямолінійного поступального руху, мальтійських та секторних механізмів для створення реверсивного, обертального руху, рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів для створення прямолінійного поступального руху було використано сучасний програмний продукт “3Ds Max”.

Програмний продукт призначений для імітаційного виконання лабораторних робіт з дисциплін: “Деталі машин”, “Деталі машин та підйомно-транспортне обладнання”, “Обладнання та транспорт механоскладальних цехів” та інших, де вивчають будову та роботу різноманітних вузлів та агрегатів. Запропонована методика виконання лабораторних робіт в оболонці комп'ютерної програми передбачає вивчення кульково-гвинтової передачі для створення прямолінійного поступального руху, мальтійських та секторних механізмів для створення реверсивного, обертального руху, рейкових та черв'ячно-рейкових механізмів для створення прямолінійного поступального руху.

Для початку роботи з симулятором потрібно запустити файл “SimulatorDETAIL MASHIN.exe”. Після запуску програми на екрані з'являється “Меню” (рис. 1), з якого користувач може вибрати ті дії, які йому необхідні в даний момент: “Кульково-

гвинтова передача”, “Мальтійський механізм”, “Зубчастий секторний механізм”, “Рейковий механізм” “Черв’ячно-рейковий механізм”.

Для перетворення обертального руху в поступальний існує велика кількість різноманітних механізмів. Найбільш розповсюдженими серед них є гвинтові (кульково-гвинтові) передачі. При цьому реалізуються різні варіанти перетворення руху. У першому варіанті гвинт обертається, а гайка разом з робочим органом рухається поступально (рис. 2). У другому варіанті гвинт нерухомий, а гайка обертається та разом з робочим органом здійснює поступальний рух (рис. 3). У третьому варіанті гайка нерухома, а гвинт обертається та одночасно разом з робочим органом робить поступальний рух (рис. 4). У четвертому варіанті гайка отримує обертальний рух, а гвинт разом з робочим органом має поступальний рух (рис. 5).

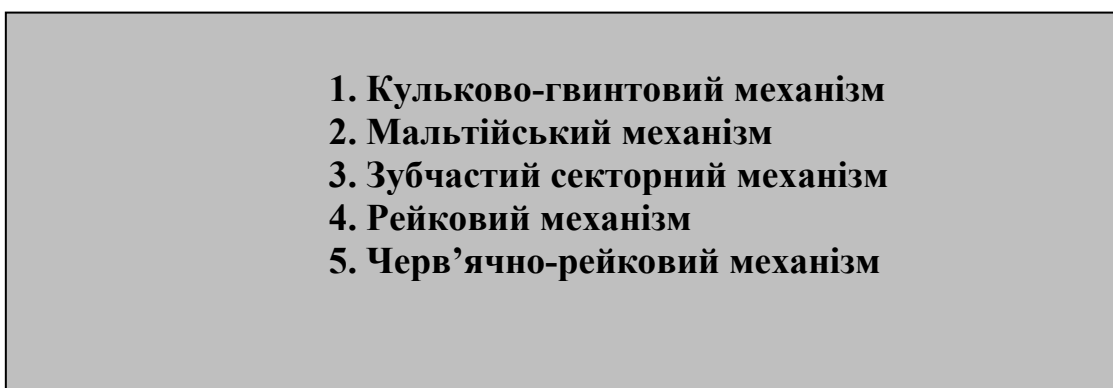


Рисунок 1 – Вибір з запропонованого меню механізмів для вивчення  
*Джерело розроблено авторами*

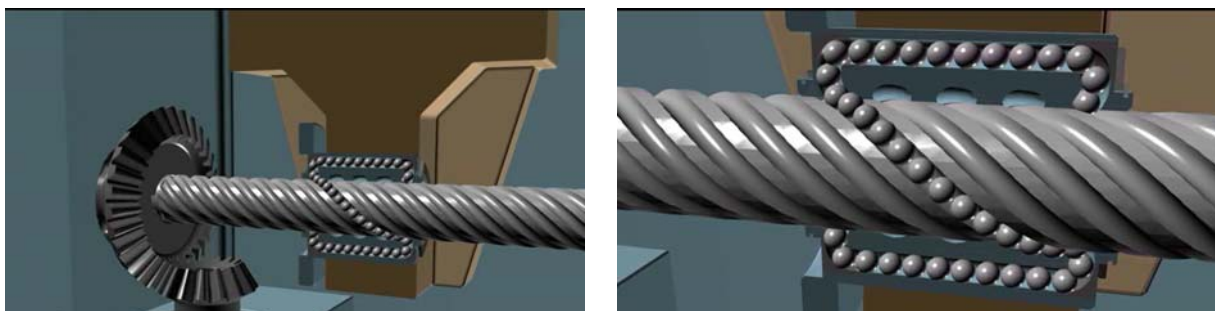


Рисунок 2 – Гвинт обертається, гайка переміщується поступально

*Джерело розроблено авторами*

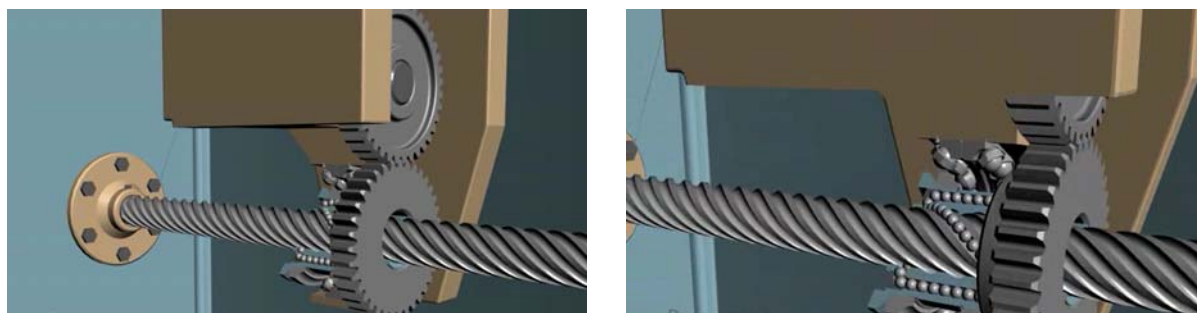


Рисунок 3 – Гвинт нерухомий, гайка обертається і переміщується поступально

*Джерело розроблено авторами*



Рисунок 4 – Гвинт обертається і переміщується поступально, гайка нерухома  
Джерело розроблено авторами

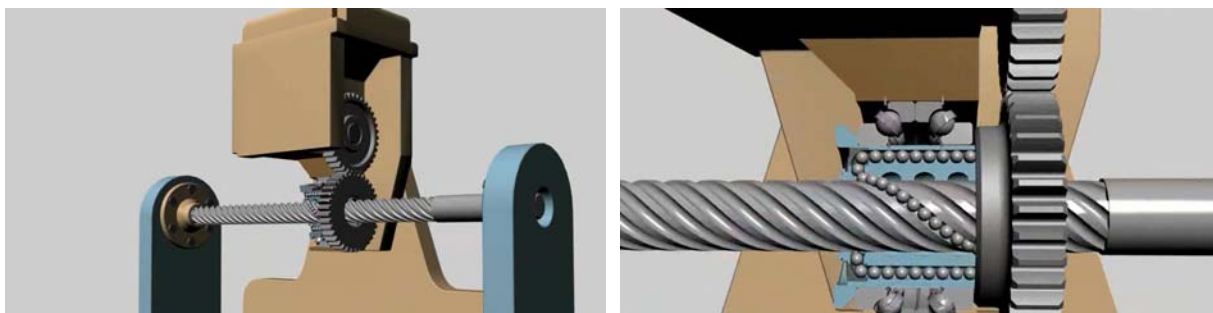
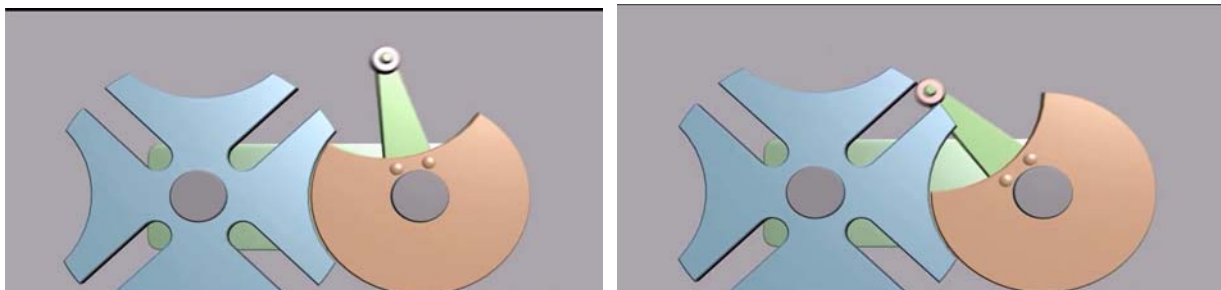


Рисунок 5 – Гвинт переміщується поступально, гайка обертається не переміщуючись  
Джерело розроблено авторами

У машинобудуванні для повороту багатопозиційних робочих органів з однієї позиції в іншу найчастіше застосовують мальтійські механізми. Чотирипозиційний мальтійський механізм (хрест) з одним кривошипом (рис. 6) може використовуватись для періодичного повороту. Механізм працює таким чином. Здійснюється рівномірне обертання кривошипа, при цьому закріплений на ньому ролик, у визначений момент входить в один з чотирьох пазів мальтійського хреста, повертаючи його на кут  $90^\circ$ . Таким чином, за кожен повний оберт кривошипа вал, на якому закріплений мальтійський хрест, здійснює тільки  $1/4$  оберту. Диск, який жорстко зв'язаний із кривошипом, використовується для фіксації положення мальтійського хреста в кожній з чотирьох його позицій.

Шестипозиційний мальтійський механізм з одним або двома роликами (рис. 7) також може бути використаний для періодичного повороту. При встановленні на кривошипному диску другого ролика дозволяє в разі потреби збільшити кут повороту мальтійського хреста в два рази.



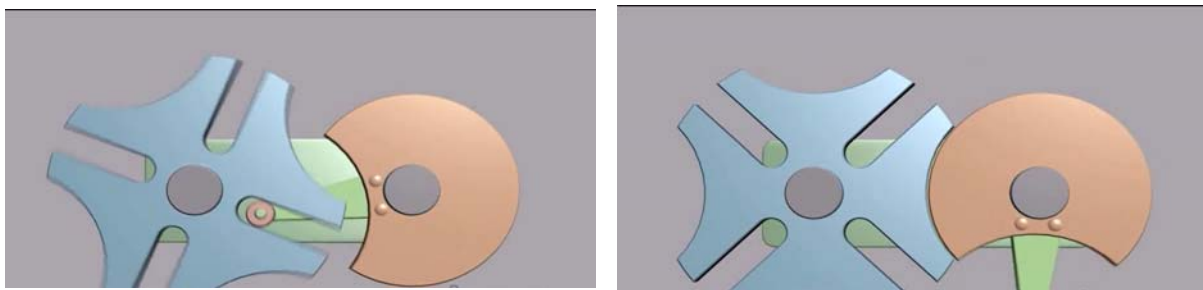


Рисунок 6 – Чотирьохпозиційний мальтійський механізм  
*Джерело розроблено авторами*

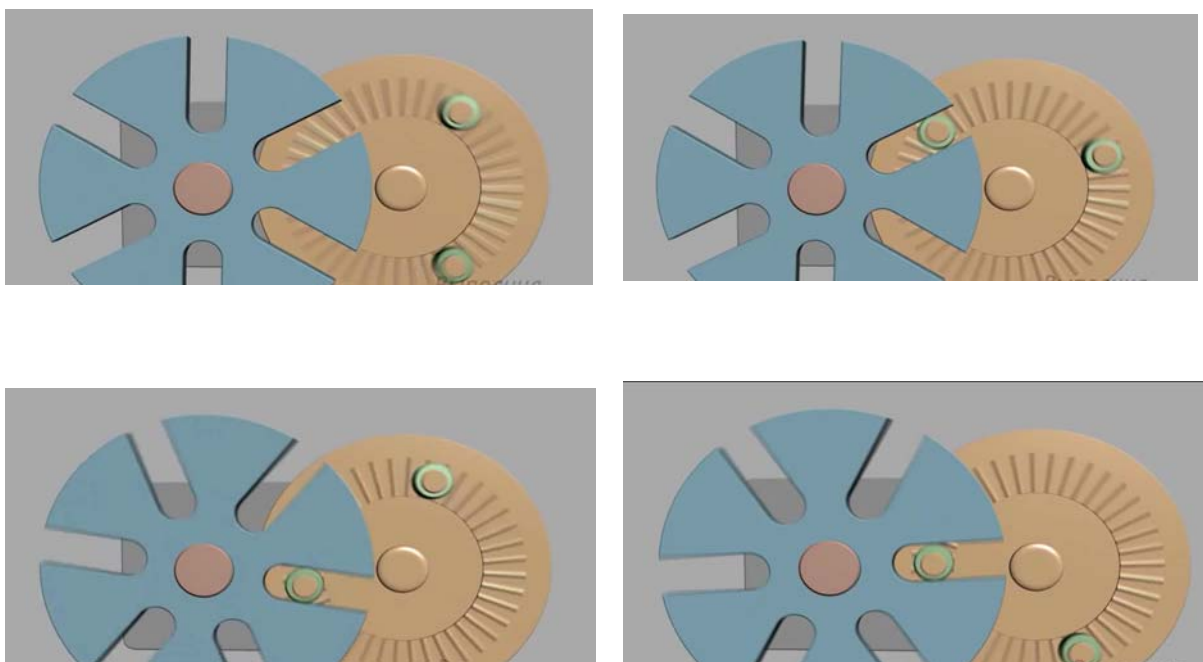


Рисунок 7 – Шестипозиційний мальтійський механізм  
*Джерело розроблено авторами*

Зубчастий сектор (рис. 8), який закріплений на валу, робить періодичні обертальні рухи тільки в продовж того часу, коли його зубці знаходяться в зачепленні з зубцями колеса, яке встановлене на іншому валу. Проте в цьому механізмі не має можливості регулювати величину кута повороту колеса. Тому він, як і мальтійські механізми, використовується в основному в багатопозиційних пристроях.



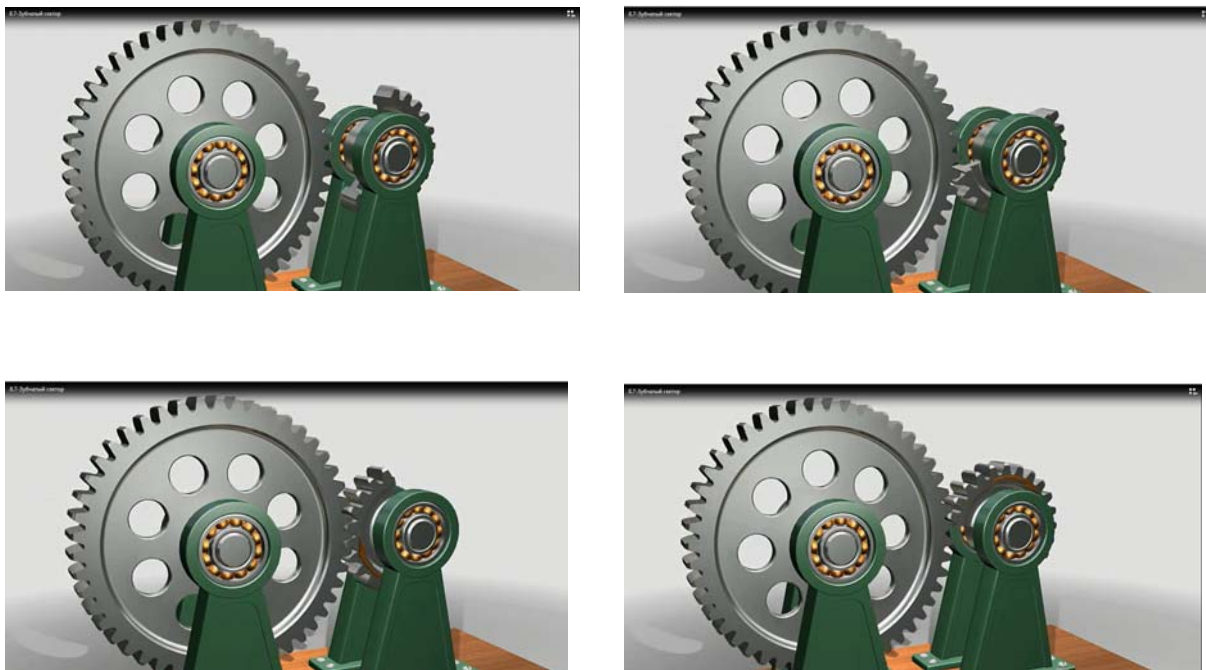


Рисунок 8 – Зубчастий сектор

*Джерело розроблено авторами*

Рейкові передачі також мають два можливі варіанти. У першому варіанті (рис. 9) рейкова шестірня робить тільки обертальний рух, а поступальний рух отримує рейка разом з робочим органом. У другому варіанті (рис. 10) рейка нерухома, а рейкова шестірня робить обертальний рух та рухається поступально разом з робочим органом.

Середнє положення між гвинтовою та рейковою передачами займає черв'ячно-рейкова передача (рис. 11, 12). Вона має більшу жорсткість та досить високий к.к.д., що в свою чергу забезпечує її широке використання (рис. 11) (рухома рейка) та (рис. 12) (не рухома рейка).

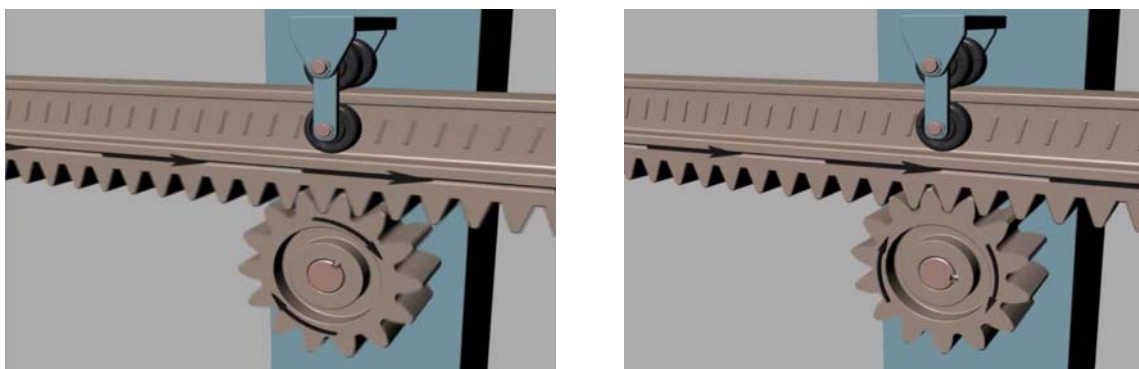


Рисунок 9 – 3D модель рейкової передачі (рейка рухома)

*Джерело розроблено авторами*

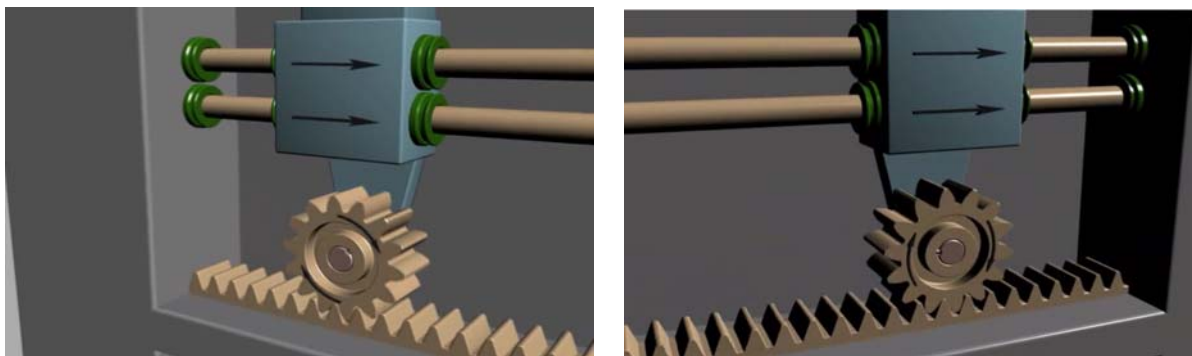


Рисунок 10 – 3D модель рейкової передачі (рейка не рухома)

*Джерело розроблено авторами*

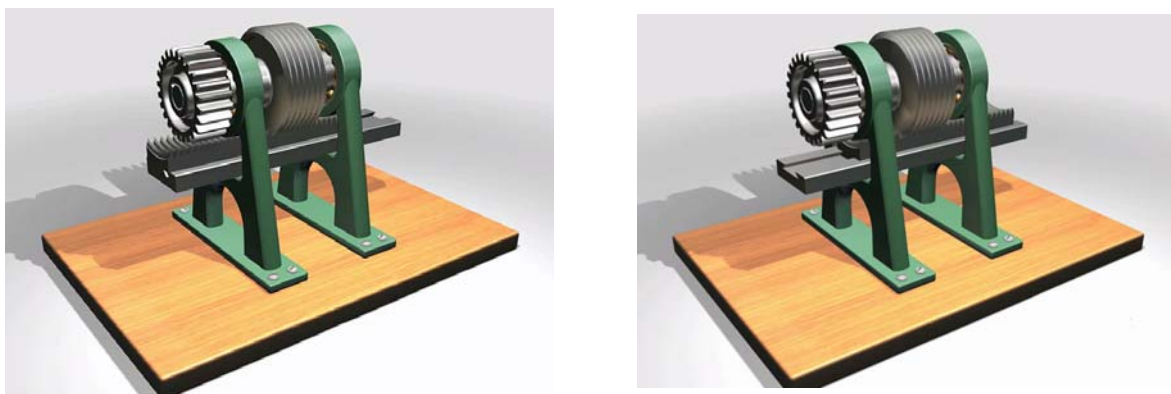


Рисунок 11 – 3D модель черв'ячно-рейкової передачі (рейка рухома)

*Джерело розроблено авторами*

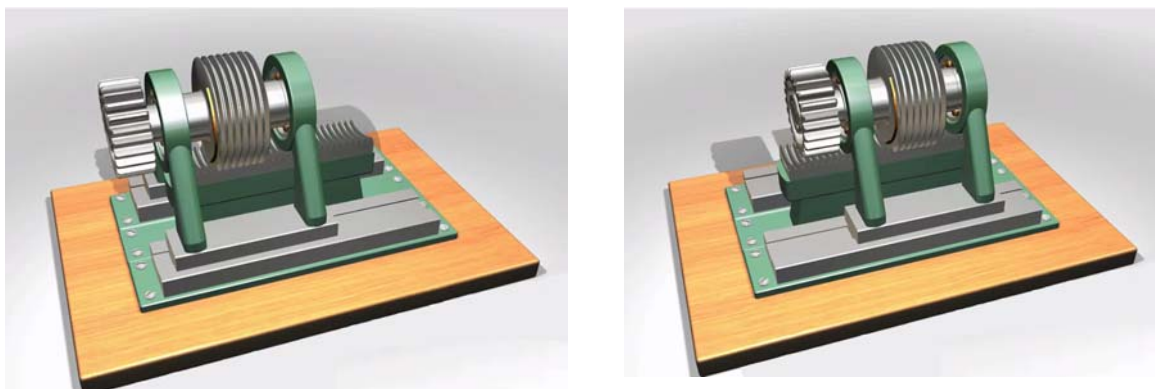


Рисунок 12 – 3D модель черв'ячно-рейкової передачі (рейка не рухома)

*Джерело розроблено авторами*

На основі цих розробок можливо створювати аналогічні програмні анімаційні продукти для інших механізмів.

**Висновки.** Запропонований навчальний симулятор дозволяє вивчати роботу різноманітних вузлів та механізмів кульково-гвинтових, рейкових, мальтійських механізмів, механізмів періодичного обертального руху при виконанні лабораторних робіт, дозволяє краще зрозуміти процес, а також є більш наочним. Проте в даній програмі не можна робити інтерактивне їх керування (наприклад, змінювати геометричні параметри, швидкісні характеристики та інше). Було б доцільним в подальшому мати такі можливості в наступній версії цього симулятора.

## Список літератури

1. Гайдамака А. В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навч. посіб. для студ. машинобудівних спец. усіх форм навч. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. 275 с.
2. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: підруч. для студ. інж.-техн. спец. вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. 492 с.
3. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І.В. Деталі машин: навч. посіб. К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. 220 с.
4. Малащенко В.О., Стрелець В.М., Новицький Я.М., Стрелець О.Р. Деталі машин і підійомно-транспортне обладнання. 2-ге видання. навч. посіб. Львів : «Новий Світ-2000», 2020. 347 с.
5. Деталі машин.( КП по ДМ, лабораторні роботи, завдання до виконання СРС і МКР). Навчальний посібник з кредитного модуля для студентів технічних спеціальностей ; укл. Ю.П. Горбатенко. К.: НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 2019. 97 с.
6. Пальчевський Б.О., Валецький, Б.П., Вараніцький Т.Л. Системи 3D моделювання: навч. посіб. Луцьк, 2016 . 176 с.
7. Пасов Г.В., Венжега В.І. Використання анімаційного моделювання механізмів для створення прямолінійного поступального руху за допомогою кулачкових механізмів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем* : матеріали 4-ої Міжн. наук.-практич. конф. Чернігів: ЧНТУ, 2014. С. 81-84.
8. Михальченко Д. О. Анімаційне моделювання храпових механізмів для створення обертального переривчастого руху . *Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі* : Всеукр. наук.-практич. конф. студ., асп. та мол. уч. Чернігів: ЧНТУ, 2017. С. 22-23.
9. Пасов Г. В., Венжега В. І., Рудик А. В. Анімаційне моделювання механізмів для створення реверсивного, обертального руху. *Технічні науки та технології: науковий журнал* . 2016. № 1(3). С. 60 – 65.
10. Пасов Г. В., Венжега В. І. Анімаційне моделювання гідроциліндрів та пневмокамер для створення прямолінійного поступального руху. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. 2018. № 4(14). С. 34 – 40.

## References

1. Haydamaka, A.V. (2020). *Detali mashyn. Osnovy teorii ta rozrakhunkiv* [Machine details. Basics of theory and calculations]. Kharkiv: NTU "KhPI" [in Ukrainian].
2. Rudь Yu.S. (2015). *Osnovy konstruiuvannya mashyn* [Basics of machine design]. Kryvyi Rih: D.O. Chernyavskiy FOP Publisher [in Ukrainian].
3. Borozenets, H.M., Pavlov, V.M., & Semak, I.V. (2021). *Detali mashyn* [Details of machines]. Kyiv: "Condor" Publishing House [in Ukrainian].
4. Malashchenko, V.O., Strelets, V.M., Novytskyi, Y.M. & Strelets, O.R. (2020). *Detali mashyn i pidiomno-transportne obladnannya* [Machine parts and lifting and transport equipment]. Lviv: "New World-2000" [in Ukrainian].
5. Horbatenko, Yu.P. (2019). *Detali mashyn* [Details of machines] Kyiv: NTUU "KPI named after I. Sikorsky" [in Ukrainian].
6. Palchevskiy, B.O., Valetskiy, B.P. & Varanitskiy, T.L.(2016). *Systemy 3D modeliuvannya* [3D modeling systems] . Lutsk [in Ukrainian].
7. Pasov, H. V., Venzheha V. I. (2014). Vykorystannya animatsiinoho modeliuvannya mekhanizmiv dlia stvorennia priamoliniinoho postupalnoho rukhu za dopomohoi kulachkovykh mekhanizmiv [Using animation simulation of mechanisms to create rectilinear translational motion using cam mechanisms.] *Complex quality assurance of technological processes and systems : 4-oi Mizhn. nauk.-prakychn. konf. (Chernihiv) – 4th International Scientific and Practical Conference* (pp. 81-84.) . Chernihiv: ChNTU [in Ukrainian].



8. Mykhalchenko, D. O. (2017). Animatsiine modeliuвання khrapovykh mekhanizmiv dlia stvorennia obertalnoho pereryvchastoho rukhu [Animation modeling of ratchet mechanisms to create a rotating intermittent motion.] . Latest technologies in scientific activity and educational process : *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh – All-Ukrainian Scientific-Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists* (Pp 22-23) . Chernihivskiy natsionalnyi tekhnolohichniy universytet [in Ukrainian].
9. Pasov, H. V., Venzheha, V. I. & Rudyk, A. V. (2016). Animatsiine modeliuвання mekhanizmiv dlia stvorennia reversyvnogo, obertalnoho rukhu [Animation simulation of reverse mechanism for creating rotary motion] . *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies, 1(3)*, 60-65 [in Ukrainian].
10. Pasov, H. V., Venzheha V. I. (2018). Animatsiine modeliuвання hidrotsylindriv ta pnevmokamer dlia stvorennia priamoliniinoho postupalnoho rukhu [Animated modeling of hydraulic cylinders and pneumatic chambers to create a rectilinear translational motion] . *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies, 4(14)*, 34–40 [in Ukrainian].

**Hennadii Pasov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Venzheha**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

**Yaroslav Kuzhelnyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Chernihiv Polytechnic National University, Chernihiv, Ukraine*

### **Studying the Mechanisms that Work in the Automotive Industry Using an Animation Simulator**

The purpose of the work is to propose the use of an animation simulator in the educational process to study the operation of various nodes and mechanisms.

At the Chernihiv Polytechnic National University, at the Department of Automotive Transport and Industrial Mechanical Engineering, when studying the academic disciplines "Machine Parts and Lifting and Transport Equipment" for students of the field of study "Automotive Transport", "Machine Parts" for students of the field of study "Industrial Mechanical Engineering", "Equipment and transport of mechanical assembly shops" students of the field of study "Mechanical engineering technology" are offered to use the educational simulator to study the operation of various mechanisms that work in the assemblies of cars, metalworking machines, industrial robots and other machine-building equipment. The software product is intended for the simulated performance of laboratory work in the discipline "Machine parts and lifting and transport equipment" studied by the applicants. Users have the opportunity to choose different mechanisms to act with the help of the animation simulator (pin-screw, rack, worm-rail gears, Maltese mechanisms, toothed sectors). Visual visualization together with interactivity contributes to the effective assimilation of educational material.

The proposed educational simulator allows you to study the operation of various nodes and mechanisms of ball-screw, rail, Maltese mechanisms, mechanisms of periodic rotary motion when performing laboratory work, allows you to better understand the process, and is also more visual. However, in this program, it is not possible to manage them interactively (for example, change geometric parameters, speed characteristics, etc.). Further improvement of this simulator is planned.

**learning process; ball-screw, rail, worm-rail, gear transmission; simulator**

*Одержано (Received) 02.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 11.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

## ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.214-221](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.214-221)**Д.В. Голуб**, доц., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: dimchik529@gmail.com*

### Підвищення ефективності управління технологічним процесом доставки на основі аналізу статичних та динамічних резервів транспортної системи

В статті розроблений теоретичний підхід, який здійснює опис процесів організації і дезорганізації логістичних потоків в транспортній системі та відображає важливі сторони її функціонування. Запропоновано, що управління в транспортній системі слід розглядати як підтримку її стійкого стану і створення нової системної властивості, а саме динамічних резервів.

**транспортна система, статичні та динамічні резерви, струмінь, потік, прискорення, транспортні засоби, зв'язок**

**Постановка проблеми.** Аналіз транспортної системи на рівні елементів є важливим етапом її дослідження [1, 2]. Але організовану сукупність елементів, взаємодія яких відбувається в єдиному технологічному процесі і підкоряється єдиному управлінню, не можна пояснити на рівні елементів в розрізі динамічних резервів, оскільки така сукупність має загальносистемні властивості.

При цьому управління процесами в транспортній системі створює ефект наявності динамічних резервів [2]. Це найбільш ефективний тип резервів, оскільки він не збільшує витрати на розвиток інфраструктури та дозволяє без складних перетворень досить легко і повно моделювати транспортні процеси. Такі резерви транспортної системи є набором ранжованих в певній послідовності елементів, що беруть участь у виконанні частини технологічного процесу, з вказівкою на параметри їх роботи [2, 3]. Ці елементи відображають пересування і простої (логічні), а також місткість (бункерні). На сьогоднішній день не існує загальноприйнятих методів і методик для відображення процесів зміни стану зазначених елементів транспортної системи, а тому є доцільним дослідження в цьому напрямку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Досвід дослідження, розрахунку і оптимізації транспортних систем різної природи дозволяє виділити властивості, що здійснюють головний вплив на результати їх функціонування [3]. В першу чергу це слід враховувати при виборі моделі управління транспортною системою [4]. Звичайно, ці аспекти знаходяться і у взаємодії [5], але важливість відображення їх в моделі управління залежить від виду об'єкту і завдання моделювання транспортного процесу та визначає вибір моделі [6].

Розрахунок транспортних об'єктів, як систем масового обслуговування, дозволяє добре враховувати вплив випадкових процесів на величину міжопераційних простоїв, але погано відображає внутрішню структуру і майже не відображає процес управління [7]. Оптимізація транспортних систем зводиться, в основному, до трьох напрямів: поліпшенню внутрішньої структури, вдосконаленню технології, оптимізації управління потоками, технологічними процесами та ін. [8].

Неможливість формалізувати вплив якості внутрішньої структури на параметри роботи більшості транспортних систем призводить до неможливості використання моделей строгої оптимізації [9, 10]. Тому необхідна саме розробка теоретичного підходу, що здійснює опис процесів організації і дезорганізації потоків в транспортній системі та висвітлення важливих сторін її функціонування.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є розробка теоретичного підходу, що здійснює опис процесів організації і дезорганізації логістичних потоків в транспортній системі та відображає важливі сторони її функціонування.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо природу динамічних резервів транспортної системи. Елементарний логістичний потік, що зв'язує конкретного постачальника і споживача в загальному потоці, будемо називати струменем. Якщо структура потоків жорстка, тобто наявна однозначна прив'язка постачальників до споживачів, то кожному струменю необхідно мати резерви транспортних засобів для забезпечення перевезень в умовах нерівномірності доставки вантажів або пасажирів.

При цьому резерв по струменю складає:

$$r_i = n_{i \max} - \bar{n}_i, \quad (1)$$

де  $\bar{n}_i$  – усереднена кількість транспортних засобів (ТЗ) в обороті при постійному потоці;

$n_{i \max}$  – необхідна кількість ТЗ в обороті при максимальному сплеску потоку.

Для визначених моментів часу ці резерви є статичними. Вони є додатковим числом ТЗ, що стоять в резерві. Виникають вони при поглинанні сплесків і включаються в дію при заповненні недоліків.

Якщо відсутня взаємодія струменів в потоці, то сумарні статичні резерви становлять:

$$R_{cm} = \sum_{i=1}^n r_{i \text{ cm}} = \sum_{i=1}^n (n_{i \max} - \bar{n}_i). \quad (2)$$

Повна величина статичних резервів потрібна тільки тоді, коли відсутнє управління взаємодією усередині транспортного потоку між струменями та з постачальниками і споживачами. Статичні резерви уповільнюють обіг ТЗ, вимагають значних капітальних вкладень та знижують ефективність роботи транспорту. Тому необхідно всіляко знижувати резерви без збитку для надійності транспортного зв'язку.

Управління потоками дає можливість знизити обсяг статичних резервів без погіршення бункерних властивостей системи. Чим вище розвинене управління, тим менше вимагається статичних резервів в умовах нерівномірності. При цьому статичні резерви стають динамічними. Динамічні резерви - це резерви управління. Розміри їх визначаються величиною, на яку можна зменшити статичні резерви. Динамічні резерви не вимагають додаткових ТЗ і шляхів сполучення, а тому їх збільшення підвищує ефективність роботи транспорту в цілому.

Залежно від типу взаємодіючих елементів динамічні резерви можуть бути резервами першого, другого, третього і четвертого роду.

Динамічні резерви першого роду (ДР-1) виникають при взаємодії однорідних струменів в потоці (рис. 1).

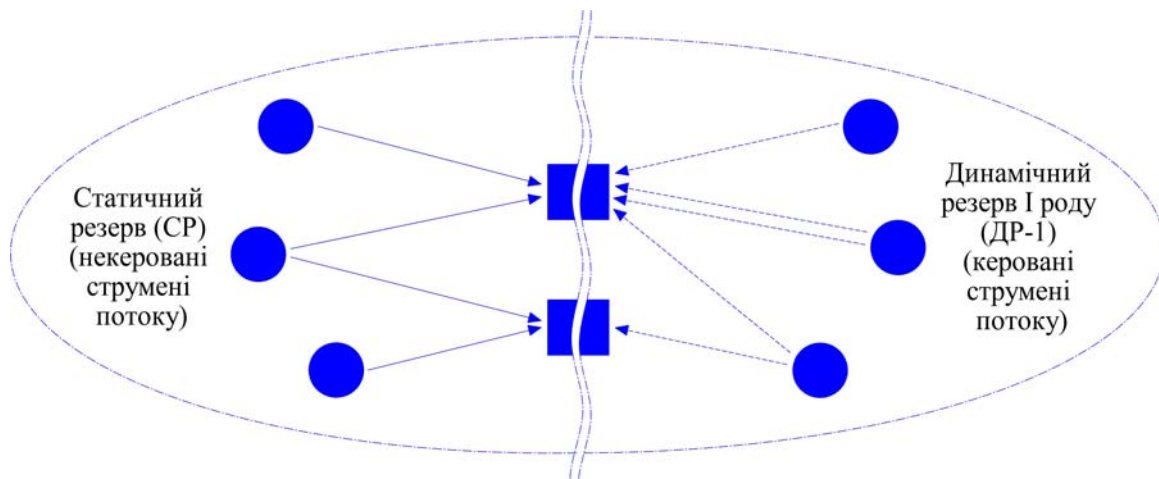


Рисунок 1 – Формування динамічних резервів першого роду (ДР-1)

*Джерело: розроблено автором*

Оскільки коливання резервів викликаються випадковими причинами, то з певною ймовірністю наявність надлишків рухомого складу (РС) по одних струменях співпадає за часом з появою недостатності по інших. Виникає можливість часткового усунення дефіциту ТЗ за рахунок надлишку.

Зі схеми (рис. 1 а, б) видно, що три постачальники пов'язані однорідними струменями потоку з двома споживачами і у першого споживача збільшилася потреба у вантажі, а у іншого - зменшилася. При некерованих струменях потоку набувають чинності резерви. Першому необхідно узяти вантаж з резерву, другому - відставити в резерв. При керованих струменях потоку резерв не знадобиться, перебудовується тільки структура струменів в потоці.

Динамічні резерви другого роду (ДР-2) виникають при взаємодії різнорідних струменів, якщо в їх просуванні потоку беруть участь одні і ті ж ТЗ. В умовах нерівномірності виникають міжопераційні простоя ТЗ.

Надання пріоритету одному із струменів призводить до прискорення пропуску одного з них в потоці за рахунок уповільнення іншого (інших). Затримки перекидаються з одного струменя на інший при збереженні загальної їх суми в потоці, тобто при незмінній середній швидкості просування струменів в потоці. Прискорення пропуску струменю в потоці призводить до того, що одноразово вивільняється деяка група транспортних засобів, яка може бути використана в якості резерву. При уповільненні струменів в потоці, навпаки, поглинаються додаткові ТЗ за рахунок збільшення їх числа в дорозі. Існує ряд технологічних механізмів прискорення і уповільнення просування струменів в потоці.

Нехай два постачальники пов'язані кожен зі своїм споживачем неоднорідними, невзаємозамінними струменями потоку. У загальному випадку просування струменів в потоці є деякою послідовністю з технологічних операцій. В статистичному резерві спостерігається такий же час в міжопераційних простоях шляхом дотримання, а в динамічному резерві у разі пріоритету для першого струменя процес просування інший сповільнюється (рис. 2 а, б).

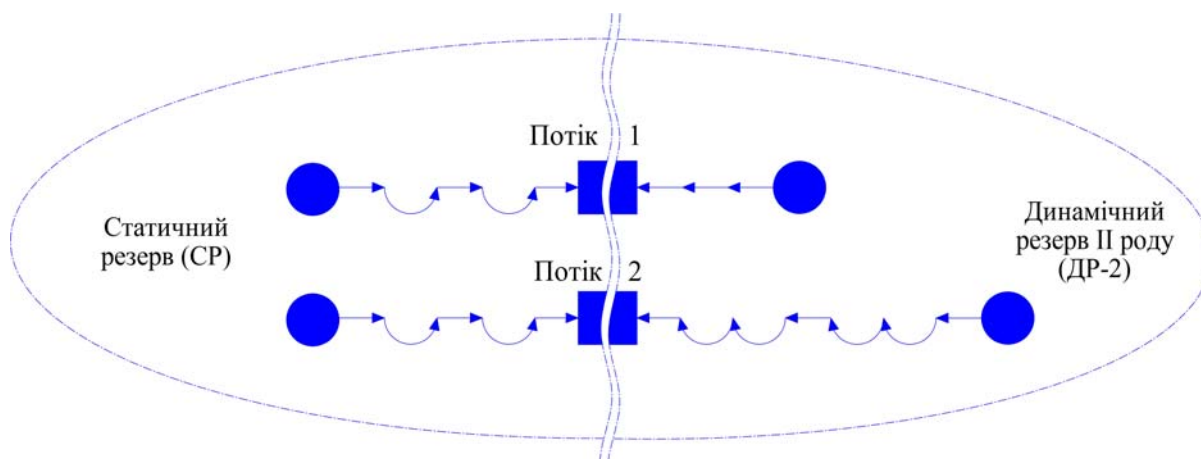


Рисунок 2 – Формування динамічних резервів другого роду (ДР-2)

*Джерело: розроблено автором*

Вище було показано, що ТЗ за рахунок управління струменями в потоці можна активно пристосовувати до змін ритмів відправників і одержувачів. Проте можливості такої адаптації обмежені. При занадто великому розузгодженні ритмів струменів в потоці може настати такий момент, коли не можна вже буде забезпечити надійний транспортний зв'язок. Транспортна система починає відігравати роль обмеження. В цьому випадку можливі два шляхи - або збільшити статичні резерви, що вимагає капіталовкладень, або зменшити міру розузгодження ритмів струменів між постачальниками і споживачами.

При керованій взаємодії виробництва і транспорту виникають динамічні резерви третього роду ДР-3. З'ясуємо їх природу. Надлишок і недостатність по струменю породжується невідповідністю випуску продукції постачальником і потреби в ній у одержувача. Узгодження ритмів дозволяє скоротити необхідну величину статичних резервів. Величина скорочення визначає розмір ДР-3. При керованій взаємодії виробничі підрозділи погоджують свої дії не лише між собою, але і з транспортом. Традиційно транспорт мав резерви шляхів, ТЗ, пропускної спроможності, вільного часу та виконував роль і каналу, і бункера.

Транспорт може не тільки сполучати, але і роз'єднувати відправників і одержувачів. В той час порушення ритму одного не передавалися іншому (рис. 3 а).

Збільшення потужностей виробництва в обмежених умовах підприємств призводить частенько до відставання розвитку транспорту. Транспорт втрачає резерви і може виконувати тільки роль каналу. Тепер будь-яка затримка в транспортній підсистемі знижує її пропускну спроможність, а це означає і усієї виробничо-транспортної системи, оскільки вона складається із зістикованих каналів (рис. 3 б).

Зв'язок між виробничими підрозділами стає жорстким і, відхилення в ритмі у будь-якій з підсистем безпосередньо відбиваються на інших. Загальна продуктивність системи "відправник-транспорт-одержувач" падає. Єдина можливість збільшити її - це переглянути принципи взаємодії для цих умов. Роль бункера повинні узяти на себе виробничі підрозділи (рис. 3 в).

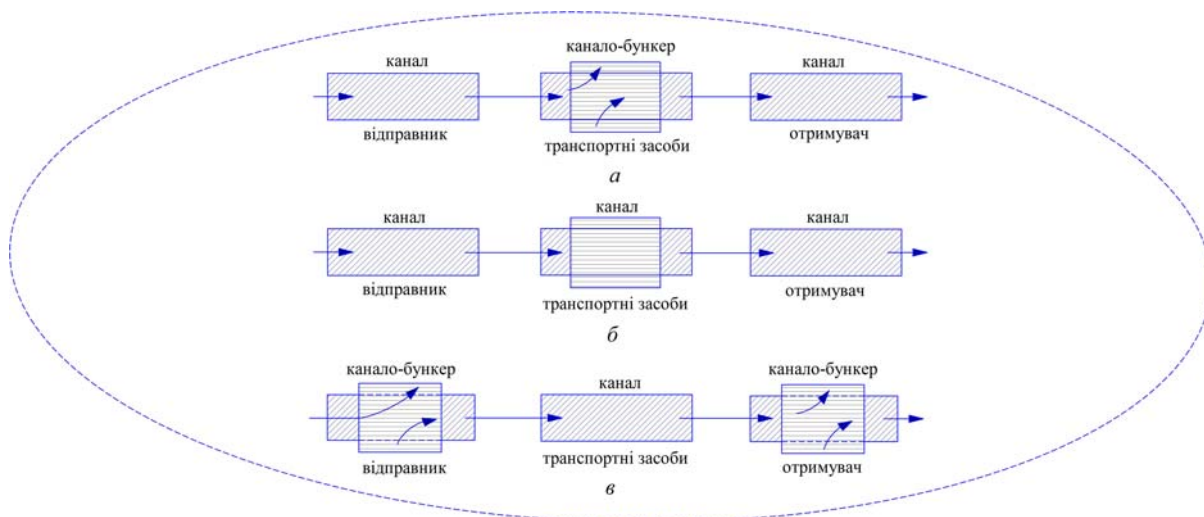


Рисунок 3 - Схематичне зображення взаємодії в системі "відправник-одержувач-транспорт" при динамічних резервах третього роду ДР-3: комплексно в ролі каналу і бункеру (а); тільки в ролі каналу (б); з виконанням ролі бункеру виробничими підрозділами (в)  
Джерело: розроблено автором

Резерви відправника дозволяють видавати на транспорт регульований потік. Резерви у одержувача дозволяють приймати від транспорту потоки без затримки. Усе це знижує міжопераційні простой на транспорті, що обумовлює зростання його пропускної спроможності.

Динамічні резерви четвертого роду ДР-4 утворюються за рахунок динамічної зміни властивостей структури транспортної системи. При цьому спостерігається тимчасове збільшення пропускної спроможності одних каналів за рахунок зменшення інших. Зміна пропускної спроможності здійснюється за рахунок зміни режиму роботи при переході на новий план формування струменів в потоці. Параметри каналів і бункерів стають ближче до оптимальних в цій ситуації. Методика визначення параметрів враховує взаємодію елементів транспортних систем. Збільшується фактична пропускна спроможність системи в цілому як каналу так і місткість бункеру, може бути здійснена заміна частини статичних резервів. Виявлено, що чим розвиненіші динамічні властивості структури, тим більше величини динамічних резервів четвертого роду.

Сукупність динамічних резервів дозволяє істотно підвищити ефективність роботи транспортної системи в умовах нерівномірності. Проте це вимагає вироблення нових підходів до принципів і методів оптимізації, до вибору ефективної організації роботи.

Підсистеми транспортних систем на відміну від елементів мають динамічні резерви. І завдання взаємодії ставиться як максимізація сумарних динамічних резервів:

$$R_g = \alpha_1 \bar{R}_{g1} + \alpha_2 \bar{R}_{g2} \rightarrow \max, \quad (3)$$

де  $\bar{R}_{g1}$ ,  $\bar{R}_{g2}$  - динамічні резерви, відповідно, першої і другої підсистеми при відособленій роботі;

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  - коефіцієнти, що враховують рівень взаємодії, тобто наскільки збільшуються резерви підсистем при об'єднанні їх в систему.

На рис. 4 представлена принципова схема взаємодії підсистем транспортної системи. На зовнішніх виходах підсистем зображені споживачі -  $B_1$  і  $B_2$ . Цим підкреслюється, що в кожній підсистемі сукупність струменів і потоки не рівнозначні.

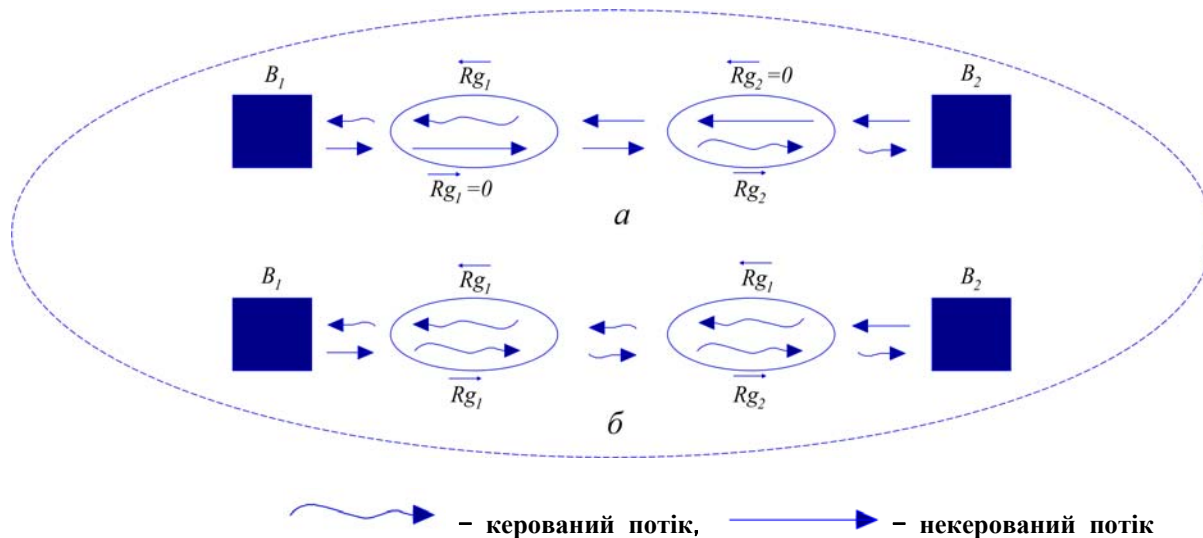


Рисунок 4 - Схема неузгодженої (а) та узгодженої (б) взаємодії струменів в потоці підсистем при динамічних резервах четвертого роду ДР-4

Джерело: розроблено автором

При неузгодженій взаємодії (рис. 4 а) струменів для потоків, що спрямовані в зовнішнє середовище (до споживачів) кожна підсистема має динамічні резерви  $\bar{R}_{g1}$  і  $\bar{R}_{g2}$ . Дії підсистем не погоджені, тому струмені потоків до іншої підсистеми не управляються. Для кожної підсистеми в цьому випадку потік, що йде до іншої підсистеми складається з однорідних струменів. Відбувається втрата різноманітності. Резерви  $R_{g1}$  і  $R_{g2}$  дорівнюють нулю. Підсистеми працюють, по суті, індивідуально, тобто це дві відособлені системи. Сумарні резерви (у обидві сторони) рівні:

$$R_g = \bar{R}_{g1} + \bar{R}_{g2}. \quad (4)$$

При узгодженій (керованій) взаємодії струменів потоку (рис. 4 б) виникає ефект організації. Прискорення і уповільнення струменів в потоці тепер відбувається упродовж усієї системи, як єдиного цілого. Розмах управління більший. Зростають і динамічні резерви:

$$R_{g1} = \bar{R}_{g1} + d_1 \bar{R}_{g2}, \quad R_{g2} = \bar{R}_{g2} + d_2 \bar{R}_{g1}, \quad (5)$$

де  $d_1$  і  $d_2$  - коефіцієнти, що враховують міру узгодженості дій підсистем в транспортних системах.

Таким чином, слід виділяти два типи взаємодії транспортних об'єктів - на рівні елементів (у статиці) і на рівні підсистем (у динаміці). У першому випадку узгоджуються параметри облаштувань (каналів і бункерів) двох підсистем, в другому - узгоджується управління: вводяться в них єдині цілі і критерії.

Перший тип взаємодії дає збільшення пропускної спроможності системи в цілому і здатності згладжувати струмені в потоках за рахунок зменшення диспропорції в параметрах технічних засобів, другий - за рахунок підвищення ролі управління в умовах нерівномірності. Слід зазначити, що можливості управління і розміри динамічних резервів тим більше, чим більше різних струменів виділяється в потоці, оскільки різні струмені вимагають індивідуальних резервів. А тому можна зробити узагальнення, що чим більше різноманітності в підсистемах, тим помітніше ефект організації, об'єднання їх в єдину систему.



### Висновки:

1. Запропоновано, що управління в транспортній системі слід розглядати як підтримку її стійкого стану і створення нової системної властивості, а саме динамічних резервів.

2. Зроблено припущення щодо розгляду раціональної взаємодії струменів підсистем і самих підсистем в транспортній системі, як узгодження управління в них та збільшення при цьому сумарних динамічних резервів.

3. Визначено, що при просуванні і переробці струменів транспортних потоків в транспортній системі підвищується їх дезорганізація.

4. Виявлено, що активною функцією транспортної системи є підвищення організації транспортних потоків, а запропонований теоретичний опис процесів організації і дезорганізації освітлює важливі сторони функціонування транспортних систем.

### Список літератури

1. Joseph Szyliowicz, Luca Zamparini A review of models for transport security and of their relevance for supply chains. *Transport Reviews*. 2022. Vol. 42. P. 717-724.
2. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія ; під заг. ред. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавництво ТОВ "КОД", 2017. 370 с.
3. Makarova I., Khabibullin R., Belyaev E., Mavrin V. Increase of City transport system management efficiency with application of modeling methods and data intellectual analysis. *Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives*. 2016. Vol. 32. P. 37-80.
4. Голуб Д.В. Методи та підходи до моделювання ефективності цілей операцій в транспортних системах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. 1. С. 317-327.
5. Chen Hengrui, Zhou Ruiyu, Chen Hong, Lau Albert Static and dynamic resilience assessment for sustainable urban transportation systems: A case study of Xi 'an, China. *Journal of Cleaner Production*, 2022. Vol. 368. P. 133-237.
6. Голуб Д.В., Аулін В.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Реалізація системного підходу при визначенні ефективності функціонування складних регіональних транспортних систем. *Вісник машинобудування та транспорту* . 2022. №1 (15). С. 44-51.
7. Ge Liping, Vob Stefan, Xie Lin Robustness and disturbances in public transport. *Public Transport. Planning and Operations*. 2022. Vol. 14. P. 191-261.
8. Аулін В.В., Біліченко В.В., Голуб Д.В., Замуренко А.С. Особливості дослідження ефективності транспортних систем на етапах життєвого циклу. *Вісник машинобудування та транспорту* . 2021. №1(13). С. 15-19.
10. Голуб Д.В. Теоретична модель транспортної системи як сукупності взаємодіючих і взаємоперетворюючих елементів та підсистем. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 5(36), ч. 2. С. 324-334.
11. Аулін В.В., Голуб Д.В., Біліченко В.В., Замуренко А.С. Формування показників оцінки ефективності транспортного процесу перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту* . 2020. №1(11). С.5-10.

### References

1. Joseph Szyliowicz & Luca Zamparini (2022). A review of models for transport security and of their relevance for supply chains. *Transport Reviews*. Vol. 42. P. 717-724 [in English].
2. Aulin, V.V., Golub, D.V., Grinkiv, A.V. & Lisenko, S.V. (2017). Metodologichni i teoretichni osnovi zabezpechennya ta pidvishennya nadijnosti funkcionuvannya avtomobilnih transportnih sistem [Methodological and theoretical bases of maintenance and increase of reliability of functioning of automobile transport systems] . V.V. Aulin (Ed.) . Kropivnickij: Vidavnictvo TOV "KOD" [in Ukrainian].
3. Makarova, I., Khabibullin, R., Belyaev, E. & Mavrin, V. (2016) Increase of City Transport System Management Efficiency with Application of Modeling Methods and Data Intellectual Analysis. *Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives*. Vol. 32. P. 37-80 [in English].



4. Holub, D.V. (2022). Metody ta pidkhody do modeliuвання efektyvnosti tsilei operatsii v transportnykh systemakh [Methods and Approaches to Modeling the Effectiveness of Operational Objectives in Transport Systems]. *Tsentrlnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences, Issue 5(36), part 1.* 317-327 [in Ukrainian].
5. Chen Hengrui, Zhou Ruiyu, Chen Hong & Lau Albert (2022). Static and dynamic resilience assessment for sustainable urban transportation systems: A case study of Xi 'an, China. *Journal of Cleaner Production. Vol. 368.* P. 133-237 [in English].
6. Holub, D.V., Aulin, V.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2020). Realizatsiia systemnoho pidkhodu pry vyznachenni efektyvnosti funktsionuvannya skladnykh rehionalnykh transportnykh system [Implementation of a system approach in determining the effectiveness of functioning of complex regional transport systems]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport, 1 (15),* 44-51 [in Ukrainian].
7. Ge Liping, Vob Stefan & Xie Lin (2022). Robustness and disturbances in public transport. *Public Transport. Planning and Operations. Vol. 14.* P. 191-261 [in English].
8. Aulin, V.V., Bilichenko, V.V., Holub, D.V. & Zamurenko, A.S. (2021). Osoblyvosti doslidzhennia efektyvnosti transportnykh system na etapakh zhyttievoho tsykladu [Peculiarities of the study of the efficiency of transport systems at the stages of the life cycle]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport, 1(13),* 15-19 [in Ukrainian].
9. Holub, D.V. (2022). Teoretychna model transportnoi systemy yak sukupnosti vzaiemodiiuchykh i vzaiemoperetvoriuiuchykh elementiv ta pidsystem [A theoretical model of the transport system as a set of interacting and mutually transforming elements and subsystems]. *Tsentrlnoukrajnskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. Issue 5(36), part 2.* 324-334 [in Ukrainian].
10. Aulin, V.V., Holub, D.V., Bilichenko, V.V. & Zamurenko, A.S. (2020). Formuvannya pokaznykiv otsinky efektyvnosti transportnoho protsesu perevezen [Formation of indicators for assessing the efficiency of the transport process]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu – Herald of mechanical engineering and transport, 1(11),* 5-10 [in Ukrainian].

**Dmytro Holub**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

### **Increasing the Efficiency of Management of the Technological Process of Delivery Based on the Analysis of Static and Dynamic Reserves of the Transport System**

The nature of static and dynamic reserves of the transport system and the degree of their influence on the technological process of delivery are given. The structure of flows connecting a specific supplier and consumer is considered. It was found that dynamic reserves are management reserves, and their size is determined by the amount by which static reserves can be reduced. The classification of dynamic reserves is given, the conditions of their occurrence are described, and interaction schemes are given.

It is shown that assigning the priority of one of the jets in the flows of the transport system leads to the acceleration of the passage of one jet at the expense of slowing down the other (others), and the delays are transferred from one jet to another while maintaining their total amount, that is, at an unchanged average speed of the flows. It was found that the acceleration of the flow leads to the release of a certain group of vehicles, which can be used as a reserve, and when it slows down, on the contrary, additional vehicles are absorbed due to an increase in their number on the road. There are also a number of technological mechanisms for speeding up and slowing down the progress of flows.

It has been found that the transport system can actively adapt to changes in the rhythms of senders and receivers due to the management of stream jets, but the possibilities of its adaptation are quite limited. And therefore, if the rhythms of the jets in the flow are too much out of sync, there is a possibility of a moment when reliable transport communication cannot be ensured and the transport system begins to play the role of limitation.

It was found that the set of dynamic reserves allows to significantly increase the efficiency of the transport system in conditions of unevenness, but it requires the development of new approaches to the principles and methods of optimization, as well as the choice of effective work organization. It is assumed that the management capabilities and the size of the dynamic reserves of the transport system are greater, the more different jets are released in the flow, and therefore the greater the diversity in the subsystems, the more noticeable is the effect of organization, combining them into a single system.

**transport system, static and dynamic reserves, jet, flow, acceleration, vehicles, communication**

*Одержано (Received) 10.02.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 23.02.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 656:004

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.222-228](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.222-228)

**Т.В. Гайкова**, доц., канд. техн. наук, **В.Г. Загорянський**, проф., д-р техн. наук,  
**А.О. Леонтович**  
*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,*  
*м. Кременчук, Україна*  
*e-mail: alleont@ukr.net*

## Впровадження цифрових технологій в управління ланцюгами постачань

У статті розглянуто особливості цифровізації в управлінні ланцюгами постачань. Викладено питання про сучасний стан впровадження програмного забезпечення в розвинені транспортні комплекси. Визначено фактори, що впливають на успішну автоматизацію транспортного процесу. Обґрунтовані завдання в галузі використання сучасних транспортно-інформаційних методів. Проведене дослідження дає змогу проаналізувати важливі напрями інноваційного розвитку та застосування сучасних технологій в сфері транспорту.

**транспортні технології, цифрові інформаційні системи, ланцюги постачань, електронна ТТН**

**Постановка проблеми.** Сучасний етап розвитку транспортних технологій передбачає впровадження та забезпечення ефективних інформаційно-цифрових систем. Використання інновацій у галузі сприяє зменшенню часу на обробку інформації, покращення показників транспортного процесу, можливість проведення стратегічного планування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Різним аспектам розвитку цифровізації у транспортній галузі присвячено велику кількість наукових праць українських та зарубіжних дослідників. Наукові дослідження С.В. Іванова та О.С. Вишневського присвячені дослідженню головних тенденцій розвитку цифрових платформ як частини цифрової економіки [1, с. 48]. Основні етапи становлення цифрової економіки охарактеризував у своїх роботах С.В. Коляденко [2, с. 109]. Зарубіжні науковці Лянгуан і Герц вважали, що логістична галузь постійно зростає за рахунок зростання логістичних фірм і інтеграції ринку [3, с. 1004]. Безумовно, інтернет є одним з ключових факторів розвитку цифрової логістики. Крім того, в статтях європейських вчених Флінта, Ларсона, Гаммельгарда і Ментцера однією з основних причин, по якій логістична галузь вважається не на піку розвитку, є те, що «Логістичні дослідження, інновації, сучасні концепції проводяться зовсім рідко та за нагальної потреби» [4, с. 113].

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження шляхів вирішення типових проблем у транспортному процесі за рахунок використання інформаційно-цифрових методів.

**Виклад основного матеріалу.** Зараз у всіх сферах в економічному світі глобалізація розглядається як вирішальна та рушійна причина для вдосконалення будь-якої компанії. Як частина глобалізації, сучасна інформаційна база та технології мають значний вплив на життя економіки та суспільства, під впливом яких змінюється існуюча економіка та спосіб життя людей. У міру поточної та майбутньої модернізації транспортної галузі настав реальний час застосування нових видів і методів відносин

між транспортними організаціями та споживачами [5]. Крім того, цифровізація транспортного сектору сприятиме оптимізації транспортно-логістичних витрат. Сучасні інформаційні системи характеризуються створенням єдиного інформаційного простору для всіх учасників взаємодії.

Це вірно в тому сенсі, що використання цифрових і розумних інформаційних технологій в управлінні логістичним сектором приносить численні корисні функції. Наприклад, завдяки активному використанню інформаційних технологій, надходження нових замовлень, а також процес доставки і транспортування вантажів, управління складом і автопарком значно прискорюють відносини ланцюга постачань. В результаті збільшення швидкості цих процесів скорочується час виконання замовлення, скорочення паперового документообігу, знижується роль людського фактору, що призводить до зниження матеріальних витрат. Крім того, наукові відкриття, втілені в цифровізації, створюють нові можливості для ресурсів, забезпечують потенціал зростання бізнесу, механізми взаємодії між економічними суб'єктами, новими ринками, галузями.

Якщо взяти за приклад логістичний ринок Сполучених Штатів, то без перебільшення можна сказати, що на цьому ринку в даний час спостерігається величезна цифровізація. Наприклад, великі постачальники, такі як Amazon, J.B. Hunt і Ch. Robinson, використовують у своїй діяльності цифрові технології, дрони і хмарні технології. Логістична галузь – це величезний ринок з доходами понад 4 трильйони \$ у всьому світі, що зачіпає різні сектори бізнесу, від електронної комерції до виробництва та високих технологій.

У цифровізації логістики в даний час актуально впровадження ряду сучасних технологій:

- Автоматизація.

Автоматизація у виробництві та сфері послуг має бути одним із ключових рішень у цифровізації транспортного сектору. Яскравим прикладом цього є порт Роттердам в Нідерландах. Цей порт називають «найдосконалішим портом у світі», оскільки порт є лідером у впровадженні сучасних технологій. Повністю автоматизовані контейнерні термінали порту використовують комп'ютерно-програмовані крани для розвантаження вантажів, що сприяє поліпшенню технологічних характеристик і зниженню трудомісткості. За даними Wall Street Journal, автоматизація дозволить нідерландському порту підвищити загальну продуктивність на 30 відсотків.

- Робототехніка.

Роботи, на відміну від автоматизованих механізмів, призначені для виконання декількох завдань одночасно, що робить їх застосування в сфері логістики практично безмежним. Особливо це стосується операцій електронної комерції, які вимагають високої швидкості та ефективності для задоволення швидкого зростання онлайн-продажів.

- Технології гаджетів.

Вони є невід'ємною частиною логістичної галузі.

- Дрони.

Дрони мають багато перспективних застосувань для логістичної галузі, особливо можливість координувати нові форми швидкої доставки до споживачів. Нерідкі випадки, коли в найближчі роки дрони стають основним засобом доставки вантажів в густонаселені міські та сільські райони.

Аналізуючи досвід розробки і впровадження інноваційних продуктів в транспортній логістиці, можна відзначити, що в існуючих системах в Україні є ряд недоліків:

- людський фактор впливає на швидкість доставки як для споживача товару, так і водія транспортного засобу;

- недостатньо уваги приділяється розвитку інновацій в системі транспортної логістики для інтеграції складів і транспортних засобів.

Таким чином, ефективне управління виконанням функцій, що полегшують процес доставки товару замовнику, на сьогоднішній день не забезпечило активної платформи для впровадження інноваційних технологій. Існує безліч технологій, систем, програм, що дозволяють відстежувати і ідентифікувати як транспортний засіб, так і вантаж окремо. Однією з проблем транспортної логістики є те, що вантажоперевезення не пов'язані з ланцюгом постачань за допомогою єдиної цифрової платформи, створення якої дозволить заощадити кошти і оптимізувати як національні поставки товарів, так і міжнародні.

Програмисти компаній щороку розробляють і модифікують свої системи. Відсутність єдиної цифрової платформи для транспортної галузі в Україні в даний час стримує швидкий розвиток сектору транспортної логістики. У майбутньому це зручна платформа для реалізації інноваційного підходу до процесу моделювання транспортно-логістичної системи для обслуговування певного кола клієнтів на загальній цифровій платформі.

Для впровадження цифрової платформи в транспортно-логістичну систему в нашій країні необхідно провести наступні заходи:

- створення єдиної точки доступу для цифрових платформ в ланцюзі поставок в сфері інноваційної транспортно-логістичної взаємодії;

- підтримка ефективного обміну транспортно-логістичною інформацією між учасниками ланцюга поставок;

- єдині стандарти, необхідні для проведення спільних інноваційних досліджень в області транспорту і логістики, що дозволяють учасникам використовувати зовнішні розподілені системи для зберігання і обробки необхідних даних;

- інтеграція із зовнішніми інформаційними системами, в тому числі іноземними, для виявлення учасників ланцюгів поставок і забезпечення їх взаємодії;

- забезпечення управління взаєморозрахунками за транспортно-логістичними операціями серед учасників цифрової платформи;

- впровадження технологічних інтерфейсів взаємодії з цифровими платформами учасників ланцюгів постачань і провідними логістичними центрами.

Якщо подивитися на розвинені зарубіжні країни, то можна побачити, що згадані процеси були повністю реалізовані кілька десятиліть тому. Зокрема, транспортний сектор повністю автоматизований в США, Німеччині, Франції, Англії, Туреччині, Сінгапурі, ОАЕ, Китаї, Малайзії, Кореї, Японії та інших країнах. У результаті, транспортний сектор протягом багатьох років розвивається у всіх напрямках, а процеси здійснюються за допомогою цифрових технологій. Сьогодні ці країни переходять на новий рівень за допомогою штучного інтелекту, заснованого на концепції Smart City.

Одним з прикладів використання цифрових технологій в автомобільному транспорті України є проєкт електронної товарно транспортної накладної (e-ТТН). Вона мала стати обов'язковою для всіх транспортних перевезень в Україні ще з 1 серпня 2022 року. Однак, у зв'язку з повномасштабним вторгненням, роботу над проєктом тимчасово призупинили [6].

Проте, уже у вересні 2022 року, попри всі складнощі, відбулося поновлення роботи над проєктом спільними зусиллями Міністерства інфраструктури України з Міністерством цифрової трансформації. Згідно з результатами проведеного опитування, у якому взяли участь 160 компаній, близько 84% учасників логістичного ринку України готові були долучитися до тестування e-ТТН вже у III-IV кварталі 2022 року.

Для впровадження е-ТТН необхідно розробити систему, за допомогою якої всі учасники ринку вантажних перевезень зможуть швидко обмінюватися даними. Для цього Міністерство інфраструктури створило центральну компоненту системи е-ТТН, в якій зберігатимуть усі необхідні дані для взаємодії між усіма провайдерами ЕДО (електронний документообіг). Щоб почати створювати е-ТТН, представники бізнесу мають обрати для співпраці будь-якого провайдера, що пройшов сертифікацію. Незалежно від того, з яким провайдером працюватиме відправник, одержувач і перевізник вантажу, дані е-ТТН синхронізуватимуться через систему е-ТТН. Вони будуть доступні для всіх сторін вантажоперевезення, навіть якщо у кожній з них – свій провайдер.

Кабінет е-ТТН забезпечуватиме всі необхідні функціональні можливості для учасників перевезень як відправник, отримувач, перевізник.

Основні задачі, які необхідні для учасників перевезень: створення е-ТТН, підписання, реєстрація, створення всіх необхідних актів на основі е-ТТН, реєстрація цих документів – це той набір функцій, які передбачає кабінет е-ТТН.

Кабінет е-ТТН – самостійне хмарне рішення, яке дозволить мати доступ до е-ТТН усім, хто бере участь у перевезенні. Кабінет забезпечує можливість створення е-ТТН, ведення реєстру е-ТТН, можливість накладання КЕП, отримання актуального статусу е-ТТН, відправки е-ТТН для будь-якого учасника перевезення. І оскільки Кабінет е-ТТН є хмарним рішенням, доступ до нього можна отримати з будь-якого пристрою [7].

Кабінет водія – мобільне рішення, яке дозволить перевізнику підписувати е-ТТН на своєму смартфоні. Воно передбачає максимально простий, зручний та інтуїтивно зрозумілий функціонал для водія чи експедитора, що дозволить йому переглядати та накладати е-підпис саме на свою е-ТТН.

е-ТТН АРІ – інструмент, який комплексно задовольняє потреби логістики в створенні підписанні, отриманні та відправці е-ТТН, ведення реєстру е-ТТН безпосередньо у своїй обліковій системі. Набір інструментів АРІ інтегруються у наявну облікову систему організації для доступу до провайдера, що дозволить логістичній компанії реалізувати електронний документообіг ТТН у звичному для себе інтерфейсі облікової системи.

Завдяки перерахованим продуктам можна задовольнити будь-які потреби учасників, починаючи від простого сценарію, де створюється лише ТТН вантажовідправником, надсилається перевізнику та далі її підписує власне вантажоотримувач. Так і нестандартні ситуації, коли, наприклад, на етапі перевезення є необхідність замінити перевізника чи транспортний засіб, система дозволяє до е-ТТН сформувати необхідні документи з вказанням всіх реквізитів в Акті.

Простий сценарій. Класична ситуація, коли учасниками транспортного процесу є: Вантажовідправник – Перевізник – Вантажоодержувач. Перевезення вантажу виконується від Вантажовідправника одним транспортом. Простіше кажучи, перевезення вантажу здійснюється із пункту А в пункт Б, із залученням одного Вантажоперевізника (рис. 1). Вантаж проходить всі необхідні ступені оформлення документообігу, в якому задіяні всі учасники процесу.

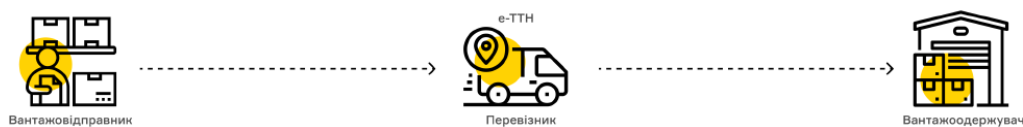


Рисунок 1 – Характеристика класичної ситуації

Джерело: [7]

1) Етап перший. Вантажовідправник створює, підписує і реєструє е-ТТН.

Компанія Linkos для таких цілей та забезпечення Відправника зручним інструментом розробляє кабінет е-ТТН. У кабінеті Вантажовідправник зможе швидко та просто створити е-ТТН, підписати КЕП та відправити е-ТТН на реєстрацію до центральної бази даних (далі – ЦБД). Також враховано той факт, що деякі великі підприємства при створенні е-ТТН будуть використовувати свою облікову систему. Тоді у нагоді стане застосування рішення API, що досить швидко можна інтегрувати у облікову систему користувача. Рішення API забезпечить підписання документа, створеного в обліковій системі е-ТТН, та реєстрацію в ЦБД.

2) Етап другий. Перевізник (водій) повинен накласти свій електронний підпис (КЕП) для підтвердження отримання вантажу, завантаження його в транспортний засіб та відповідності цілісності, якості та пакування отриманого товару. Водночас, Перевізник (водій) матиме простий, зручний інструмент для виконання своєї частини дій необхідних для легітимізації та підтвердження отримання товару, який буде перевозити. Тобто, Перевізник (водій) повинен отримати сформовану, підписану та зареєстровану Вантажовідправником е-ТТН і підтвердити її своїм КЕП та зареєструвати в ЦБД.

3) Етап третій. Після формування, підписання е-ТТН Вантажовідправником та Перевізником (водієм), Вантажодержувач отримує з ЦБД е-ТТН. Після прибуття вантажу, перевірки його цілісності та якості Вантажодержувач також підписує е-ТТН, підтверджуючи своїм КЕП та реєструє в ЦБД. Після цього операція вважається завершеною, однак Перевізник також може накласти свій КЕП, що підтвердить доставку товару у належній якості до Вантажодержувача.

Іноді трапляються ситуації, коли один водій має змінити іншого в певному логістичному пункті, або ж навіть змінити автомобіль для перевезення. Причиною таких замін може бути поломка автомобіля тощо. Тому пропонуємо розглянути таку ситуацію і дії, що у такому випадку потрібно виконати з е-ТТН (рис. 2).



Рисунок 2 – Характеристика ситуації з заміною автомобіля

Джерело: [7]

1) Етап перший. Вантажовідправник формує, підписує та реєструє е-ТТН в ЦБД.

2) Етап другий. Далі, як і в попередній ситуації, е-ТТН отримує Перевізник (автомобіль 1), який підписує е-ТТН, реєструє її та вирушає до Вантажодержувача. Але, якщо в дорозі трапився форс-мажор, товар необхідно перезавантажити в іншу машину Перевізника (автомобіль 2), щоб не порушувати умови надання послуг з перевезення.

3) Етап третій. Процес перевантаження товару від Перевізника (автомобіль 1) до Перевізника (автомобіль 2). Такий процес супроводжується оформленням Акта перевантаження. Акт перевантаження формується на основі зареєстрованої е-ТТН, що перебуває у ЦБД, яку отримав Перевізник водій (автомобіль 1). Крім того, в Акті перевантаження зазначаються дані кожного з водіїв Перевізника, причина перевантаження. Акт має підписати кожен з водіїв своїм КЕП: спочатку Акт підписує водій автомобіля 1 та реєструє в ЦБД, а потім його підписує водій автомобіля 2 і також реєструє цей Акт в ЦБД. Важливо, що первинна е-ТТН, яка була створена

Вантажовідправником, тепер містить нові дані з Акта перевантаження, який вносить зміни до е-ТТН щодо нового водія Перевізника.

4) Етап четвертий. Під час отримання товару Вантажоодержувач завантажує з ЦБД е-ТТН з Актом перевантаження, підписує та реєструє е-ТТН в ЦБД. За бажанням, Перевізник водій (автомобіль 2) також може накласти свій КЕП, що підтвердить доставку товару у належній якості до Вантажоодержувача.

У будь-якому випадку весь процес документообігу стає значно оперативнішим та простішим з використанням електронних ресурсів, що дозволяють легко внести всі необхідні зміни до документації, маючи КЕП.

**Висновки.** Виконані дослідження доводять особливе значення реалізації цифрових платформ у транспортній галузі. За рахунок використання нових інноваційних методів, на прикладі електронної товарно-транспортної накладної, скорочується час обробки документів до 90%, захист конфіденційної інформації у хмарних серверах, економія коштів на друк документації, легкий та швидкий пошук документів за допомогою онлайн-архіву, зручний формат роботи для водіїв, можливість інтеграції з наявними системами за допомогою API. Усі ці показники позитивно впливають на розвиток транспортних процесів та швидкого досягнення результату за найменшими витратами.

## Список літератури

1. Іванов С.В., Вишневецький О.С. Електронні платформи як інструмент модернізації економіки України. *Вісник економічної науки України*. 2017. № 1(32). С. 47–53.
2. Коляденко С.В. Цифрова економіка: передумови та етапи становлення в Україні та світі. *Економіка. Фінанси. Менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2016. № 6. С. 105–112.
3. Journal "Prospects of the transport industry" 2020. Germany
4. "Logistics 4.0 Towards Digitization". Vincent Bamberger, Florent Nansé, Bernd Schreiber, Michael Zintel. 2018.
5. Мороз М., Загорянський В., Гайкова Т., Кузев І. Використання методів дослідження операцій для оптимізації автомобільних перевезень масових вантажів в агропромисловому комплексі. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2022. №1(11), С. 44–50. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.01.07>
6. Проект "Електронна товарно-транспортна накладна". СОТА: веб-сайт . URL: <https://sotabuh.com.ua/news/proiekt-elektronna-tovarno-transportna-nakladna>. (дата звернення: 09.02.2023)
7. Кейси е-ТТН: класичне перевезення та зміна перевізника . Medoc: веб-сайт . URL: <https://medoc.ua/news/kejsi-e-tn-klasichne-perevezennja-ta-zmna-perevznika> (дата звернення: 10.02.2023)

## References

1. Ivanov, S.V. & Vyshnevskyi, O.S. (2017). Elektronni platformy yak instrument modernizatsii ekonomiky Ukrainy [Electronic platforms as a tool for modernizing Ukraine's economy]. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy – Herald of Economic Science of Ukraine*, 1(32), 47–53 [in Ukrainian].
2. Koliadenko, S.V. (2016). Tsyfrova ekonomika: peredumovy ta etapy stanovlennia v Ukraini ta sviti [Digital economy: prerequisites and stages of development in Ukraine and the world]. *Ekonomika. Finansy. Menedzhment: aktualni pytannia nauky i praktyky – Economy. Finances. Management: topical issues of science and practice*, 6, 105–112 [in Ukrainian].
3. Journal "Prospects of the transport industry" (2020). [in Germany].
4. Bamberger, V., Nansé, F., Schreiber, B., & Zintel, M. (2018). Logistics 4.0 Towards Digitization [in Germany].
5. Moroz, M., Zahorianskyi, V., Haikova, T. & Kuziev, I. (2022). Vykorystannia metodiv doslidzhennia operatsii dlia optyimizatsii avtomobilnykh perevezen masovykh vantazhiv v ahropromyslovomu kompleksii [Use of operations research methods to optimize road transportation of bulk cargo in the agro-industrial complex]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh – Economy. Finances. Management: current issues of science and practice of

- the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies, 1(11), 44–50 [in Ukrainian].*
6. Proiekt "Elektronna tovarno-transportna nakladna" [Project "Electronic consignment note"]. Sait «SOTA». *sota-buh.com.ua*. Retrieved from <https://sota-buh.com.ua/news/proiekt-elektronna-tovarno-transportna-nakladna> [in Ukrainian].
  7. Keisy e-TTN: klasychne perevezennia ta zmina pereviznyka [eB/L cases: classic transportation and change of carrier]. Sait «Medoc». *medoc.ua*. Retrieved from <https://medoc.ua/news/kejsi-e-ttn-klasichne-perevezennja-ta-zmna-perevznika> [in Ukrainian].

**Tetiana Haikova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Zahorianskyi**, Assoc. Prof., DSc, **Alona Leontovych**, master student

*Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine*

### **Integration of Digital Technologies Into Supply Chain Management**

During the period of military condition, one of the defining factors of the national economy and the welfare of the society is a well-established, automated process of delivery of cargoes by automobile transport. Changing business models under the influence of the situation in the country requires more flexible methods, as an example of which can be the formation of information networks to strengthen transport communications and to reduce transaction costs in the industry. Modern information and digital systems provide enterprises with effective strategic management, due to analysis of collected data and further planning of activity using risk-management methods. But it is also important to consider the security of such data and the protection of consumer privacy.

Digital technologies are actively used in transport logistics when making certain payments for the given services. When delivering a cargo, as a rule, all conditions specified in the contract of carriage must be fulfilled. All payment transactions are carried out on digital platforms and demonstrate high efficiency, as well as the possibility to monitor compliance with payment terms. However, the expansion of the use of digital technologies in transport logistics has much greater potential, which will provide significant efficiency of the whole transport and logistics system.

Digital technologies are built to meet the specific requirements of the task. The large number of operations during transportation of cargoes, peculiarities of transportation, as well as the necessary types of packing, storage and sorting include a certain array of data. They also provide data sets that need to be quickly integrated into specific threads. A very important component is the creation of information systems in the digital industry, where all transactions are carried out in digital format and show high results. In the case of road transportation, the transport documentation is fully transferred to the electronic platform and significantly reduces the cost of the unit of the transported cargo. Currently, software is being developed, connected with the use of electronic goods and transport waybills (e-TTS) for all types of transport.

By using new innovative methods, on the example of electronic goods and transport waybill, the processing time of documents is reduced to 90%, protection of confidential information in cloud servers, cost savings on documentation printing, easy and fast search of documents with the help of online archive, convenient format of work for drivers, possibility of integration with existing systems with the help of API. All these indicators positively influence the development of transport processes and rapid achievement of results at the lowest cost.

**transport technologies, digital information systems, supply chains, electronic TTS**

*Одержано (Received) 07.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 16.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*



**Т.В. Гайкова**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Мороз**, доц., канд. екон. наук,  
**С.Р. Олексієнко**

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
м. Кременчук, Україна  
e-mail: oleksienkosergiy@ukr.net*

## Аналіз перспектив розвитку проєкту каршерінгу

У статті представлено розробку міських систем поділу автомобілів. В останні роки спостерігається суттєве збільшення кількості таких систем, що впроваджуються в усьому світі. Кількість користувачів так швидко зростає, що послуги спільного використання автомобілів впливають на поведінку транспорту. Крім того, процес сприяє змінам модального розподілу. Представлений аналіз охоплює системи експлуатації в Європі, Азії та Північній Америці: запровадження систем поділу автомобілів та перспективи їх розвитку в 2020–2025 роках.

**каршерінг, транспортні технології, проєктний аналіз, оренда автомобілів**

**Постановка проблеми.** Враховуючи зростання попиту на транспорт через збільшення населення та тиск на ефективність часу, сучасні міста стикаються зі збільшенням періодичного або постійного перевантаження своїх транспортних мереж. Тому, затори слід розглядати разом з іншими негативними факторами, що пов'язані з транспортом, як такі, що мають значний вплив на навколишнє середовище. До них належать зростання рівня шуму і викидів забруднюючих речовин, споживання енергії. Ще одним викликом є дефіцит потужностей для розширення транспортної системи, що призводить до інших бар'єрів, наприклад, обмеженості паркувального простору. Враховуючи ці обмеження, негативний вплив може бути зменшено лише шляхом внесення організаційних та інфраструктурних змін, а також сприяння екологічному поведінню та врахування навколишнього середовища при плануванні поїздок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Міста розглядають різні удосконалення. Американський досвід початку 20-го століття показує, що розширення транспортної мережі шляхом додавання смуг або будівництва додаткових проїзних шляхів не є бажаним рішенням [1-2]. Покращення досягнуте, але шлях є лише короткочасним і дуже швидко люди, що подорожують, змінюють свою поведінку оскільки вичерпається пропускна здатність нової транспортної системи. Тому потрібні більш комплексні рішення, такі як зміни в організації руху та інтегральних інфраструктурних схемах, які концентруються на перебудові існуючої транспортної системи, а не на її розширенні [4, 7-8]. Технологічний прогрес та організаційні зміни призводять до появи нових видів транспорту, а існуючі вдосконалюються та переглядаються відповідно до попиту користувачів. Здається, це єдиний підхід, який може змінити міські транспортні системи на краще [5-6].

Міста, як правило, задовольняють потреби транспорту через свої системи громадського транспорту. Ця особлива форма транспорту призначена для інтеграції потоків пасажирів, оскільки вона дозволяє подорожувати за конкретними маршрутами і відповідно до визначених термінів. Однак, динамічні концепції управління громадським транспортом можна знайти в ряді робіт [4]. При цьому, через різноманітність потреб, навряд чи можна задовольнити вимоги всіх користувачів

транспорту. Наприклад, результати кількох досліджень на транспорті громадського транспорту в містах середнього розміру показали невідповідність між пропозицією і попитом на транспортні послуги. Ці послуги включають байкшеринг, систему прокату велосипедів, і каршерінг, систему прокату автомобілів, яка часто базується на електромобілях. Рішення призначені для зменшення негативного впливу транспорту на навколишнє середовище, а також простір, який займають транспортні засоби, як приклад, приватні легкові автомобілі.

**Постановка завдання.** Метою статті є проектний аналіз розвитку міських систем поділу автомобілів, які привертають все більшу кількість користувачів і констатація їх поточного стану. Стаття містить формальний прогноз, що представляє перспективи і можливості для досягнення бажаного рівня розвитку в 2020-2025 роках. Представлений в статті аналіз охоплює системи, що працюють в Європі, Азії та Північній Америці.

**Виклад основного матеріалу.** Каршерінг, як модель, що доповнює послуги міського транспорту, базується на короткостроковій оренді автомобілів, які пропонуються операторами в міських районах. Його концепція схожа на системи прокату автомобілів з тією лише різницею, що машини можуть бути найняті менш ніж за годину. Спільне використання автомобілів – це одна з можливостей, яка вписується в ідею спільного використання економіки. Згідно з цією ідеєю, бізнес-моделі засновані на використанні популярних онлайн-платформ для надання короткострокового використання послуг або товарів. Діяльність економіки поділу проявляється у наданні (оренда) товарів і послуг іншим через онлайн-платформу або мобільний додаток. Відповідно до цього принципу, каршерінг є альтернативою власному авто з гарантованою доступністю та обслуговуванням.

Спочатку системи спільного використання автомобілів є результатом потреби володіти автомобілем, стикаючись із браком фінансування для його придбання. Досить часто ці системи розроблялися як соціальні ініціативи, що реалізуються асоціаціями людей, зацікавлених у поділенні транспортного засобу. З часом і з розвитком нових інформаційних технологій міські системи прокату автомобілів еволюціонували в бік нової концепції. В Україні з 2018 року працює додаток від Getmancar який дозволяє брати автомобіль в оренду за допомогою смартфона [9]. Представляючи системи каршерінгу, ми розрізняємо три основні типи [10]:

1. Стационарний/класичний (вперед-назад) каршерінг – коли ми можемо орендувати автомобіль і повернути його в одному місці;
2. Односторонній станційний каршерінг – коли ми орендуємо машину на одній станції, а повертаємо її на іншій, однак це обмежено різними пунктами прокату та поверненням, яке створено одним системним оператором;
3. Free-floating carsharing – коли ми орендуємо та повертаємо автомобіль у будь-якій доступній точці міста.

У проектному аналізі визначаються додаткові рішення для спільного використання автомобілів, які є комбінацією основних типів, що згадуються вище. Однак, незалежно від того, як ми винаймаємо та повертаємо транспортні засоби в місті, ми можемо виділити дві групи автопарків:

1. На базі згоряння – автомобілі, що складаються з класичних бензинових або дизельних двигунів;
2. «Зелені» транспортні засоби – електричні або гібридні автомобілі, що є екологічною альтернативою класичним.

Автомобілі, що використовуються в системах поділу, представлені на рис.1.



Рисунок 1 – Автомобілі з електродвигуном та гібридні

Джерело: [10]

Хоча каршерінг є новою концепцією для багатьох міст і часто описується як інноваційний, хоча перші письмові записи про нього в літературі датуються 1948 роком. У той час один із Zürich-based житлових кооперативів, відомий як "Sefage", пропонував своїм клієнтам короткострокову оренду автомобіля. В 1970-х роках подальші ініціативи були поступово протестовані в інших європейських країнах. Вони були короткими життєвими практиками, заснованими спочатку на тому, щоб зробити кілька автомобілів доступними для користувачів. Вони випробовувалися на клієнтах, які мали дефіцит грошей, щоб купити власний автомобіль. Наприкінці 1980-х років в Європі кількість проєктів каршерінгу зростає і деякі з них фактично досягли успіху. Вибрані початкові програми каршерінгу, які діяли в Європі до кінця 1990-х років, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Програми каршерінгу, які діяли в Європі

Початок	Країна, місто	Назва проєкту каршерінгу	Кількість транспорту
1948	Switzerland, Zürich	Sefage	27
1971	France, Montpellier	Procotip	35
1973	Holland, Amsterdam	Witkar	35
1976	Sweden, Lund	Bilpoolen	41
1977	England, Suffolk	Share-a-Car Service	43
1983	Sweden, Örebro	VivallaBil	5
1985	Sweden, Gothenburg	Bilkooperativ	20
1987	Switzerland, Zürich	ATG Auto TeiletGenossenschaft	39
1987	Switzerland	ShareCom	97
1988	Germany, Berlin	StadtAuto Berlin	300
1993	Germany, München, Frankfurt	Lufthansa Airlines car-sharing	125
1993	Switzerland, Zürich	CarShare – Swissair	50
1997	Switzerland	Mobility Carsharing Switzerland	1200
1997	France	Praxitele	50
1997	Germany	Volkswagen car-sharing	227
1999	France, La Rochelle	Liselec	50

Джерело: розроблено автором

Першими системами каршерінгу були тестові проєкти, які припиняли свою діяльність через пару років. Великий розвиток каршерінгу почався в 2000 році з приходом організацій, які забезпечували короткостроковий прокат автомобілів. У той час глобальні лідери почали свою роботу, включаючи Zipcar і Flexcar в США, City Car Club (нині Enterprise Car Club) у Великій Британії. У 2008 році в Європі каршерінг

почали пропонувати традиційні компанії з прокату автомобілів, такі як Hertz, а потім і виробники автомобілів, наприклад Daimler і Car2go. Вже в 2009 році системи каршерінгу експлуатувалися в 14 європейських країнах.

В останні роки каршерінг вийшов на міжнародні ринки і поступово привернув більше інтересу до Європи, Азії та Північної Америки. Згідно з доповіддю "Інноваційна мобільність: погляд на автомобільне розділення" у 2014 році односторонні системи спільного використання автомобілів діяли в 33 країнах – близько 4,8 млн користувачів і 104000 транспортних засобів. Системи досягли свого піку інтересу до Європи в 2006-2014 році (на основі даних Австрії, Бельгії, Чехії, Данії, Фінляндії, Франція, Німеччина, Греція, Угорщина, Ірландія, Італія, Нідерланди, Норвегія, Португалія, Іспанія, Швеція, Швейцарія, Туреччина, Велика Британія). На Європу припадало 46% світового автомобільного бізнесу. Північна Америка прийшла другою (дані з Канади, Мексики і США) з 34% світового автомобільного бізнесу.

Сьогодні, незалежно від континенту (Європа, Азія та Північна Америка), можна спостерігати значний розвиток систем каршерінгу. У Європі лідером є Німеччина. На початку 2018 року системи обміну автомобілями працювали в 677 німецьких містах, тоді як кількість зареєстрованих користувачів була понад 2000000, що свідчить про значне збільшення розвитку систем обміну автомобілями по всій Європі в порівнянні з 2014.

Що стосується поточного стану азіатського ринку, то варто зазначити, що в 2018 році тільки в Шанхаї кількість користувачів склала 1,2 мільйона. Більше того, у 2018 році оцінна кількість автомобілів, які орендовані у Пекіні, Шанхаї, Ханчжоу, Шеньчжені, Чанша, Ухань перевищила 26000 одиниць. У 2018 році на північноамериканському ринку було зафіксовано понад 500000 користувачів в Канаді, які використовували систему каршерінг понад 7000 автомобілів, тоді як у США було 1505447 користувачів і понад 17000 автомобілів, а в Мексиці 10127 користувачів і 390 автомобілів.

Враховуючи нинішній швидкий розвиток систем спільного використання автомобілів, актуально дослідити їхній майбутній розвиток. У цьому контексті зміни в модальному розподілі в бік спільного використання автомобілів є дуже важливими. Вони є наслідком насиченості транспортних мереж транспортними засобами та відсутності можливості додати інші види транспорту. Очікуваний зростаючий інтерес до систем спільного використання автомобілів матиме великий вплив на роль інших видів транспорту в містах. На рисунку 2 наведено прогноз щодо збільшення кількості автомобілів, які використовуються в режимі каршерінгу в Китаї. Представлені змінні базуються на реальних даних і поліноміальній кривій. Ще одна важлива складова розвитку – інвестиції в електромобілі операторів каршерінгу в Китаї.

На рисунках 3 і 4 представлено прогноз кількості користувачів каршерінгу в Європі та світі. Прогноз може відрізнятися залежно від джерела даних. Тим не менш, очікується, що цифри зростатимуть. Графіки побудовані на основі розрахунків за формулою поліноміальної регресії (1):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \dots + \beta_n x^n + \varepsilon \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  – невизначена випадкова помилка, обумовленим скалярною змінною  $x$ . У цій моделі для кожної одиниці збільшення значення  $x$ , умовне сподівання  $y$  збільшується на  $\beta_1$  одиниць.

Рівняння, що лежать в основі поліноміальних кривих, підтверджують очікуване зростання в наступні роки [3]. Індикатори, такі як  $R^2$  (коефіцієнт детермінації), підтверджують, що визначені тенденції близькі до реального зростання.

На основі проведеного аналізу та даних [11] очікується, що в 2025 році системи спільного використання автомобілів задовільнять попит на транспорт. Однак насиченість ринку не обов'язково може означати, що тренд зупинився.

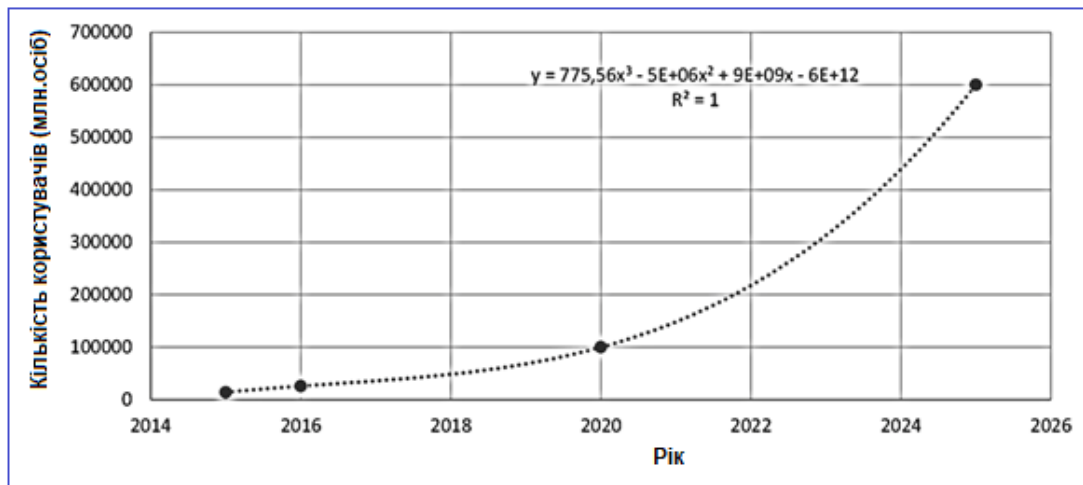


Рисунок 2 – Очікуване зростання кількості каршерінгових автомобілів у Китаї

Джерело: [4]

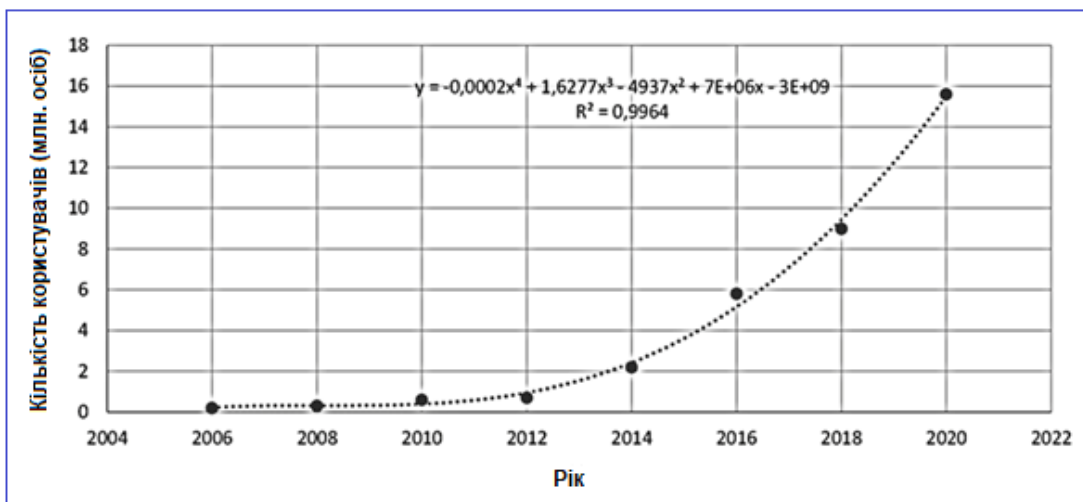


Рисунок 3 – Очікуване зростання кількості користувачів каршерінгу в Європі

Джерело: [4]

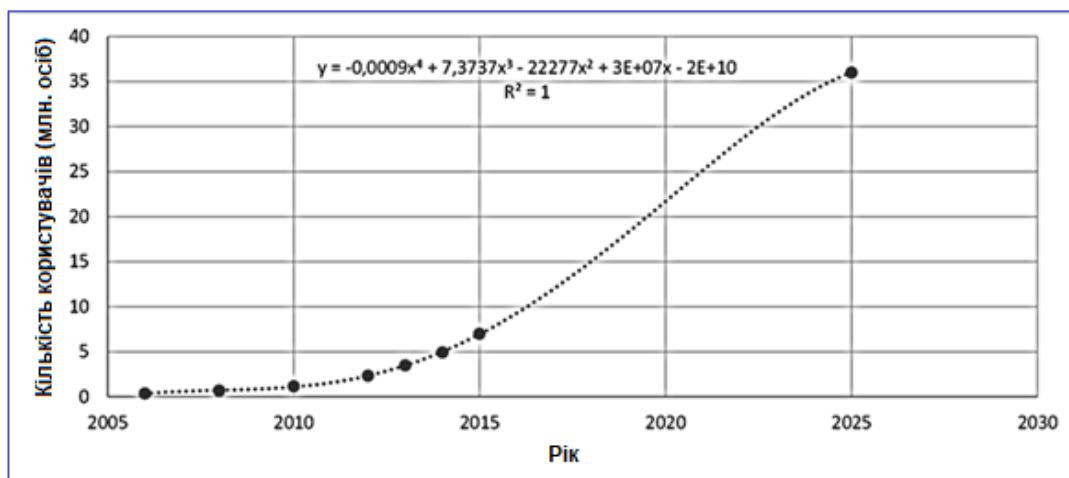


Рисунок 4 – Очікувана кількість користувачів каршерінгу у світі

Джерело: [4]

**Висновки.** За останні роки, виходячи зі спостережень за ринком, можна констатувати значне зростання каршерінгу як виду транспорту. Хоча наразі немає даних щодо розвитку систем спільного використання автомобілів у 2020 та 2021 роках у світі, але на основі часткової інформації від операторів у Європі, Азії та Північній Америці відбувається зростання кількості зареєстрованих користувачів та кількість автомобілів. Порівняно з першими каршерінговими проектами та системами каршерінгу, які діяли в 2006-2014 роках, інтерес до цих систем надзвичайно зріс. Слід також зазначити, що каршерінг стає все більш популярним на ринках, що розвиваються, таких як Бразилія, Китай, Індія, Малайзія, Мексика, Південна Африка та Туреччина.

Незалежно від організаційної форми, каршерінг допомагає реагувати на актуальний зростаючий попит серед користувачів. Моніторинг добової оренди та її тривалості, а також ряду інших параметрів має допомогти реагувати, регулюючи кількість транспортних засобів, доступних у системі каршерінгу. Водночас слід пам'ятати, що це не єдиний вид транспорту, доступний у місті. Через обмеженість простору в місті, міські райони повинні бути налаштовані на потреби мешканців, відхиляючись від концепцій, орієнтованих на автомобілі. Тому бажано розвивати транспортні ланцюги та стимули, щоб більша частина подорожей проходила громадським транспортом. Таке поєднання може зменшити затори в центрах міст і сприяти зменшенню з екологічної точки зору негативного впливу транспорту в містах. Дотримання балансу є основою сталого міського розвитку, а ініціатива каршерінгу є однією з його головних рис.

## Список літератури

1. Banister, D. The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, Elsevier. 2008. Vol. 15. P. 73-80.
2. Berger R. Think Act, Car-sharing in China, How to operate a successful business, Munich, 2017.
3. Каршерінг в Європі. Бізнес-моделі, національні варіації та майбутні зриви. *Монитор Deloitte*, 2017. Вип. 6. 85 с.
4. Celiński I., Sierpiński G. Real time model for public transportation management. *Log Forum*. 2014. Vol. 10 (1), pp. 31-41.
5. Чиста енергія для транспорту: Європейська стратегія альтернативного палива, COM, 2013.
6. Mindur L. (Ed.): Technologie transportowe. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom. 2014.
7. Mindur M. (Ed.). Logistyka. Nauka – Badania – Rozwój, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, 2017.
8. Sierpiński G.: Technologically advanced and responsible travel planning assisted by GT Planner. In: Macioszek E., Sierpiński G. (eds.): Contemporary Challenges of Transport Systems and Traffic Engineering. *Lecture Notes in Network and Systems*, Springer, 2017. Vol. 2, pp. 65-77.
9. Каршерінг в Україні: що це таке і як працює на реальному прикладі. *Hotline Finance*: веб-сайт. URL: <https://hotline.finance.ua/articles/karshering-v-ukrajini-shcho-ce-take-i-yak-pracyuye-na-realnomu-prikladі>
10. Каршерінг в Україні: особливості, вартість та переваги. *ElectroCars*: веб-сайт. URL: <https://elektrocars.top/karshering-v-ukrayini-osoblyvosti-poslugy-vartist-ta-perevagy/>
11. Number of car sharing users worldwide from 2006 to 2025. *Statista*: веб-сайт. URL: <https://www.statista.com/statistics/415636/car-sharing-number-of-users-worldwide/>

## References

1. Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, Elsevier, Vol. 15. P. 73-80.
2. Berger, R. (2017). Think, act, car sharing in China: How to run a successful business, Munich.
3. Monitor Deloitte. (2017). Karsherynh v Yevropi. Biznes-modeli, natsionalni variatsii ta maibutni zryvy [Car sharing in Europe: Business models, national variations and the future of disruption]. *Issue*. 6, 85.

4. Zhelinskiy, I., & Sierpinski, H. (2014). A real-time model for public transport management. *LogForum*, Vol. 10 (1), pp. 31-41 [in English].
5. European Commission. (2013). *Chysta enerhiia dlia transportu: Yevropeiska stratehiia alternatyvnoho palyva* [Clean energy for transport: A European strategy for alternative fuels]. COM [in Ukrainian].
6. Mindur, L. (2014). *Transport technologies*. Publishing House of the Research Institute of Sustainable Technologies - NNI Ryadom [in Polish].
7. Mindur, M. (2017). *Logistics. Science - Research - Development*. Scientific Publishing House of the Institute of Sustainable Technologies - NNI. [in Polish].
8. Sierpiński, H. (2017). Technologically advanced and responsible travel planning using GT Planner. In E. Macioszek & G. Sierpiński (Eds.), *Contemporary challenges of transport systems and traffic engineering: Synopsis of lectures on Networks and systems*, Springer, Vol. 2, pp. 65-77 [in English].
9. Karshering v Ukrayini: shcho ce take i yak pratsyuye na realnomu priklyadi [Carsharing in Ukraine: what it is and how it works on a real example]. *hotline.finance*. Retrieved from <https://hotline.finance/ua/articles/karshering-v-ukrajini-shcho-ce-take-i-yak-pracyuye-na-realnomu-prikladi>
10. Karshering v Ukrayini: osoblyvosti posludy, vartist ta perevagy [Car sharing in Ukraine: features, cost and benefits]. *elektrocars.top*. Retrieved from <https://elektrocars.top/karshering-v-ukrajini-osoblyvosti-posludy-vartist-ta-perevagy/>
11. Car sharing - number of users worldwide 2025. *statista.com*. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/415636/car-sharing-number-of-users-worldwide/>

**Tetiana Haikova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olena Moroz**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Serhii Oleksiienko**, master student.

*Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine*

### **Analysis of Prospects of Development of Car-Sharing**

The article is devoted to the project analysis of the development of urban car sharing systems, which attract an increasing number of users, with a statement of their current state. The analysis presented in the article covers the systems operating in Europe, Asia and North America, contains a formal forecast that presents the prospects and opportunities for achieving the desired level of development in 2020-2025.

Car sharing, as a model that complements urban transport services, based on short-term rental of cars offered by operators in urban areas. Its concept is similar to car rental systems, with the only difference being that cars hired in less than an hour. Car sharing is one opportunity that fits into the idea of a sharing economy. According to this idea, business models based on using popular online platforms to provide short-term use of services or goods. Recently, car sharing has become a popular mode of transport, especially in cities. Explores the concept of car sharing, its various business models and its impact on the transportation industry. The advantages and disadvantages of car sharing for users, providers and society as a whole analyzed. The analytical rationale examines the challenges faced by the car sharing industry such as competition, regular challenges, and technological advancements. An example of car sharing in Ukraine presented, highlighting the peculiarities of the local market and the potential for future growth.

The case made that car sharing has the potential to revolutionize the way people move around cities, but its success depends on the ability of providers to adapt to the changing needs and preferences of consumers. Monitoring the daily rental and its duration, as well as a number of other parameters, should help to respond by regulating the number of vehicles available in the carsharing system. Due to the limited space in the city, urban areas must be adapted to the needs of residents, deviating from car-centric concepts. Such a combination can reduce traffic jams in city centers and contribute to the reduction of the negative impact of transport in cities from an ecological point of view. Maintaining balance is the basis of sustainable urban development, and the car sharing initiative is one of its main features.

**car-sharing, transport systems, project analysis, car rental**

*Одержано (Received) 07.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 20.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 656:338

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.236-245](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.236-245)

**В.А. Войтов**, проф., д-р техн. наук, **А. Г. Кравцов**, доц., канд. техн. наук, **М. В. Карнаух**, доц., канд. техн. наук, **О. М. Горяїнов**, доц., канд. техн. наук, **А.С. Козенок**, доц., канд. техн. наук, **І.А. Бабич**, ст. викл.

*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна*

*e-mail: vavoitovva@gmail.com*

## Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі

Обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень. Математична модель враховує динаміку розвитку процесу. Крім градієнтів швидкості та щільності транспортних потоків враховуються динамічні властивості транспортних засобів та багатосмугова дорожня мережа, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах. Показано, що динамічні характеристики транспортного потоку описуються диференціальними рівняннями третього порядку.

Отримано вирази для визначення коефіцієнтів підсилення та постійних часу, що входять у диференціальне рівняння. Обґрунтовані параметри, які є вхідним впливом та визначають стійкість транспортного потоку, – це градієнти щільності та швидкості потоку. Обґрунтовані параметри, що характеризують реакцію транспортного потоку на обурення, – це постійні часу, фізичний сенс яких полягає в інерційності всіх ланок, що входять у модель.

**транспортний потік, моделювання, динамічна модель, структурна ідентифікація, параметрична ідентифікація, градієнт щільності, градієнт швидкості, коефіцієнт підсилення, постійна часу**

**Постановка проблеми.** Високий рівень завантаженості дорожньо-вуличної мережі у містах супроводжується різким зниженням швидкостей сполучення та транспортними заторами. Це призводить до зростання аварійності, підвищення часу доставки кореспонденцій та зниження ефективності використання автомобільного транспорту. Враховуючи це, дослідження питань використання пропускнуої спроможності існуючої дорожньої структури шляхом прогнозування виникнення заторів та коригування маршрутів руху є актуальним і дозволить удосконалити організацію перевізного процесу.

Аналіз низки досліджень показав, що процес дорожнього руху характеризується комплексом показників, які визначають рівень організації самого процесу з одного боку, з другого – характеризують умови, у яких відбувається транспортне обслуговування. Різноманітність різних варіантів організації дорожнього руху обумовлює використання цілого набору критеріїв, які можна поділити на частинні та інтегральні. У процесі досліджень у галузі кінетичної теорії транспортних потоків автори Роберт Герман та Ілля Пригожин створили «дворідинну» модель транспортного потоку (Two-Fluid Model) [1]. При цьому метою створення моделі стала оцінка режиму руху транспортного потоку міською дорожньо-вуличною мережею. Застосування моделювання транспортних процесів є найбільш економічним методом дослідження, що одночасно дозволяє з достатньою достовірністю прогнозувати затримки під час руху та утворення заторів.



Одним із шляхів вирішення такого завдання є розробка математичної моделі ергономічної оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі під час дії зовнішніх збурень. Це дозволить прогнозувати виникнення затримок під час руху та заторів.

Під стійкістю транспортного потоку будемо розуміти здатність транспортних засобів зберігати швидкість і напрямок руху за наміченим маршрутом вуличної дорожньої мережі або магістралі без затримок і заторів, незважаючи на обурення, що впливають на них.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [2-4] представлено огляд літератури, де викладено концепцію «стійкої безпеки дорожнього руху». Мета концепції – надати безпеці дорожнього руху нового імпульсу. Концепція обґрунтовує шляхи зниження ймовірності виникнення заторів та випадків дорожньо-транспортних пригод на магістральних дорогах та міській вуличній мережі. Автори зазначають, що результати такого аналізу мають враховуватись при проектуванні нової дорожньої інфраструктури. У статтях обговорюються принципи та заходи сталості безпеки дорожнього руху, а також організаційні та фінансові заходи щодо їх забезпечення. У цих роботах автори наводять методи оцінки стійкості транспортних мереж, параметри та критерії оцінки стійкості. Показано взаємозв'язок між стійкістю транспортного потоку з одного боку та щільністю, інтенсивністю та часом руху транспортних засобів у потоці з іншого боку.

Наведені публікації розширюють аналітичний підхід до дослідження стійкості транспортних потоків, показують взаємозв'язок між параметрами, що характеризують такий потік. Математичних моделей, методів та методик вирішення прикладних завдань, автори не наводять.

Математичним моделям стійкості транспортних потоків присвячені роботи [5, 6]. У цих роботах показано, що неоднорідність таких характеристик, як реакція водіїв на зовнішнє обурення та динамічні властивості транспортних засобів впливають на стійкість руху транспортного потоку. Для підвищення точності моделювання автори пропонують розділяти стійкість однорідних транспортних потоків та гетерогенних потоків. Ступінь стійкості руху в однорідному потоці значно вищий, ніж у гетерогенному. Моделі побудовані з урахуванням імовірнісних розподілів основних параметрів, що характеризують транспортний потік. Робиться висновок, що для підвищення точності моделювання необхідно враховувати коливання параметрів транспортного потоку, особливо гетерогенного.

Роботи [7-9] спрямовані на дослідження впливу затримок та виникнення заторів у транспортних потоках. У цих дослідженнях пропонується інноваційна система раннього попередження про затори на дорогах, що включає точкове прогнозування, оцінку характеристик, інтервальне прогнозування. Прогноз виконується з урахуванням статистичних розподілів параметрів потоку. Результати моделювання використовуються на етапі комплексної оцінки рівня завантаженості доріг, включаючи моделювання щільності руху та середньої швидкості руху. Таким чином, цей підхід може бути широко використаний для індивідуального планування маршрутів руху та уніфікованого управління рухом. Результати моделювання використовуються для управління рухом на магістралях та підвищують рівень обслуговування під час перевантажень на дорогах. На думку авторів, час затримок під час руху в потоці є більш чутливим параметром до стабільності транспортного потоку.

У роботі [10] пропонується нова модель управління транспортним потоком із зворотним зв'язком для дослідження механізму поширення коливань транспортного потоку. Умову лінійної стійкості одержано з використанням методу аналізу частотної області. Як аналітичний аналіз моделі, і чисельні експерименти, показують, що облік зворотного зв'язку у моделях підвищує точність прогнозування затримок та заторів і може ефективно запобігати заторам на дорогах.

Системне уявлення понять «керованість автомобілів» та «керування автомобілем» з погляду кібернетики, теорії інформації та автоматичного управління, представлено в роботі [11]. Автори вважають, що оцінку керованості необхідно виконувати з урахуванням інформації про дорожню ситуацію та реакцію автомобіля на поворот керма. Пропонується систему «водій – автомобіль» розглядати як систему автоматичного управління, де процес управління залежить від передавальних функцій водія та автомобіля. Передавальні функції виражені автором у вигляді інерційних ланок. На нашу думку такий підхід є перспективним, тому що математичний апарат теорії автоматичного управління добре розроблений.

Теоретичні та експериментальні дослідження часу затримки автомобілів у потоці, обумовлені часом реакції водія на умови руху, що змінюються, представлені в роботах [12, 13]. Автори визначають поняття часу реакції водія на зміну дорожньої ситуації. Реакцією називається дія організму у відповідь на зовнішній подразнюючий фактор. До простих реакцій належать дії у відповідь на одиничний подразник (наприклад, гальмування автомобіля, що рухається попереду). До складних – дія одразу кількох факторів (наприклад, на регульованому перехресті доводиться стежити за зміною сигналів світлофора та за рухом пішоходів, що переходять проїжджу частину, а також стежити за іншим транспортом). Автори стверджують, що залежно від особливостей характеристик конкретної дорожньо-транспортної ситуації, час реакції водія може змінюватися в межах від 0,6 до 1,4 сек.

Представлений аналіз концепцій та математичних моделей оцінки стійкості транспортних потоків на міських вулицях та автомагістралях до заторів та затримок під час руху дозволяє зробити наступні висновки. Основними параметрами, що характеризують процес, є: щільність та інтенсивність транспортного потоку, а також час затримок у процесі руху. Інформативними є такі параметри, як градієнт щільності та градієнт швидкості в транспортному потоці. Такі фізичні величини дозволяють враховувати наявність коливань у потоці, їх величину та напрямок (збільшення чи зменшення).

Для підвищення адекватності моделей, що розробляються, у схемі моделювання необхідно мати зворотний зв'язок. Це дозволить враховувати зміну дорожньої ситуації у часі. Функціонування транспортного потоку слід розглядати як динамічний процес, використовуючи поняття стійкості технічних систем за Ляпуновим.

Найбільш ефективним, на наш погляд, є добре розроблений та апробований математичний апарат теорії автоматичного управління, де досліджуються динамічні процеси із зворотним зв'язком за допомогою диференціальних рівнянь.

Розробка математичної моделі ергономічної оцінки стійкості транспортного потоку на ділянках дорожньої мережі при дії збурень дозволить аналізувати та прогнозувати виникнення заторів та затримок залежно від зміни різних факторів та розробляти заходи щодо їх усунення.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень.

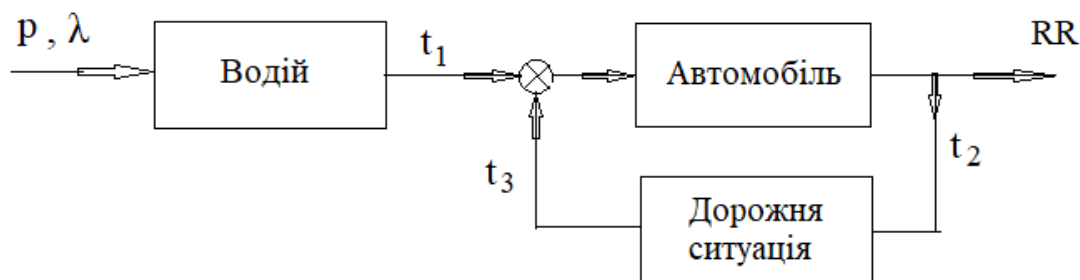
**Виклад основного матеріалу.** При розробці математичної моделі ергономічної оцінки стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі з урахуванням дії зовнішніх збурень прийняті відповідні припущення.

Одиничний транспортний засіб будемо розглядати в потоці, що рухається за автомобілем, що йде попереду, з урахуванням багатосмуговості руху і часу реакції водія на збурення, з урахуванням динамічних властивостей автомобіля і швидкості зміни дорожньої ситуації.

Для опису динамічних властивостей системи водій-автомобіль-дорожня ситуація будемо використовувати математичний апарат теорії автоматичного управління за наявності зворотного зв'язку [14]. Структурно-динамічна схема моделювання стійкості руху транспортного засобу представлена на рис. 1.

Динамічні властивості водія, автомобіля та дорожньої ситуації приймемо у вигляді інерційних ланок, тому що реакція на збурення відбувається не миттєво, а з затримками у часі.

Відповідно до основних принципів теорії автоматичного управління, інерційні ланки структурно-динамічної схеми, рис. 1, виразимо в наступному вигляді.



$p$  – щільність транспортного потоку, 1/м;  $\lambda$  – інтенсивність транспортного потоку, 1/с;  
 $t_1$  – час реакції водія, с;  $t_2$  – час маневру автомобіля, с;  $t_3$  – час затримки під час руху у транспортному потоці, с; RR – діапазон (величина) стійкості транспортного потоку, безрозмірна величина

Рисунок 1 – Структурно-динамічна схема моделювання стійкості руху транспортного засобу:  
 Джерело: розроблено авторами

Для моделювання ланки «водій» передавальна функція має вигляд:

$$W_1 = \frac{K_1}{T_1 p + 1}, \quad (1)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт підсилення, що характеризує ступінь впливу вхідного сигналу (щільність та інтенсивність транспортного потоку), на вихідний сигнал (час реакції водія на зміну параметрів транспортного потоку), безрозмірна величина;

$T_1$  – постійна часу, що характеризує інерційність водія, розмірність секунда;

$p = d/dt$  – оператор диференціювання.

Для моделювання ланки «автомобіль» передавальна функція має вигляд:

$$W_2 = \frac{K_2}{T_2 p + 1}, \quad (2)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт підсилення, характеризує ступінь впливу вхідного сигналу (час реакції водія на зміну параметрів транспортного потоку), на вихідний сигнал (час затримки під час руху у потоці, втрата стійкості транспортного потоку – затор), безрозмірна величина;

$T_2$  – постійна часу, що характеризує інерційність автомобіля, що виявляється у здатності автомобіля до маневру у вигляді часу на маневр, розмірність секунда.

Для моделювання ланки «дорожня ситуація» передавальна функція має вигляд:

$$W_3 = \frac{K_3}{T_3 p + 1}, \quad (3)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт підсилення, характеризує ступінь впливу вхідного сигналу (час на маневр автомобіля при зміні дорожньої ситуації), на вихідний сигнал (час затримки при русі в потоці, втрата стійкості транспортного потоку – затор), безрозмірна величина;

$T_3$  – стала часу, що характеризує інерційність зміни дорожньої ситуації, розмірність секунда.

Використовуючи основні положення теорії автоматичного управління, які викладені у роботах [14, 15], запишемо вирази для еквівалентної передавальної функції структурно-динамічної схеми, яка представлена на рис.1:

$$W = W_1 \cdot \frac{W_2}{1 + W_2 \cdot W_3} = \frac{K_1}{T_1 p + 1} \cdot \frac{\frac{K_2}{T_2 p + 1}}{1 + \frac{K_2 \cdot K_3}{(T_2 p + 1) \cdot (T_3 p + 1)}}. \quad (4)$$

Після алгебраїчних перетворень еквівалентну передавальну функцію запишемо у вигляді:

$$W = \frac{(K_1 K_2 T_3) p + K_1 K_2}{(T_1 T_2 T_3) p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1) p + K_2 K_3 + 1}. \quad (5)$$

Чисельник виразу (5) представляє вхідний сигнал у динамічну систему, яку наведено на рис.1. Знаменник – вихідний сигнал.

Використовуючи вираз для еквівалентної передавальної функції (5), запишемо диференціальне рівняння, яке відображає динаміку зміни транспортного потоку в часі:

$$\begin{aligned} (T_1 T_2 T_3) p^3 + (T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3) p^2 + (T_1 + T_2 + T_3 + K_2 K_3 T_1) p + K_2 K_3 + 1 = \\ = (K_1 K_2 T_3) p + K_1 K_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Диференціальне рівняння третього порядку записано в операторній формі, де  $p = d/dt$ , оператор диференціювання.

Аналіз диференціального рівняння (6) дозволяє зробити наступні висновки.

Права частина рівняння характеризує вхідний сигнал, який впливає на транспортний потік, як динамічну систему. Це величини коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$ , а також постійна часу  $T_3$ . Отже, щільність і інтенсивність транспортного потоку –  $K_1$ ,  $K_2$ , а також час реакції водія на зміну параметрів транспортного потоку та інерційність зміни дорожньої ситуації –  $T_3$  є основними значущими параметрами, які впливають на стійкість. Крім цього, у правій частині знаходиться перша похідна від добутку перерахованих параметрів. Це означає, що на стійкість транспортного потоку впливають не тільки величини  $K_1 \cdot K_2 \cdot T_3$ , а й швидкість їх зміни у часі. Тому застосування у моделях таких параметрів, як градієнт щільності та градієнт швидкості обґрунтовано.

Ліва частина диференціального рівняння (6) характеризує вихідний сигнал, тобто реакцію транспортного потоку, як динамічної системи, на вхідний вплив – праву частину рівняння. Це величини коефіцієнтів  $K_2$ ,  $K_3$  та величини постійних часу  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ . Значення цих величин впливатиме на стійкість транспортного потоку.

Щоб застосувати диференціальне рівняння (6) і визначити межу стійкості функціонування транспортного потоку, необхідно виконати параметричну ідентифікацію динамічної моделі.

Сутність параметричної ідентифікації математичної моделі полягає у знаходженні виразів визначення величин коефіцієнтів підсилення і постійних часу, які входять у диференціальне рівняння (6).

Коефіцієнт підсилення  $K_I$ , який характеризує ступінь впливу щільності транспортного потоку на час реакції водія, виразимо наступною формулою:

$$K_I = \frac{N \cdot l_a}{L}, \quad (7)$$

де  $N$  – кількість автомобілів на контрольованій ділянці дороги;

$l_a$  – довжина автомобіля, м;

$L$  – довжина контрольованої ділянки дороги, зазвичай приймається рівною 1000 м.

У зв'язку з тим, що транспортний потік є динамічним потоком і змінюється при русі за маршрутом [16, 17], запишемо вираз для розрахунку градієнта щільності потоку як першої похідної від контрольованої ділянки дороги:

$$\text{grad}p = \frac{\sigma_N}{L^2}, 1/\text{м}^2, \quad (8)$$

де  $\sigma_N$  – середньоквадратичне відхилення кількості автомобілів у транспортному потоці на контрольованій ділянці дороги.

Середньоквадратичне відхилення кількості автомобілів у транспортному потоці виразимо формулою:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (N_i - N_{cp})^2}, \quad (9)$$

де  $m$  – кількість вимірювань величини кількості автомобілів на контрольованій ділянці;

$N_i$  – величина кількості автомобілів  $i$ -го виміру;

$N_{cp}$  – величина середньої кількості автомобілів  $m$  вимірів.

Порівнюючи формули (7) і (8), можна зробити висновок, що градієнт щільності транспортного потоку пропорційний коефіцієнту підсилення  $K_I$ .

Значення постійної часу  $T_I$ , яка характеризує інерційність водія, залежно від величин щільності та інтенсивності транспортного потоку, представимо виразом:

$$T_I = \frac{t_1^2 \cdot N \cdot l_a \cdot \sigma_a}{L \cdot v}, \text{ с}, \quad (10)$$

є  $t_1$  – час реакції водія на зміну дорожньої ситуації, може змінюватися в межах від 0,6 до 1,4 сек;

$\sigma_a$  – середньоквадратичне відхилення прискорення автомобілів у транспортному потоці, м/с<sup>2</sup>;

$v$  – швидкість автомобілів в транспортному потоці, м/с.

Прискорення автомобіля, виходячи з другого закону Ньютона, висловимо формулою:

$$a = \frac{N_e}{v \cdot M}, \quad (11)$$

де  $N_e$  – номінальна потужність двигуна автомобіля, розмірність Вт;

$M$  – маса автомобіля, розмірність кг.

Середньоквадратичне відхилення прискорення автомобілів у транспортному потоці висловимо формулою:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (a_i - a_{cp})^2}, \quad (12)$$

де  $m$  – кількість вимірювань величини прискорення автомобілів на контрольованій ділянці;

$a_i$  – величини прискорення  $i$ -го вимірювання, розмірність м/с<sup>2</sup>;

$a_{cp}$  – величини середнього прискорення  $m$  вимірювань, розмірність м/с<sup>2</sup>.

Коефіцієнт підсилення  $K_2$ , який характеризує вплив ступеня динамічності транспортного потоку на час затримок при русі та втрату стійкості, виразимо такою формулою:

$$K_2 = \frac{\sigma_a \cdot N^2 \cdot l_a^3}{v^2 \cdot L^2}. \quad (13)$$

Градiєнт швидкості транспортного потоку, який можна порівнювати із внутрішньою енергією потоку, виразимо формулою:

$$gradv = \frac{\sigma_a}{v \cdot L}, \text{ 1/м} \cdot \text{с}. \quad (14)$$

Порівнюючи формули (13) і (14), можна дійти висновку, що градієнт швидкості транспортного потоку пропорційний коефіцієнту підсилення  $K_2$ .

Значення постійної часу  $T_2$ , яка характеризує інерційність автомобіля і виявляється у здатності автомобіля до маневру, виразимо такою формулою:

$$T_2 = \frac{M \cdot l_a^2}{N_e \cdot t_2^2}, \text{ с}, \quad (15)$$

де  $t_2$  – час на маневр, який може використовувати автомобіль при зміні дорожньої ситуації на контрольованій ділянці, розмірність с.

Коефіцієнт підсилення  $K_3$ , який характеризує ступінь впливу зміни дорожньої ситуації, на час затримки під час руху в потоці [16, 17] та втрату стійкості, виразимо наступною формулою:

$$K_3 = \frac{N \cdot l_a \cdot k^2 \cdot s^2}{L}, \quad (16)$$

де  $k$  – кількість пішохідних переходів на контрольованій ділянці, розмірність од;

$s$  – кількість світлофорів на контрольованій ділянці, розмірність од.

Значення постійної часу  $T_3$ , що характеризує інерційність зміни дорожньої ситуації, виразимо такою формулою:

$$T_3 = \frac{n \cdot t_2^2}{t_3}, \text{ с}, \quad (17)$$

де  $n$  – кількість смуг руху на проїжджій частині;

$t_3$  – сумарний час затримок під час руху за маршрутом, с.

Як впливає з представлених теоретичних досліджень, математична модель стійкості транспортного потоку має обмеження щодо застосування. Обмеження пов'язані з визначенням вихідних даних для моделювання. На контрольованій ділянці дорожньої мережі необхідно визначати щільність та інтенсивність потоку, швидкість та прискорення руху транспортних засобів у потоці. Сучасні електронні засоби контролю дозволяють виконати такі вимірювання, проте потребують певних витрат. Крім цього, статистично визначеними величинами є час реакції водіїв на зміну дорожньої ситуації та наявність пішохідних переходів та світлофорів на контрольованій ділянці дороги.

Подальший напрямок досліджень, на наш погляд, лежить у площині створення розрахункових моделей щодо визначення щільності та інтенсивності транспортного потоку, прогнозування значень градієнтів щільності та швидкості руху транспортних засобів у потоці. Це дозволить розробити єдину методологію моделювання стійкості транспортних потоків для побудови прогнозів завантаженості дорожньої мережі та магістралей.

Наступна наша стаття буде продовженням цієї роботи та присвячена обґрунтуванню та отриманню числового критерію, який дозволить визначити межу стійкості транспортного потоку (виникнення заторів) при зміні вхідних параметрів. Моделювання зміни межі стійкості при зміні вхідних параметрів дозволить побудувати їхній рейтинг впливу на стійкість.

#### **Висновки:**

1. Обґрунтовано структуру математичної моделі оцінки ергономічної стійкості транспортного потоку на різних ділянках дорожньої мережі при дії зовнішніх збурень, що є результатом структурної ідентифікації. Математична модель відрізняється від відомих тим, що враховує динаміку розвитку процесу. Крім градієнтів швидкості та щільності транспортних потоків, враховуються динамічні властивості транспортних засобів та кількість смуг дорожньої мережі, а також час затримок на пішохідних переходах та світлофорах. Показано, що динамічні характеристики транспортного потоку описуються диференціальними рівняннями третього порядку.

2. Виконана параметрична ідентифікація математичної моделі, отримані вирази для визначення коефіцієнтів підсилення та постійних часу, що входять у диференціальне рівняння. Обґрунтовані параметри, які є вхідним впливом та впливають на стійкість транспортного потоку, – це градієнт щільності та градієнт швидкості потоку. Обґрунтовано параметри, що характеризують реакцію транспортного потоку на збурення, – це постійні часу, фізичний зміст яких в інерційності всіх ланок, що входять у модель.

#### **Список літератури**

1. Ishii, M., Hibiki, T. (2006). Two-Fluid Model. In: *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-29187-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-29187-1_9)
2. Martin Luther Mfenjou, Ado Adamou Abba Ari, Wahabou Abdou, François Spies Kolyang. (2018). Methodology and trends for an intelligent transport system in developing countries. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. Vol. 19. P. 96-111 <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.08.002>.
3. Ingridvan SCHAGEN, Theo JANSSEN. (2000). MANAGING ROAD TRANSPORT RISKS: Sustainable Safety in the Netherlands. *IATSS Research*, Volume 24, Issue 2, Pages 18-27 [https://doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60025-X](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60025-X)
4. Mohammad Zaher Serdar, Muammer Koç, Sami G.Al-Ghamdi. (2022). Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods. *Sustainable Cities and Society*, Volume 76, 103452 <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103452>
5. Marcello Montanino, Julien Monteil, Vincenzo Punzo. (2021). From homogeneous to heterogeneous traffic flows: Lp String stability under uncertain model parameters. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 146, Pages 136-154 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.009>
6. Saeed Mohammadian, Zuduo Zheng, Md. Mazharul Haque, Ashish Bhaskar. (2021). Performance of continuum models for realworld traffic flows: Comprehensive benchmarking. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 147, Pages 132-167 <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.007>
7. Ping Jiang, Zhenkun Liu, Lifang Zhang, Jianzhou Wang. (2022). Advanced traffic congestion early warning system based on traffic flow forecasting and extenics evaluation. *Applied Soft Computing*, Volume 118, 108544 <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108544>
8. Trinh Dinh Toan, Wong Y.D. (2021). Fuzzy logic-based methodology for quantification of traffic congestion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 570, 15, 125784 <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125784>
9. Dihua Sun, Dong Chen, Min Zhao, Weining Liu, Linjiang Zheng. (2018). Linear stability and nonlinear



- analyses of traffic waves for the general nonlinear car-following model with multi-time delays. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 501, 1, Pages 293-307 <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.179>
10. Tao Wang, Yuanshu Zhang, Jing Zhang, Zhen Li, Shubin Li. (2020). New feedback control strategy for optimal velocity traffic model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 559, 1, 125053 <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125053>
  11. Осташевский С.А. (2013). Определение понятий «управляемость автомобилей» и «вождение машины» в системе «водитель-автомобиль-дорога». *Вестник ХНАДУ*. Вып.61-62. С. 300-305.
  12. Markovkina A.I., Papunin A.V. (2019). The study of the influence of intelligent driver assistance systems on the capacity of urban roads. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1177. doi:10.1088/1742-6596/1177/1/012052
  13. Podoprigrora N., Stepina P., Dobromirov V., Kotikov J. (2020). Determination of driver's reaction time in expert studies of road traffic accidents using software and hardware complex. *Transportation Research Procedia*, vol. 50, pp. 538-544. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.064>
  14. Mykolajets D., Klen K. (2020). Fundamentals of the automatic control theory. Calculation work. *Kyiv : Igor Sikorsky, Kyiv Polytechnic Institute*, 45 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38282>
  15. Isidori A. (2009). Control Theory for Automation: Fundamentals. *Springer Handbooks book series (SHB)*, pp. 147-172. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_9)
  16. Vojtov V., Kutiya O., Berezhnaja N., Karnaukh M., Bilyaeva O. (2019). Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4, no. 3 (100), pp. 15-21. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.175064.
  17. Muzylyov D., Shramenko N., Karnaukh M. (2021) Choice of Carrier Behavior Strategy According to Industry 4.0. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_22)

## References

1. Ishii, M. & Hibiki, T. (2006). Two-Fluid Model. In: *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-29187-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-29187-1_9) [in English].
2. Martin Luther Mfenjou, Ado Adamou Abba Ari, Wahabou Abdou, François Spies Kolyang. (2018). Methodology and trends for an intelligent transport system in developing countries. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 19, 96-111. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.08.002> [in English].
3. Ingridvan SCHAGEN, Theo JANSSEN. (2000). MANAGING ROAD TRANSPORT RISKS: Sustainable Safety in the Netherlands. *IATSS Research*, 24(2), 18-27. [https://doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60025-X](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60025-X) [in English].
4. Mohammad Zaher Serdar, Muammer Koç, Sami G.Al-Ghamdi. (2022). Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103452. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103452> [in English].
5. Marcello Montanino, Julien Monteil & Vincenzo Punzo. (2021). From homogeneous to heterogeneous traffic flows: Lp String stability under uncertain model parameters. *Transportation Research Part B: Methodological*, 146, 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.01.009> [in English].
6. Saeed Mohammadian, Zuduo Zheng, Md. Mazharul Haque, Ashish Bhaskar. (2021). Performance of continuum models for realworld traffic flows: Comprehensive benchmarking. *Transportation Research Part B: Methodological*, 147, 132-167. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.007> [in English].
7. Ping Jiang, Zhenkun Liu, Lifang Zhang, Jianzhou Wang. (2022). Advanced traffic congestion early warning system based on traffic flow forecasting and extenics evaluation. *Applied Soft Computing*, 118, 108544. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108544> [in English].
8. Trinh Dinh Toan, Wong Y.D. (2021). Fuzzy logic-based methodology for quantification of traffic congestion. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 570 (15), 125784. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125784> [in English].
9. Dihua Sun, Dong Chen, Min Zhao, Weining Liu, Linjiang Zheng. (2018). Linear stability and nonlinear analyses of traffic waves for the general nonlinear car-following model with multi-time delays. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 501 (1), 293-307. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.179> [in English].
10. Tao Wang, Yuanshu Zhang, Jing Zhang, Zhen Li, Shubin Li. (2020). New feedback control strategy for optimal velocity traffic model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 559 (1), 125053.



- <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125053> [in English].
11. Ostashevskiy, S.A. (2013). Opredeleniye ponyatiy “upravlyayemost' avtomobiley” i “vozhdeniye mashiny” v sisteme “voditel'-avtomobil'-doroga”. *Vestnik KHNADU, Issue 61-62*, 300-305 [in English].
  12. Markovkina, A.I. & Papunin, A.V. (2019). The study of the influence of intelligent driver assistance systems on the capacity of urban roads. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1177. doi:10.1088/1742-6596/1177/1/012052 [in English].
  13. Podoprigora, N., Stepina, P., Dobromirov, V. & Kotikov, J. (2020). Determination of driver's reaction time in expert studies of road traffic accidents using software and hardware complex. *Transportation Research Procedia, Vol. 50*, pp. 538-544. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.10.064> [in English].
  14. Mykolaiets, D. & Klen, K. (2020). *Fundamentals of the automatic control theory. Calculation work*. Kyiv : Igor Sikorsky, Kyiv Polytechnic Institute, 45 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38282> [in English].
  15. Isidori, A. (2009). Control Theory for Automation: Fundamentals. *Springer Handbooks book series (SHB)*, pp. 147-172. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_9) [in English].
  16. Vojtov, V., Kutiya, O., Berezhnaja, N., Karnaukh, M. & Bilyaeva, O. (2019). Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4, №3 (100)*, 15-21. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.175064 [in English].
  17. Muzylyov, D., Shramenko, N. & Karnaukh, M. (2021). Choice of Carrier Behavior Strategy According to Industry 4.0. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds). *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_22) [in English].

**Viktor Vojtov**, Prof., DSc., **Andrey Kravtsov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Mykola Karnaukh**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksiy Goryayinov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Anna Kozenok**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Inna Babych**, Senior Lecturer

*State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine*

### **Assessment of the Ergonomic Stability of the Traffic Flow on Sections of the Road Network. Identification of the Mathematical Model**

The paper discusses the structure of the mathematical model featuring assessment of the ergonomic stability of the traffic flow in various sections of the road network under the influence of external disturbances, which is the result of structural identification. The mathematical model differs from the known ones in that it takes into account the dynamics of the process development. In addition to the gradients of speed and density of traffic flows, the research takes into account the dynamic properties of vehicles and the multi-lane road network, as well as the time of delays at pedestrian crossings and traffic lights. The dynamic properties of the traffic flow are described with a third-order differential equation.

The mathematical model is parametrically identified; expressions for determining the gains and time constants included in the differential equation are obtained. The input parameters impacting and affecting the stability of the traffic flow are substantiated – these are the gradients of the density and speed of the flow. The parameters characterizing the response of the traffic flow to disturbances are substantiated – these are time constants, the physical meaning of which is the inertia of all links included in the model.

The study presents expressions for determining the gains and time constants included in the differential equation. The gain coefficient  $K_1$  characterizes the degree of influence of the density of the traffic flow on the reaction time of the driver. The gain coefficient  $K_2$  characterizes the influence of the degree of dynamism of the traffic flow on the time of delays during movement and loss of stability. The gain coefficient  $K_3$  characterizes the degree of influence of a change in the traffic situation on the delay time when moving in the stream and loss of stability. The value of the time constant  $T_1$  characterizes the inertia of the driver depending on the density and intensity of the traffic flow. The value of the time constant  $T_2$  characterizes the inertia of the car and is expressed in the ability to maneuver. The value of the time constant  $T_3$  characterizes the inertia of changing the traffic situation.

**transport flow, modeling, dynamic model, structural identification, parametric identification, density gradient, speed gradient, gain coefficient, time constant**

*Одержано (Received) 16.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

UDK 519.863: 656.073.235: 004.942 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.246-252](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.246-252)

**Volodymyr Zahorianskyi**, Assoc. Prof., DSc., **Mykola Moroz**, Prof., DSc., **Tetiana Haikova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine*

*e-mail: zagor\_vlad@ukr.net*

## Model of the optimal composition of the main technical facilities of a container transport and technological system

To solve the problem of determining the rational type and parameters of containers, as well as the structure of their fleet for the delivery of cargo (cargo), taking into account whether the accepted type and structure of the container fleet corresponds to the values of the required (custom) batches for the delivery of products and the possibility of making appropriate adjustments to the container payload values, an economic and mathematical model of the optimal composition of the technical complex of a container transport and technological system has been developed.

**transport and technological system, container, model, optimization, costs, transportations, technical facility**

**Formulation of the problem.** The largest consumers of Ukrainian grain and legumes delivered by containers to the seaports of Ukraine are the countries of South and Southeast Asia, with Vietnam and India accounting for over 60% of the supply [1]. In addition to cereal grain cargo (wheat, millet), legumes (peas, etc.) and oilseeds (rapeseed, etc.) are packed into containers. Over 4/5 of all grain cargoes of Ukrainian export delivered by containers is wheat, slightly more than 10% is rapeseed, millet – more than 1%, other crops – up to 1%. The size of shipments of grain cargoes for export is on average 10–15 thousand tons, which leads to an increasing use of the transportation of these cargoes by containers.

In Ukraine, the company Elit Black Sea (Odessa) specializes in the transportation of grain cargo in containers. Such transportation is also carried out by such world's largest container lines (carriers) as MSC (Mediterranean Shipping Company), A.P. Moller-Maersk Group, CMA CGM, Zim Integrated Shipping Services, and CSAV Norasia. The rapid increase in the volume of container traffic in Ukraine began in 2000 [2]. On the territory of Ukraine, transportation of goods in containers is carried out by road and rail.

**Analysis of the resent of the research and publications.** Rail transportation of containers is about three times faster and cheaper than road transportation, road transportation depends on many factors – weather, traffic jams and drivers, weight control functions on roads. Despite all this, rail transport of containers is still poorly developed, the vast majority of containers are transported by road. In addition, for door-to-door transportation, road transport is the main and only means [3, 4].

The entire variety of technical means of the container transport system is combined into six main types (elements) that form the technical complex [5]: 1) a fleet of containers (universal and specialized), works inside containers), 3) technical means of transport (cars and road trains as part of truck tractors and container semi-trailers, railway rolling stock, etc.), 4) container terminals, points and bases (warehouses, access roads, etc.), 5) means of control, information and long-distance communication, 6) means of packaging and packaging of goods for shipment in containers.

Two elements of the technical complex - containers and mechanization for loading and unloading are closely related to the method of preparing cargo for transportation. Therefore, the type of packaging, the type of package, etc. are important. Means of packing cargo (for example, enlarged and lightweight), means of packaging designed to send goods in containers are the sixth type (element) of the technical complex of the container transport system.

Depending on the content and changes in the technical characteristics of the types (elements) that make up the complex of technical means of container transportation, the technology and efficiency of these transportations change. Therefore, in order to achieve the same goal - the delivery of a given amount of cargo of a certain nature at the required rate of transportation - it is possible to use several variants of the complex, which differ from each other in the composition of the elements and the parameters characterizing them.

The functioning of each variant of the technical complex is associated with certain costs. The variant of the technical complex, which gives a minimum of costs (in monetary and in-kind terms), will be optimal. The most important element of the complex of technical means of transporting containers are the containers themselves. They must meet the requirements of consignors and consignees: comply with the conditions for the transportation of these goods, their physical and transport characteristics, the size of the batch shipments of goods (by volume and weight), etc. [6, 7]. Containers, being transport equipment, must be adapted for through traffic on all modes of transport, their fast and safe reloading [8, 9].

In the case when the type and structure of the container fleet do not correspond to the ordered batches of cargo delivery in terms of mass or volume, losses occur and the efficiency of container transportation decreases.

If the carrying capacity and/or volume of the container is greater (all the more significantly) than the required shipment of cargo, then the payload of the container will be lower than the nominal value for this cargo, which will lead to an increase in transportation costs. In the opposite case, unjustified costs may arise due to an increase in stocks in the warehouses of the recipient of the products. Therefore, in specific calculations to determine the rational type and parameters of containers, as well as the structure of their fleet for the delivery of cargo (cargo), it should be taken into account whether the accepted type and structure of the container fleet corresponds to the values of the required (custom) batches of product delivery and make an appropriate adjustment to the container payload values.

Let us determine whether the well-known economic and mathematical model of the technical complex of container transportation [5, 11] is applicable for solving this problem.

**The aim of the work.** To develop a mathematical model that describes the optimization problem for determining a rational fleet and parameters of containers and the structure of their fleet, to adjust the payload of containers.

**Presenting main material.** It is assumed that we know the amount of cargo  $Q$ , ton, which is supposed to be transported in containers over a certain period of time, the volumetric mass (density) of the cargo  $\gamma$ ,  $t/m^3$ , and the transportation distance  $L$ , km (determined based on traffic statistics for past periods and prospects for given period of time).

It is also assumed that for container transportation a set « $m$ » of technical means with the corresponding parameters is used, forming a technical complex of the types (elements) described above, and it is possible to use different machines and equipment with different parameters to serve one type of container. Then, under the index « $i$ » we will understand the type of the corresponding technical means ( $i = 1, \dots, m$ ), i. e. container, car, crane, etc.

The number of types of cargo (for example, depending on the volumetric mass  $\gamma$  of the cargo) will be denoted by « $u$ ». Then, under the index « $e$ » we mean the type of cargo transported in containers ( $e = 1, \dots, u$ ).

The number of ways to organize work with containers (methods of transportation, technologies for loading and unloading works, etc.) will be denoted by «k». Then, under the index «j» we mean the method of organizing work with containers ( $j = 1, \dots, k$ ).

According to the methodology for determining the comparative efficiency of capital investments, based on a comparison of the reduced costs by options, the economically viable option is the one that provides the minimum of the reduced costs.

The total reduced costs, as well as in the assessment of any economic activity, for container transportation of goods can be presented in a general form [11]:

$$E_{np} = C + E \cdot K, \quad (1)$$

where  $C$  – operating costs, thousand of UAH;

$E$  – the rate of return on invested capital, in fractions of a unit;

$K$  – capital (one-time) costs, thousand UAH.

The total reduced costs for all six types (elements) of the technical complex of the container transport system ( $J = 1, \dots, 6$ )

$$E_{np} = \sum_{J=1}^6 E_{npJ} \quad (2)$$

The total reduced costs for each of the six types (elements) of the technical complex of the container transport system for a given cargo

$$E_{npJ} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m Q \cdot (C_{ij} + E \cdot K_{ij}) \cdot \tau_i, \quad J = 1, \dots, 6, \quad (3)$$

where  $\tau_i$  is a coefficient that characterizes the part of cargo transportation in containers of a given ( $i$ -th) type from the total volume of cargo transportation in all types of containers.

The total reduced costs for all six types (elements) of the technical complex of the container transport system for a given cargo

$$E_{np}^e = \sum_{J=1}^6 \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m Q \cdot (C_{ij} + E \cdot K_{ij}) \cdot \tau_i \quad (4)$$

The total reduced costs for all six types (elements) of the technical complex of the container transport system for all goods

$$E_{np} = \sum_{J=1}^6 \sum_{e=1}^u \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m Q_e \cdot (C_{ij} + E \cdot K_{ij}) \cdot \tau_{ei}, \quad (5)$$

where  $Q_e$  is the amount of cargo of the  $e$ -th type, which is supposed to be transported in containers for a certain period of time;  $\tau_{ei}$  is a coefficient characterizing the part (share) of transportation of the  $e$ -th type of cargo in containers of this ( $i$ -th) type from the total volume of cargo transportation in all types of containers.

Specific reduced costs, UAH/ton, for the transportation of goods with specified characteristics in containers with different parameters [11]

$$C = f(P_{ni}, q_{vi}, \eta_i, \gamma, \delta, \psi_{ki}, \tau_{ki}, J_i), \quad (6)$$

where  $P_{ni}$  is the actual gross weight of the freight container, t;

$q_{vi}$  – specific (volumetric) carrying capacity of the container, ton/m<sup>3</sup>;

$\eta_i$  – container tare factor;

$\gamma$  – volumetric mass (density) of the cargo, ton/m<sup>3</sup>;

$\delta$  – coefficient taking into account the degree of use of the useful volume of the container (for packaged packaged cargoes, on average  $\delta = 0.7-0.75$ , for bulk cargoes  $\delta = 0.85$  [5]);

$\psi_{ki}$  is a coefficient characterizing the fleet structure, that is, the share of containers of a given (i-th) type in the total container fleet;

$\tau_{ki}$  is a coefficient that characterizes the part (share) of cargo transportation in containers of a given (i-th) type from the total volume of cargo transportation in all types of containers;

$j_i$  is the unit settlement rate, UAH, of the variable part of the costs, depending on the given (i-th) type of containers with a given conditionally constant cargo characteristic.

The actual gross weight of a freight container is the dead weight of a freight container together with the weight of the cargo placed in it. The specific (volumetric) carrying capacity of a container  $q_{vi}$  is the ratio of its carrying capacity (the maximum allowable weight of cargo in a freight container) to the internal volume of the container (the volume of a freight container limited by its internal surfaces) [3]. The tare coefficient  $\eta$  of a container is the ratio of the container's own weight to its maximum gross weight.

The determination of the values of  $\tau_{ki}$  characterizing the part (share) of cargo transportation in containers of the i-th type from the total volume of cargo transportation in all types of containers is based on the analysis of cargo flows and the determination of the distribution of transported goods by volumetric weight and sizes of delivery lots. These values can also be determined by the required number of containers of the types in which products can be transported for each category of cargo shipments by their weight (starting from one ton in increments of one or half a ton), based on their characteristics (primarily volume the mass of goods, the dimensions of the packaging of goods or overpacks). Parts (shares)  $\psi_{ki}$  of containers of each type are installed in the total fleet of containers, after which the values of  $\tau_{ki}$  are finally corrected. The unit settlement rate  $j_i$  is determined by the measures of work corresponding to the selected natural indicators, depending on the parameters of the technical means that are part of each element of the technical complex of container transportation. The costs for other types (elements) of the complex of technical means of container transportation are determined similarly.

The total reduced costs associated with this variant of the complex of technical means of container transportation can be represented as an objective function:

$$E_{np} = \sum_{j=1}^6 \sum_{e=1}^u \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m Q_e \times \tau_{ei} \times \left[ aX_{Jij} + bY_{Jij} + cZ_{ie} + A + E(dX_{Jij} + eY_{Jij} + fZ_{ie} + B) \right] \rightarrow \min, \quad (7)$$

where  $X_{Jij}$  are parameters whose values are determined by the parameters of technical means and functionally depend on them (for example, on such as  $P_{Ki}$  – the average load of a container of a given type (static load),  $t$ ,  $W_{ki}$  – the annual productivity (production) of the i-th type of a working fleet container, ton/year, etc.);  $Y_{Jij}$  – parameters determined by the combination of technical means (park structure) and the distribution of the volume of work performed by one or another technical means ( $\psi_{ki}$ ,  $\tau_{ki}$ );  $Z_{ie}$  – parameters, the value of which is determined by factors that are not part of the technical complex of the container transport system, but interconnected with the type, parameters of technical means and the structure of their fleet (types of containers, packaging methods, types, characteristics of warehouses, bagging machines, etc.);  $Q_e$  – the annual volume of transportation of the e-th cargo in containers, t; a, b, c, d, e, f – numerical coefficients calculated according to the current (or prospective) unit cost rates; A, B – cost values conditionally assumed to be constant, not directly related to changing parameters X, Y and Z.

The conditions of the container transportation process can be represented as a system of restrictions [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{Jij \min} \leq X_{Jij} \leq X_{Jij \max} \text{ ,} \\ Y_{Jij \min} \leq Y_{Jij} \leq Y_{Jij \max} \text{ ,} \\ Z_{ie \min} \leq Z_{ie} \leq X_{ie \max} \text{ ,} \\ X_{Jij \min} \geq u \text{ ,} \\ X_{Jij \max} \leq R \text{ ,} \\ Y_{Jij \min} \geq \psi_{k \min} \text{ ,} \\ Y_{Jij \max} = 1 \text{ ,} \\ Z_{ie \min} \geq 0 \text{ ,} \\ Z_{ie \max} \leq S \end{array} \right. \quad (8)$$

For example, taking the payload of the  $P_K$  container as  $X_{Jij}$ , we see that  $P_{K \min} > 0$ , since  $P_K = 0$  means the transportation of an empty container. It is obvious that the value of  $u$  must be equal to the minimum value of the shipment (consignment of the given cargo  $q_e$ ) transported in the given (i-th) type of container. It can be determined by the terms of delivery, technological standards, the value of the volumetric mass of the cargo  $\gamma$  and the useful internal volume of the container, etc., and must comply with

$$P_{K \max} \leq R \text{ ,} \quad (9)$$

where  $R$  is in this case the actual loading of the freight container. The useful loading of a container with products with the highest values of  $\gamma$  cannot exceed a certain design limit (carrying capacity  $P$  of a freight container – the maximum allowable weight of cargo in a freight container).

Similarly, all restrictions on  $Y_{Jij}$  are set. Their size, for example,  $Y_{Jij} \rightarrow \psi_k$ . A container fleet can consist of at least one type of container ( $\psi_k = 1$ ), while  $Y_{Jij \max} = \psi_k = 1$ . The minimum value will be expressed as a fraction, and should be guided by considerations of the desired calculation accuracy. For example, you can safely exclude from the calculation all containers that are less than 1% in the park. Then  $Y_{Jij \min} = \psi_{k \min} = 0.01$ . For enlarged calculations, it can be assumed that  $\psi_{k \min} = 0.05$ .

The penultimate restriction shows that, for example, transportation is allowed without any packaging (for example, in bulk or in the form in which piece goods leave the manufacturer's conveyor) or storage facilities are not required to be rebuilt, etc. In the last restriction,  $S$  defines the most durable (expensive) packaging designed for the conditions of transportation for export. The value of  $S$  determines the existing (or prospective) containers and packaging. Thus, the objective function (7) expresses the total reduced operating and construction costs for container transportation of a given mass of the e-th cargo ( $Q_e$ ) with various combinations of containers with different parameters and other technical means ( $X_{Jij}$ ,  $Y_{Jij}$ ,  $Z_{ie}$ ) as part of their complex, which is the material base of the container transport system (taking into account the restrictions imposed on the parameters  $X$ ,  $Y$  and  $Z$ ).

**Conclusions.** 1. The interest of Ukrainian grain exporters in the delivery of grain cargoes in batches in containers to ports for transportation by sea is due to increased global demand for grain, the structure of demand and the situation with container transportation.

2. The choice of the optimal variant of the technical complex of container transportation, in the general case, consisting of six types (elements), each of which includes  $m$  types of technical means,  $k$  ways of organizing work and  $u$  types of cargo, can be performed using an optimization linear mathematical model. The objective function is the total reduced costs associated with the functioning of the technical complex of the container transport system. This takes into account the system of restrictions imposed on the model variables by the conditions of the container transportation process. A methodology for

adjusting the payload of containers is proposed for the case when the type and structure of the container fleet do not correspond to custom delivery lots in terms of weight or volume.

## List of references

1. Maritime transport indicators. URL: <https://hbs.unctad.org/maritime-transport-indicators/> (дата звернення: 23.02.2023).
2. За рік – на 300-500%. Чому злетіли ціни на морські перевезення та як це позначиться на Україні. URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/08/30/677292/> (дата звернення: 23.03.2023).
3. Кашканов А. А., Ребедайло В. М. Спеціалізований рухомий склад автомобільного транспорту: конструкція. Вінниця: ВДТУ, 2002. 164 с.
4. Teodorovic D., Janic M. Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling. New York; London: Butterworth-Heinemann, 2017. 894 p.
5. Корнієнко В. П. Застосування інформаційних технологій в моделюванні роботи контейнерного терміналу для великовантажних контейнерів. *Наука в транспортному вимірі: тези доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 11–13 травня 2005 р.)*. С. 133.
6. Організація та планування автомобільних вантажних перевезень: монографія / Д. З. Шматко та ін. Кам'янське: Дніпров. держ. техн. ун-т, 2020. 165 с.
7. Мороз М. М., Загорянський В. Г. Проектування транспортно-технологічних систем вантажних перевезень: навч. посіб. Кременчук: КрНУ, 2021. 205 с. URL: [http://document.kdu.edu.ua/info\\_zab/275\\_907.pdf](http://document.kdu.edu.ua/info_zab/275_907.pdf) (дата звернення: 25.09.2022).
8. Оптимізація балансного і кластерного компоновання та завантаження контейнерів: монографія / І. В. Гребенник та ін. Київ: Наукова думка, 2022. 212 с.
9. Шраменко Н. Ю., Процик О. П. Формування ресурсозберігаючої технології функціонування вантажних терміналів на основі логістичних принципів. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2011. Вип. 8. С. 221–224.
10. Прикладна економіка / І. Ф. Радіонова та ін. Київ: АртЕк, 2000. 214 с.
11. Вітер Н. С. Формування транспортно-технологічних систем доставки вантажів у контейнерах: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. Харків, 2014. 157 с.

## References

1. Maritime transport indicators. *hbs.unctad.org*. Retrieved from <https://hbs.unctad.org/maritime-transport-indicators/> [in English].
2. Za rik – na 300-500%. Chomu zletily tsiny na mors'ki perevezennia ta iak tse poznachyt'sia na Ukraini [For a year - by 300-500%. Why did the prices for sea transportation soar and how will this affect Ukraine.]. *epravda.com.ua*. Retrieved from <https://www.epravda.com.ua/publications/2021/08/30/677292/> [in Ukrainian].
3. Kashkanov, A.A. & Rebedajlo, V.M. (2002). *Spetsializovanyj rukhomyj sklad avtomobil'noho transportu: konstruktziia* [Specialized rolling stock of road transport: structures]. Vinnytsia: VDTU [in Ukrainian].
4. Teodorovic, D. & Janic, M. (2017). *Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling*. New York; London: Butterworth-Heinemann, 894 p. [in English].
5. Korniienko, V.P. (2005). *Zastosuvannia informatsijnykh tekhnolohij v modeliuvanni roboty kontejnernoho terminalu dlia velykovantazhnykh kontejneriv* [Application of information technologies in modeling the operation of a container terminal for heavy-duty containers]. *Nauka v transportnomu vymiri: tezy dopovidej Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (Kyiv, 11–13 travnia 2005 r.). (p.133) [in Ukrainian].
6. D. Z. Shmatko et al. (2020). *Orhanizatsiia ta planuvannia avtomobil'nykh vantazhnykh perevezen'* [Organization and planning of road freight transportation]. Kam'ians'ke: Dniprov. derzh. tekhn. un-t [in Ukrainian].
7. Moroz M.M. & Zahorians'kyj V.H. (2021). *Proektuvannia transportno-tekhnolohichnykh system vantazhnykh perevezen'* [Design of transport and technological systems of freight transportation] Kremenчук: KrNU. Retrieved from [http://document.kdu.edu.ua/info\\_zab/275\\_907.pdf](http://document.kdu.edu.ua/info_zab/275_907.pdf) [in Ukrainian].
8. Hrebennik, I.V. et al. (2022). *Optymizatsiia balansnoho i klasternoho komponuvannia ta zavantazhennia kontejneriv* [Optimization of balanced and cluster layout and loading of containers]. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
9. Shramenko, N.Yu. & Protsyk, O.P. (2011). *Formuvannia resursozberihaiuchoi tekhnolohii funktsionuvannia vantazhnykh terminaliv na osnovi lohistychnykh pryntsypiv* [Formation of a resource-saving technology for the functioning of cargo terminals based on logistic principles]. *Upravlinnia proektamy, systemnyj analiz i lohistyka. Tekhnichna seriia – Project management, system analysis and logistics. Technical series., Issue 8*, 221–224.

10. Radionova, I.F. et al. (2000). *Prykladna ekonomika [Applied economics]*. Kyiv: ArtEk [in Ukrainian].
11. Viter, N.S. (2014). *Formuvannia transportno-tekhnologichnykh system dostavky vantazhiv u kontejnerakh [Formation of transport and technological systems for the delivery of goods in containers]. Doctor's thesis. Kharkiv [in Ukrainian]*.

**В.Г. Загорянський**, доц., д-р техн. наук, **М.М. Мороз**, проф. д-р техн. наук, **Т.В. Гайкова**, доц., канд. техн. наук

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна*

### **Модель оптимального складу основних технічних засобів контейнерної транспортно-технологічної системи**

Метою статті є розробка математичної моделі, що передбачає процедури оптимізації, за допомогою якої можуть бути визначені ефективні типи технічних засобів і їх кількість і структура парку, необхідних для здійснення контейнерних перевезень, в тому числі контейнерів, для коригування корисного навантаження контейнерів.

Технічні засоби контейнерної транспортної системи виділені в шість основних видів (елементів), які утворюють єдиний технічний комплекс. При конкретних розрахунках визначення раціонального типу і параметрів контейнерів, а також структури їх парку для доставки вантажу (вантажів) слід враховувати, чи відповідає типаж і структура парку контейнерів що приймається величинам потрібних (замовних) партій доставки продукції і вносити відповідні поправки значень корисного навантаження контейнера. Для вирішення даної задачі застосована економіко-математична модель технічного комплексу контейнерних перевезень. Для процесу контейнерних перевезень виділена система обмежень математичної моделі, що враховує умови цього процесу. Критерієм ефективності варіанту вибору (цільовою функцією математичної моделі) виступає значення сукупних приведених витрат при їх мінімізації. Виділено чинники, що визначають питомі приведені витрати при перевезенні вантажів з заданими характеристиками в контейнерах з різними параметрами. Запропонований підхід застосований для випадку невідповідності типу і структури парку контейнерів рекомендованим партіям поставки за масою або об'ємом і запропонована методика коригування корисного навантаження контейнерів.

Розглянуто передумови формування та функціонування економічно ефективних контейнерних вантажних перевезень в Україні з використанням автомобільного транспорту. Для вибору раціонального типу і параметрів основних технічних засобів контейнерної транспортної системи та їх поєднань (структури парків) застосований системний підхід, який супроводжується комплексними техніко-економічними розрахунками. Представляється перспективно розробка по даній моделі алгоритму і програми для оптимізації складу контейнерної транспортно-технологічної системи.

**транспортно-технологічна система, контейнер, модель, оптимізація, витрати, перевезення, технічний засіб**

*Одержано (Received) 28.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**УДК 656.073:339.56**

**DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.252-258](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.252-258)**

**І. О. Кузев**, ст. викл., **А. О. Уманська**, викл., **А. О. Кострецов**, здобувач

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна*

*e-mail: [Igor-kuzev@ukr.net](mailto:Igor-kuzev@ukr.net)*

## **Особливості митного оформлення митних процедур**

У статті у військовий час представлені способи митного оформлення товарів. Завданнями обліку реалізації експортних, імпортних товарів та розрахунків з іноземними покупцями є: контроль за рухом товарів; постійне спостереження за своєчасним укладанням та виконанням умов зовнішньоторговельних контрактів; контроль за правильним митним оформленням експортних операцій; визначення доцільності самостійного митного оформлення експорту та імпорту товарів підприємством-експортером.

**експорт, імпорт, зовнішньоекономічна діяльність митні операції, митні процедури**

© І.О. Кузев, А.О. Уманська, А.О. Кострецов, 2023



**Постановка проблеми.** Військовий стан зумовив різку необхідність у тому, як спростити митне оформлення та митні процедури різних груп товарів, вкрай потрібних як для забезпечення нашої країни додатковим захисним та військовим спорядженням, так і цивільних їжею, ліками та іншою гуманітарною допомогою. Особливо важливість вибору органами виконавчої влади лише дієвих методів забезпечення реалізації тактики митної політики і стратегії співробітництва країн на світовому ринку важко переоцінити. Однак сформований за довгі роки механізм в деякій мірі втратив свою регуляторну силу в військовий час, коли держава в пріоритеті визначає лише свої власні інтереси і потреби, прагне захистити національний ринок та товаровиробників, але не може відмовитись від своєї ролі на світовому ринку. Парламент запровадив низку нових норм, які направлені на реалізації цієї мети, на які треба звернути увагу суб'єктам господарювання.

Постановою кабінетом міністрів України від 18 березня 2022 р. № 314 «Деякі питання забезпечення провадження господарської діяльності в умовах воєнного стану», яке передбачено спрощення ведення господарської діяльності шляхом зменшення кількості необхідних дозвільних документів у період воєнного стану. Актуально для новостворених підприємств та установ.

Натомість окремих документів суб'єкти господарювання, які отримали дозвіл, щоб подавати декларацію про провадження господарської діяльності чи до Міністерства економіки України, чи до Міністерства внутрішніх справ України (у залежності від виду господарської діяльності). Але таке спрощення не стосується зовнішньоекономічної діяльності (у тому числі нових підприємств), яке у випадку здійснення якої необхідно отримувати відповідні ліцензії, які для окремих її видів та експорт певних категорій послуг, товарів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вітчизняна практика реалізації митних процедур останнім часом включає цілий комплекс заходів, які пов'язані із проведенням митного оформлення, контролю і справляння відповідних чинних податків і митних платежів, що є регламентоване чинним законодавством. Відповідно до стандартів міжнародних і законодавства України переміщення будь-яких товарів здійснюється за такими напрямками, як імпорт, експорт та транзит. Переміщення різних товарів здійснюється різними видами транспорту: залізничний, автомобільний, водний (морський та річковий), повітряний та трубопровідний та лінії [9]. Якнайбільш об'єктивно прослідкувати особливості митних процедур, що їх як окремо по кожному виду транспорту є необхідність реалізувати аналіз митних процедур при переміщенні товарів та послуг різними видами транспорту, виділити специфічні особливості їх практичної реалізації. Можна зазначити що вищесказані митні процедури для вище згаданих видів транспорту здійснюються в митних зонах.

Україна має дуже вигідне географічне положення, але, за останній час бачимо, що зниження її транзитного потенціалу, яке обумовлено військовим часом, знищенням та руйнуванням інфраструктури, а також низьким розвитком транспортної інфраструктури та неефективною роботою державних митних органів. Унаслідок недостатньої швидкості, чи безпечності перевезень та відсутності гарантій на збереження вантажів, високих тарифів та цін на послуги, та на затримки вантажів контролюючими органами скорочуються будь які вантажопотоки через Україну. Митні формальності, які за межами будь якого пункту розташування здійснюються лише у випадках, що передбачені митним законодавством держави. Проблематика реалізації митного оформлення в Україні активно досліджуваною серед вітчизняних науковців, зокрема, як І.Г. Бережнюк, І.В. Несторишен [1], П.В. Пашко, О. Фрадинський, Л. Федоришина [2], О. Вакульчик, В. Фесенко, Н. Авраменко, Т. Дорошенко,

М. Матвеев [3], Бережнюк І.Г. розглядає митні процедури як операційну частину митного регулювання[4.], Шульга М.Г. розписує, що митні процедури визначаються технічними нормативами залежно від товарів, видів транспорту та митних режимів та заходів не тарифного регулювання, осіб, які переміщують товари [5] та ін.

Процедури митного оформлення та митного контролю є адміністративними заходами, які здійснюються країною при регулюванні зовнішньоекономічної діяльності. Адміністративні інструменти, які входять до системи митного управління зовнішньоекономічними зв'язками. Від отримання чи відправлення вантажів за державний кордон суб'єкт зовнішньоекономічної діяльності повинен пройти на митниці процедуру акредитації.

**Постановка завдання.** Під час дії воєнного стану в Україні аналіз змін в організації митних процедур при забезпеченні зовнішньоекономічної діяльності, які передбачені у законодавстві та митній практиці.

**Виклад основного матеріалу.** Митне декларування на сьогоднішній час необхідно розглядати як основну процедуру митного оформлення, що у сукупності з іншими елементами системи відповідних процедур утворює інститут митного оформлення. Як відокремлена система правових норм утворює окрему ланку складного митного провадження у системі адміністративного процесу. Митному оформленню притаманні свої властиві принципи, які діють у межах однорідних суспільних відносин, які своєю чергою регулюється однорідними правовими нормами.

Митне декларування виконує основні функції:

- забезпечення Державної фіскальної служби України законодавчими відомостями про товари і транспортні засоби;
- підтвердження декларантом правомірності вчинених дій щодо товарів і транспортних засобів, які переміщуються;
- контролю за дотриманням суб'єктами зовнішньоекономічної діяльності та фізичними особами законодавства України.

Процедура та вимоги декларування визначені статтями 257–269 Митного кодексу України [6].

Під час митного декларування суб'єкти митних правовідносин мають бути наділені особливою правосуб'єктністю. З однієї сторони це – безпосередньо суб'єкти ЗЕД, особи, які беруть участь у процесі декларування, такі як: агенти з митного оформлення, митні брокери, експедитори, митні перевізники, власники митних ліцензійних складів та складів тимчасового зберігання, інші особи, що здійснюють свою діяльність на основі цивільно-правових угоді з суб'єктами ЗЕД.

Для отримання та надання ліцензії на експорт вказаних вище товарів суб'єкту господарювання треба звернутися до Міністерства економіки України. Для цього необхідно подати заявку у електронному вигляді на видачу ліцензії, лист-звернення для отримання ліцензії та копії документа, яка підтверджує експортну операцію. У період воєнного стану отримати таку ліцензію можна дуже швидко (протягом 1 дня), більше того – не потрібно відвідувати Міністерство економіки України.

Декларування митного оформлення вказаних товарів в режимі експорту здійснюється у звичайному довоєнному порядку [7].

Закон змінив процедуру оформлення митного деяких товарів, окремих категорій у режимі імпорту, а для інших категорій товарів залишився без змін порядок виконання митних формальностей.

Враховуючи швидкість та оперативність прийняття законодавцем рішень для скорочення митного оформлення товарів, виникла деяка проблема та неоднозначність під час пояснення та застосування новоприйнятих норм.

Згідно постанові КМУ від 9 березня 2022 р. № 236 «Деякі питання митного оформлення окремих товарів, що ввозяться на митну територію України у період дії воєнного стану» (далі - Постанова КМУ 236) начебто запровадила право всіх суб'єктів господарювання обирати спрощений порядок митного оформлення будь-яких товарів, оскільки в п. 1 вказаної Постанови зазначено: «...під час ввезення на митну територію України товарів їх декларування та митне оформлення відповідно до митного режиму імпорту може здійснюватися шляхом подання попередньої митної декларації, яка містить всю необхідну інформацію для випуску товарів, без пред'явлення таких товарів митному органу...».

Отже, з огляду на назву Постанови КМУ 236 та наявність додатку до вказаної Постанови з переліком товарів, які імпортують як суб'єкт господарювання дозволено сплачувати з відстрочкою митні платежі, які законодавець передбачив вказаний спрощений порядок саме для товарів із вищезазначеного переліку.

Законодавець також звільнив від оподаткування митними чи податковими платіжками низку товарів, зокрема:

– прокат легованих сталей, скло безпечне, оптичні прилади для слідкування, апаратура для приймання чи передачі голосу, зображення, безпілотні літальні апарати без озброєння, метеостанції, броньовані автомобілі;

– товари, які ввозяться платниками єдиного податку 1, 2 та 3 груп (ставка 5 % або 2%);

– автомобілі вантажні, легкові автомобілі, мотоцикли, причеми чи напівпричеми, а також транспортні засоби для перевезення пасажирів у кількості до 10 осіб;

– згідно з пунктом 29 частини першої статті 1 Закону України "Про оборонні закупівлі" товари оборонного призначення та складові для її виробництва;

– лікарські засоби, соціально значущі продукти харчування та медичні вироби, на які Кабінетом Міністрів України встановлено фіксовані ціни (постанова КМУ від 22 квітня 2020 р. № 341) ;

– на період воєнного стану звільнено для підприємств, алкогольних напоїв, окрім спирту етилового та інших спиртових дистилатів, пива (крім квасу "живого" бродіння), тютюну, тютюнових виробів, промислових замінників тютюну, рідин, що використовуються в електронних сигаретах. Отже, звільнення запроваджено лише для підприємств [8].

Отже, фізичні особи - підприємці, які є платниками єдиного податку зі ставкою у 3 %, продовжують сплачувати увізне мито.

Особливості розрахунків в імпортих та експортних операціях.

Національний банк України з 05 квітня 2022 року значно зменшив строки розрахунків у імпортно-експортних операціях з 365 днів до 90 днів (з 8 червня до 120 днів) (п 14-2 постанови НБУ від 24.02.2022 № 18).

Експортні та імпортині операції, для яких запроваджені розрахунки не були завершені до 05 квітня 2022 року та мають бути завершені у строк до 365 днів з дати їх здійснення.

Не застосовується (згідно з постановою НБУ від 24.02.2022 № 18) скорочений термін:

– якщо вартість товару чи роботи, а також послуги, яка підлягає імпорту чи експорту не перевищує 400 тис. гривень на дату здійснення ЗЕД операції;

– якщо розмір залишку за імпортовані та експортовані товари або роботу чи послугу не перевищуватиме 400 тис. грн на дату граничного строку для розрахунків;

– до винятків, встановлених НБУ за поданням КМУ (відповідно до постанови НБУ від 14.05.2019 № 67).

До митного органу до моменту подання декларації передую проведення різноманітних видів контролю, в електронному вигляді з поданням контролюючим органам необхідних документів. Це за задумом законодавця може та має зменшити час митного оформлення і забезпечити втручання та надання адміністративної послуги, зображено на рисунку 1. Внаслідок чого здійснення процедур контролю потребує термінів, які значно перевищують задекларований нормативними час документами на проведення митного оформлення (митне оформлення завершується протягом 2-4 робочих годин).

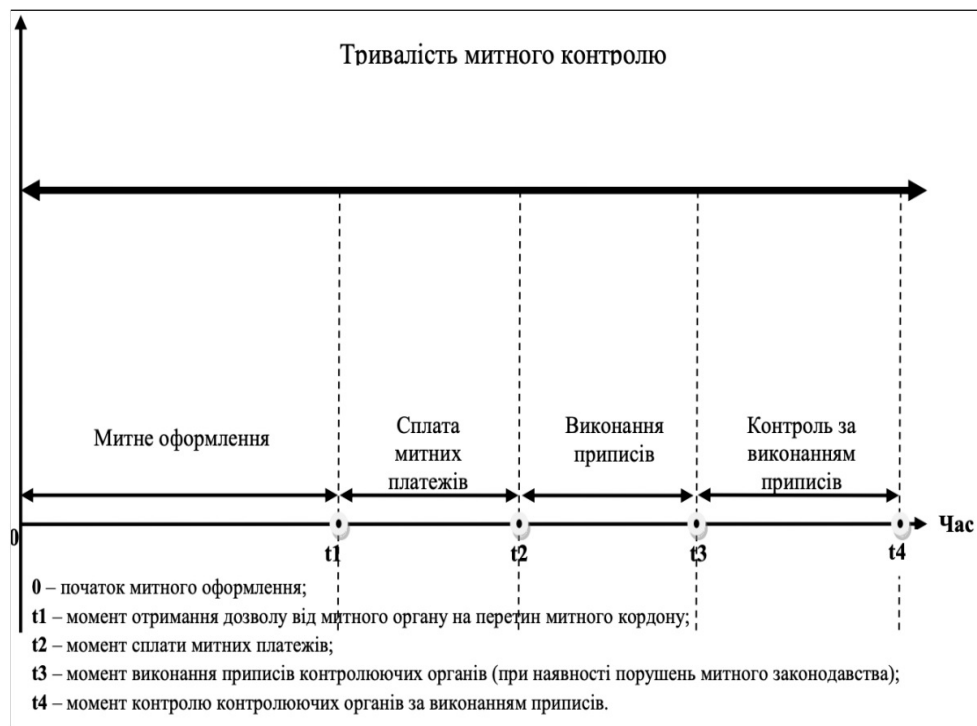


Рисунок 1 – Модель ідентифікація митних процедур

*Джерело: розроблено автором*

Перспективність подальшого наукового дослідження даної тематики зумовлена поступовим розвитком технологій, що розширює можливості автоматизації чи інформатизації процесів до митного контролю чи оформлення, чи необхідністю внесення подальших змін до чинного Митного кодексу України у частині правової регламентації процедури наступного визначення товарів митної вартості та здійснення контролю митного з використанням технології штучного інтелекту. Отже, можна сказати, що об'єктивною необхідністю подальшого удосконалення теоретико-методологічних і правових засад митних режимів в Україні, а також приведення їх у співвідношенні до міжнародних стандартів, а також норм і принципів права ЄС.

#### **Висновки:**

1. Варто уважно стежити за всіма змінами, які вносяться до податкового та митного і валютного законодавства, оскільки в період військового стану законодавець досить активно змінює чи скасовує діючі та впроваджує нові норми з тим, аби швидко реагувати на виклики, які існують у сфері зовнішньоекономічної діяльності в Україні.

2. Особливості організації та контролю митних процедур забезпечення зовнішньоекономічної діяльності в Україні передбачає сукупність заходів з контролю і оформлення товарів чи послуг, а також інших об'єктів, які перетинають митний кордон України та порядок сплати відповідних зборів і податків до бюджету.

## Список літератури

1. Несторишен І. В., Бережнюк І. Г., Брендак А. І. Система управління митними ризиками в контексті спрощення митних процедур. *Modern Economics*. 2020. № 22 (2020). С. 59–63. DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V22\(2020\)-09](https://doi.org/10.31521/modecon.V22(2020)-09)
2. Пашко П., Федоришина Л., Фрадинський О. Загрози і виклики перед митною системою України в умовах пандемії. *Перспективи розвитку науки і бізнесу в глобальному середовищі* : мат. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Терно-піль, 20 трав. 2020 р.). Тернопіль : ТНЕУ, 2020. С. 136–138.
3. Авраменко Н. Л., Дорошенко Т. М., Матвеев М. Е. Проблеми митного контролю в контексті європейської інтеграції України. *Економіка та держава*. 2022. № 1. С. 55–60
4. Бережнюк І. Г. Митне регулювання України: національні та міжнародні аспекти : монографія . Дніпропетровськ : Академія митної служби України, 2009. 543 с
5. Шульга М.Г. Право та управління : електрон. наук. фах. вид. / Нац. ун-т держ. податк. Служби України. Ірпінь. 2012. № 3. С. 475–486
6. Митний Кодекс України : Закон України від 13.03.2012 р. № 4495-17. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4495-17#Text> (дата звернення : 13.03.2023).
7. Царенко В.І., Хома В.О. Митні процедури: ознаки та поняття. URL: [http://www.pap.in.ua/3\\_2019/40.pdf](http://www.pap.in.ua/3_2019/40.pdf) (дата звернення : 15.03.2023).
8. Митне право України : навч. посіб. / за заг. ред. В.В. Ченцова. Київ, 2007. 283 с.
9. Андрушко А.П. Імплементация іноземного досвіду здійснення митного постаудиту в Україні: проблеми та перспективи. *Публічне управління та митне адміністрування*. 2017. № 2(17). С. 214–219.

## References

1. Nestorishen, I.V., Berezhniuk, I.G. & Brendak, A.I. (2020). Systema upravlinnia mytnymy ryzykamy v konteksti sproschennia mytnykh protsedur. [Customs risk management system in the context of simplification of customs procedures]. *Modern Economics*, 22, 59–63. DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V22\(2020\)-09](https://doi.org/10.31521/modecon.V22(2020)-09). [in Ukrainian].
2. Pashko, P.V., Fedoryshyn, L. & Fradynskyi, O. (2020). Zahrozy i vyklyky pered mytnoiu systemoiu Ukrainy v umovakh pandemii. [Threats and challenges to the customs system of Ukraine in the conditions of the pandemic]. *Prospects for the development of science and business in a global environment: Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (m. Terno-pil', 20 trav. 2020 r.) – International Science and Practice Conf.* (P. 136–138.). Ternopil: TNEU [in Ukrainian].
3. Avramenko, N. L., Doroshenko, T. M. & Matveyev, M. E. (2022). Problemy mytnoho kontroliu v konteksti ievropejs'koi intehtratsii Ukrainy [Customs control problems in the context of European integration of Ukraine]. *Ekonomika ta derzhava – Economy and the state*, 1, 55–60 [in Ukrainian].
4. Berezhnyuk, I.G. (2009). *Mytne rehuliuвання України: natsional'ni ta mizhnarodni aspekty* [Customs regulation of Ukraine: national and international aspects] . Dnipropetrovsk: Academy of the Customs Service of Ukraine [in Ukrainian].
5. Shulga M.G. (2012). *Mytne rehuliuвання України: natsional'ni ta mizhnarodni aspekty* [Law and management: electronic. of science profession. kind. / National state university tax Services of Ukraine. Irpin, 3, 475–486 [in Ukrainian].
6. *Mytnyj Kodeks Ukrainy : Zakon Ukrainy vid 13.03.2012 r. № 4495-17.* [Customs Code of Ukraine: adopted. by the Verkhovna Rada of Ukraine on 03/13/2012 No. 4495-VI, revised as of 01/01/2015] . [zakon2.rada.gov.ua](http://zakon2.rada.gov.ua). Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/4495-17> [ in Ukrainian].
7. Tsarenko, V.I. & Homa, V.O. (2019). *Mytni protsedury: oznaky ta poniattia* [Customs procedures: signs and concepts] . Retrieved from [http://www.pap.in.ua/3\\_2019/40.pdf](http://www.pap.in.ua/3_2019/40.pdf). [ in Ukrainian].
8. Chentsova, V.V. (Eds.). (2007). *Customs law of Ukraine: study guide*. Kyiv [ in Ukrainian].
9. Andrushko, A.P. (2017). Implementatsiia inozemnoho dosvidu zdiysnennia mytnoho postaudytu v Ukraini: problemy ta perspektyvy [Implementation of foreign experience of customs post-audit in Ukraine: problems and prospects]. *Publichne upravlinnia ta mytne administruvannya – Public administration and customs administration*, 2(17), 214–219 [ in Ukrainian].

**Ihor Kuziev**, Senior Lecturer, **Anastasiia Umanska**, teacher, **Anatoliy Kostretsov**, student  
*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine*

### **Peculiarities of Customs Clearance of Customs Procedures**

The article presents methods of customs clearance of goods in wartime. The tasks of accounting for the sale of export and import goods and settlements with foreign buyers are: control over the movement of goods;

constant monitoring of the timely conclusion and fulfillment of the terms of foreign trade contracts; control over the correct customs clearance of export operations; determining the expediency of independent customs clearance of export and import of goods by the exporting enterprise.

The development of foreign economic activity gives enterprises the opportunity to use the advantages of international production cooperation, which increases the efficiency of their functioning. In connection with this, there is now an objective need to develop methodical approaches to assessing the effectiveness of export-import operations, which are the basis of foreign economic activity. The proposed method of analysis of export and import operations and their impact on the financial condition of the enterprise is of practical interest for enterprises.

On the basis of the analysis of the current legislation of Ukraine on matters of state customs affairs, specific proposals were made for the development of a single balanced approach to law-making and law enforcement in the sphere of state customs affairs, and a scientifically based holistic administrative-legal concept of implementation of state customs affairs was developed. Prospects for further scientific research should be based on the monitoring of current legislation in the context of customs clearance of goods and may relate to the construction of algorithms for interaction with customs procedures. Based on the analysis of the legislation of Ukraine on some issues of state customs affairs, specific customs proposals were made to develop a unified balanced approach to law-making and law enforcement in the field of state customs affairs.

**export, import, customs operations, customs procedures**

*Одержано (Received) 18.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 21.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 656.078.1

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.258-265](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.258-265)

**О.В. Чорна**, доц., канд. екон. наук, **П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна*

**М.М. Маяк**, проф., д-р техн. наук

*Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна*

**О.С. Шевчук**, доц., канд. техн. наук, **Н.М. Фалович**, доц., канд. екон. наук

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна*

**С.П. Комарніцький**, доц., канд. техн. наук

*Подільський державний університет, Кам'янець-Подільський, Хмельницька область, Україна*

*e-mail: o.romanyshyn@wunu.edu.ua, ppopovich@ukr.net, mayak@lutsk-ntu.com.ua,*

*oksana\_shevchuk84@ukr.net, n.falovych@gmail.com, sergiypetrov2207@gmail.com*

## Підвищення ефективності ланцюгів поставок

У статті визначено важливу роль управління підприємством як інструменту стратегічного розвитку, при цьому слід зазначити, що для досягнення поставлених цілей необхідно використовувати спеціалізовані методи та моделі – ефективний інжиніринг, ефективну оптимізацію та ефективний реінжиніринг логістичних систем підприємства. В статті поглиблено вивчено теоретичні та практичні основи застосування аналітичних методів і моделей у логістиці для вирішення завдань логістичного менеджменту, систематизувати навички розробки та використання аналітичних систем у різних сферах застосування логістичної діяльності. Розглянуто погляди різних науковців на зміст поняття «Ефективність ланцюга поставок». Досліджено основні напрями та елементи, що складають концепцію ефективності ланцюга поставок.

**логістична система, ланцюг поставок, модель SCOR, SCM, інтегральний показник, ефективність, менеджмент**

© О.В. Чорна, П.В. Попович, М.М. Маяк, О.С. Шевчук, Н.М. Фалович, С.П. Комарніцький, 2023

**Постановка проблеми.** За останні п'ятнадцять років статус логістичного підприємства більшості українських і світових компаній зазнав значних змін: від допоміжної функції до основного виробництва до стратегічної. З огляду на невизначеність, стратегічні альянси, розширення асортименту продукції, сегментація ринку, вплив на навколишнє середовище та глобальна економіка продовжуватимуть зростати вимоги до планування. Питання стратегічного проектування та наукового управління логістичними системами набули особливого значення після постіндустріальної революції, але лише нещодавно стало можливим розробити складні системи розподілу з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки, телекомунікації та інформаційних технологій, які дійсно є оптимальними для найбільших фактично використовується в компанії. З розвитком інформаційних технологій сфера застосування програмного забезпечення для проектування логістичних систем змінилася. Метою управління ланцюгом поставок є максимізація загальної вартості, створеної ланцюгом поставок. Це значення визначається як різниця між часом, який клієнт готовий заплатити за продукт, і загальними витратами, понесеними в ланцюжку поставок. Для більшості ланцюгів постачання цей показник можна назвати «прибутковістю ланцюга постачання», що визначається як різниця між доходом, отриманим від клієнтів, і загальними витратами в ланцюзі постачання. Тому необхідно уточнити основні показники оцінки ефективності ланцюга поставок. Враховуючи значні досягнення, досягнуті вченими в країні та за кордоном, доцільно використовувати моделювання та зосереджуватися на багатьох аспектах при оцінці економічної ефективності ланцюгів поставок. Наприклад, з точки зору управління логістикою, більше уваги слід приділяти методу класифікації, який враховує багато вимірів. Якщо він не буде належним чином систематизований і формалізований, при моделюванні процесу виникнуть великі помилки. Проблема посилюється при оптимізації витрат без розвитку логістичних можливостей. Крім того, при виконанні розрахунків існуючі базові методи, моделі часто використовуються як умовні приклади, тому рекомендується розробляти та вдосконалювати методи застосування аналітичних методів для систематизації інформаційних масивів (елементів і параметрів логістичних ланцюгів). Забезпечення адекватного моделювання внутрішньо-економічних процесів у логістичних системах часто пов'язане з високим ступенем відповідальності за вплив управлінських рішень на результати. Існує потреба в застосуванні аналітичних задач, які розглядають процеси, що відбуваються через застосування коректної вихідної інформації з використанням громіздкого математичного обладнання (ПК). На цій основі ряд математичних проблем, таких як ідентифікація моделі, оцінка стану та моделювання системи, повинні бути вирішені в динамічному формулюванні проблеми. При такому моделюванні адекватність і валідність моделей і методів потребує врахування багатьох факторів і специфіки динамічного впливу вихідних даних (неоднозначності, неточності, невизначеності тощо); властивостей, ігрової невизначеності, інформації про опис об'єкти як динамічні системи, ресурсні обмеження). Багаторічні наукові дослідження в цій галузі забезпечили розвиток методів прогнозування, але існують великі труднощі їх аналітичного вирішення. Математичні інструменти дозволяють формалізувати в одній системі різні види інформації: статистичну, визначену, інтервальну.

Формалізми нечіткої логіки, особливо теорії нечітких множин, забезпечать раціональну та правильну інтерпретацію точної експертної інформації, що стосується логічних проблем. Тому в сучасних вітчизняних умовах, коли статистичної інформації бракує, або її достовірність викликає сумніви, а інформація відрізняється

за якісними та кількісними показниками, використання нечітких методик буде ефективним і виправданим, коли доступна лише спеціалізована лінгвістична інформація. При застосуванні економіко-математичних методів пропонується змінити підхід до розв'язання оптимізаційних задач з детермінованих позицій на оптимізацію з використанням моделей аналізу нечіткої логіки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням підвищення ефективності ланцюгів постачання в економічній літературі приділяли багато уваги, зокрема вітчизняні та зарубіжні вчені, такі як: Глінн Ф. [1], Іванова М. [3], Колодізієва Т.О. [5], Лиса С.С. [6], Попович П.В. [7-10], Попов О.І. [11], Сигида Л.О. й Сигида Н.О. [12]. Кожен науковець надає свої власні показники. Попов О. І. вважає, що для оцінки ефективності ланцюга поставок необхідно використовувати сім основних показників для оцінки ефективності ланцюга поставок, а саме: якість обслуговування; загальні логістичні витрати; термін виконання замовлення; фінансові показники; сила; додана вартість; якість продукції [11]. Також виділено основні вектори для оцінки операцій ланцюга постачання: - Сервісність - ступінь задоволення потреб клієнтів; - Ефективність - економічність використання підприємством ресурсів; готовність.

Переводячи тріаду рушійних сил ланцюга постачання в критерії оперативної оцінки, слід згадати наступні фактори: 1. Якість – розглядається ширше, ніж відповідність специфікаціям, лише конкретні атрибути, функціональність, тривалість, надійність, естетика тощо. 2. Умови доставки - їх результати оцінюються позитивно, коли результати дій відповідають очікуванням з двох основних аспектів доставки: умов щодо кількості замовлення та часу доставки. 3. Час циклу замовлення - час доставки розраховується з моменту прийняття клієнтом замовлення до моменту прибуття товару в місце отримання, вказане клієнтом. 4. Втрати витрачаються на непотрібні процедури, тобто в процесі задоволення потреб клієнтів не додається жодної цінності.

Лиса СС вважає, що важливо розділяти кількісні та якісні оцінки. Тому серед факторів кількісної оцінки слід звернути увагу на точність поставок, умови доставки, використання потужностей, тривалість виробничого циклу, витрати на логістику, запаси, стабільність поставок і комерційну цінність. Ключові показники для оцінки якості: рівень обслуговування, обсяг продажів, швидкість реагування, конкурентоспроможність, частка ринку, прозорість, гнучкість, якість, якість управління [6, С. 58]. Якщо говорити про ефективність управління ланцюгом поставок, то вчені виділяють наступні напрямки: збільшення кількості замовлень і підвищення стабільності попиту, зменшення страхових запасів («заміна запасів точною інформацією»), зниження ризиків і підвищення надійності планування сексу та постачання, зменшення накладних витрат та операційних витрат. При цьому джерелами підвищення економічної ефективності вважаються єдині інформаційні канали, синхронізація бізнес-процесів, спільне прогнозування попиту, скоротити час, необхідний для виведення нових продуктів на ринок. Завдяки безперервному моніторингу всього ланцюга постачання, своєчасно виявляти відхилення та порушення в ланцюзі постачання, покращувати якість управління операціями, а також усуненню невизначеностей, пов'язаних із закупівлями, складуванням та бізнес-процеси продажів, пов'язані з статтю, тим самим зменшуючи деякі витрати на маркетинг і логістику. [6, с. 58].

**Постановка завдання.** Ефективність дослідження основних напрямків впровадження SCM. Відповідно до моделі SCOR раціональність групи показників для оцінки ефективності ланцюга поставок базується на базовому процесі ланцюга



поставок. Запровадити загальні показники для оцінки ефективності ланцюга поставок. Визначення основних напрямів підвищення ефективності ланцюга постачань

**Виклад основного матеріалу.** При вивченні механізму ланцюга поставок одним із основних етапів визначення його застосування є етап оцінки ефективності запропонованого логістичного ланцюга, оскільки за його результатами буде прийнято рішення про реалізацію ланцюга поставок у задоволенні кінцевого ефекту. У протилежному випадку ланцюг поставок потребує реструктуризації або модифікації. [6, с. 53].

Підвищення ефективності ланцюга постачання, внесення серйозних змін не завжди потребує дорогих модернізацій або капітального ремонту найму — іноді все, що потрібно зробити менеджеру, — це підвищити обізнаність, зосередитися на навчанні та дивитися в майбутнє, щоб краще досягати чи покращувати цілі. Отже, дотримуйтеся цих кроків, щоб допомогти вашому бізнесу розробити поточну стратегію ефективності ланцюга поставок: 1. Покращте видимість ланцюга поставок. 2. Автоматизуйте там, де це важливо, і керуйте всіма необхідними деталями. 3. Залучіть свій ІТ-відділ. 4. Оцініть свою програму навчання. 5. Виконати план проекту [1]. М. Іванова призначає показники ефективності за моделлю COR етапу формування ланцюга поставок. Але розділяє чотири, а не п'ять загальноприйнятих етапів: планування, закупівля запасів, виробництво, продаж [3, с. 309–310]. На жаль, немає єдиної думки щодо єдиної системи оцінки ефективності ланцюга поставок. Розбіжності в думках науковців свідчать про об'єктивну необхідність створення єдиного програмного рішення, яке зможе використовувати кожен логіст. Складність полягає в обробці та порівнянні багатьох різних показників, що характеризують діяльність на різних етапах і рівнях управління ланцюгом поставок. Ефективність управління ланцюгом постачання передбачає виконання всіх операцій на кожному етапі з найменшими витратами.

Реалізація логістичного проекту у вітчизняних умовах є змінною та складною динамічною системою (фінансово-економічною тощо), яка передбачає прогнозування економічної ефективності, з акцентом на адекватну оцінку та прогнозування підвищених ризиків. Проблемою такого оцінювання є багатофакторність (реалізація моделі, зміни вихідних даних тощо) при використанні цільової функції. Традиційні підходи до вирішення таких некоректних задач не можуть забезпечити адекватність результатів і вимагають використання нових методик аналітичного моделювання функціональних процесів логістичних систем. Враховуючи значні досягнення, досягнуті вченими в країні та за кордоном, доцільно використовувати моделювання та зосередитися на багатьох аспектах при оцінці економічної ефективності ланцюгів поставок сьогодні. Наприклад, з точки зору управління логістикою, більше уваги слід приділяти методу класифікації. Існує багато вимірів, які слід враховувати. Якщо він не буде належним чином систематизований і формалізований, у моделюванні процесу виникнуть великі помилки. Проблема посилюється, якщо витрати оптимізуються без розробки або вдосконалення аналітичних динамічних методів, які поєднують кілька логістичних функцій. Крім того, при виконанні розрахунків існуючі базові методи та моделі часто використовуються як умовні приклади, тому рекомендується розробляти та вдосконалювати методи, які застосовують аналітичні методи для систематизації інформаційних масивів (елементів і параметрів логістичних ланцюгів).

Забезпечення адекватного моделювання внутрішніх економічних процесів у логістичних системах, часто пов'язане з високим ступенем відповідальності за вплив управлінських рішень на результати, вимагає застосування аналітичних завдань, які враховують те, що відбувається через застосування коректної вихідної інформації із

використанням громіздких методів. Математичний прилад процесу, ПК. На цьому ряд математичних проблем, таких як ідентифікація моделі, оцінка стану та моделювання системи, повинні бути вирішені в динамічному формулюванні проблеми. При цьому виді моделювання адекватність моделей і методів потребує врахування багатьох факторів, що впливають на характеристики, динаміку вихідних даних (неоднозначність, неточність, невизначеність тощо), об'єктів, що моделюються (конфліктні властивості), ігрова невизначеність, інформація про опис об'єктів як динамічних систем, ресурсні обмеження).

Ці фактори керують процесом вирішення аналітичних проблем, що керують складними динамічними системами, що свідчить про важливість досліджень, які враховують багатофакторну природу невизначеності. Традиційні математичні статистичні методи мають багато обмежень, ігнорування яких може призвести до неправильних рішень у логістиці нестабільність при застосуванні моделей розподілу ймовірностей через неповну інформацію, вимога враховувати невизначені фактори нестатистичного характеру (експертно-лінгвістична невизначеність, суб'єктивність оцінки тощо); неможливість отримання статистичних даних про ситуацію з організаційно-технічних систем, а також необхідність урахування взаємовиключної інформації, що призводить до значних труднощів при формалізації математичних моделей.

Розробка та систематизація для моделювання та обробки нечітких даних, колекцій тощо. Новий математичний підхід, який показує, що на якість досліджуваних аналітичних моделей впливає складність опису динамічних процесів з нестатистичними невизначеностями, неможливість застосування семантичних модальностей, до нечітких даних, однорідний опис кількісної інформації. Використання нечітких логічних моделей аналізу є виправданим при розв'язанні задач з невизначеністю, а з розвитком ефективної математики та програмного забезпечення це забезпечить узагальнення опису невизначеності.

З точки зору ланцюга поставок напрямок зусиль підприємств, що його формують, полягає в покращенні ефективності та підвищенні конкурентоспроможності ринкових котирувань. Домінуюча концепція ланцюга постачання полягає в тісній інтеграції з постачальниками та споживачами для отримання додаткового успіху на ринку та переваг. Наприклад, у ланцюзі поставок акцент змістився з управління запасами окремих підприємств на оптимізацію розподілу запасів з точки зору ланцюга поставок в цілому. Концепція не встановлює ні фіксованого набору ланок ланцюга поставок, ні конкретного порядку для цих ланок, тобто структуру ланцюга можна постійно змінювати відповідно до потреб і кінцевих цілей конкретних учасників ланцюга поставок. Часто на практиці у налагодженому ланцюжку поставок пріоритети зміщуються з питань його операційної ефективності на покращення процесів обслуговування клієнтів.

Саме ця зміна може диктувати необхідність реструктуризації існуючих ланцюгів постачання. Компанії, що взаємодіють у ланцюзі поставок, створюють певний набір взаємозалежних процесів фізичного руху, а також організаційних та інформаційних процесів. Незважаючи на тенденцію до повної інтеграції ланцюгів поставок, сфера оцінки функціональності ланцюгів поставок розвинена недостатньо. Як правило, оцінка ланцюга поставок не є єдиною системою. Це традиційний спосіб оцінки діяльності окремих підприємств – ніби вони не утворюють набір учасників руху товарів у ланцюжку поставок.

Виконання таких замовлень вимагає ефективності всього ланцюжка поставок, а не однієї чи кількох логістичних операцій. Цей ідеальний порядок також вимагає

ефективної співпраці всіх компаній у ланцюзі постачання. Можливо, досконала система показників повинна стежити за безперебійним виконанням ідеального замовлення на всіх його етапах: прийняття замовлення, надання кредиту, наявність запасів, точність надходження зі складу, доставка в певний час, правильний рахунок-фактура та належна оплата. Проте «ідеальний порядок» українських компаній є теоретичним поняттям і до кінця не реалізований, оскільки з логістичної точки зору навіть провідні іноземні компанії анонсують лише 50-55% замовлень, які досягають рівня ідеального порядку. , тоді як більшість підприємств виконують менше ніж 20% «ідеальних замовлень».

**Висновки.** На даний момент визначено основні процесні показники управління ланцюгом поставок, які безпосередньо впливають на зростання ефективності ланцюга поставок, сформульовано загальні показники оцінки ефективності ланцюга постачань та запропоновано основні напрями підвищення його ефективності. Показники ефективності управління ланцюгами поставок необхідно розглянути в майбутньому; Встановити відмінності у впливі понять «ефективність» і «ефект» на управління ланцюгами поставок. У сучасних вітчизняних умовах, коли статистичної інформації бракує або/або її достовірність викликає сумніви, а також коли інформація відрізняється за якісними та кількісними показниками, використання нечітких методик буде ефективним і виправданим за наявності спеціалізованої професійної мовної інформації. При застосуванні економіко-математичних методів пропонується змінити підхід до розв'язання оптимізаційних задач з детермінованих позицій на оптимізацію з використанням моделей аналізу нечіткої логіки. Ланцюг поставок є складним поняттям як з теоретичної, так і з практичної точки зору. З цієї причини менеджери готові використовувати більш аналітичне представлення детальних питань як доповнення до комплексної оцінки продуктивності ланцюга постачання для точності оцінки. Раціональний підхід до синтезу та аналізу ефективності логістичних систем запропонували польські вчені, які запропонували оцінювати ефективність логістичних підсистем за допомогою часткових показників, зазначивши, що «...часткові показники дають уявлення про оцінку змін логістичних підсистем, які відбуваються в та умови, що призводять до цих процесів.». Подібний підхід використовується в цій статті для оцінки ланцюгів поставок, але ми обмежуємо кількість показників тими, які є найбільш важливими та важливими для функціонування ланцюга поставок. У той же час, безсумнівно, величезна кількість показників, доступних для оцінки ефективності ланцюга постачання, справді вражає.

## Список літератури

1. Glynn F. 5 tips to improve supply chain efficiency . *6 River System : website*. 2019. URL: <https://6river.com/how-to-increase-supply-chain-efficiency/> (дата звернення: 06.03.2023).
2. Григорак М.Ю. Інтелектуалізація ринку логістичних послуг: концепція, методологія, компетентність: монографія. К.: Сік Груп Україна, 2017. 513 с.
3. Іванова М. Парадигма як модель дослідження розвитку логістики. *Науковий вісник Одеського національного економічного університету*. 2015. № 10. С. 95-109. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nv\\_2015\\_10\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nv_2015_10_9) (дата звернення: 25.02.2023).
4. Крикавський Є., Похильченко О., Фертч М., Крикавський Є.В. Логістика та управління ланцюгами поставок: навч. посіб. Львів: Видавництво ЛП, 2017. 844 с.
5. Колодізева Т.О. Визначення ланцюгів поставок та їхня роль у підвищенні ефективності логістичної діяльності підприємств. *Проблеми економіки*. 2015. № 2. С. 133-139. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon\\_2015\\_2\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon_2015_2_20)(дата звернення: 25.02.2023).
6. Лиса С.С. Управління ланцюгами поставок торгівельних мереж. *Вісник ОНУ імені І.І. Мечникова*. 2017. Т. 22. Вип. 1 (54). С. 80-84.
7. опович П.В. Проблематика імітаційного моделювання в оцінці економічної ефективності у логістиці . *Вісник ХНТУСГ*. 2016. Вип. № 169. С. 226 - 229.

8. Попович П.В. Економічні аспекти використання послуг 3PL операторів вітчизняними підприємствами. *Науковий журнал*. 2016. № 2. С. 125-129.
9. Дослідження тенденцій розвитку ринку вантажних автомобільних перевезень у сучасних умовах / П. В. Попович, О. С. Шевчук, А. Й. Матвіїшин, В. М. Лотоцька. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки*. 2016. № 2. С. 224-229.
10. Попович П.В., Шевчук О.С., Дзюра В.О., Бабій М.В. Аналіз ринку автотранспортних перевезень України. *Вісник машинобудування та транспорту : наук. журнал ВНТУ*. 2017. № 2. С. 124-130.
11. Попов О.І. Критерії оцінки ефективності ланцюгів поставок підприємств харчової промисловості. *Ефективна економіка*. 2010. № 6. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=226> (дата звернення: 15.03.2023).
12. Сигида Л.О., Сигида Н.О. Оцінювання ефективності ланцюгів поставок: методичний аспект. *Бізнес-навігатор : наук.-виробн. журнал*. 2017. Вип. 2 (41). С. 63-69.

## References

1. Glynn, F. (2019). 5 tips to improve supply chain efficiency. *6 River System : website..* Retrieved from <https://6river.com/how-to-increase-supply-chain-efficiency/> [in English].
2. Нрыгорак, М.Ю. (2017). [Intellectualization of the logistics services market: concept, methodology, competence]. Kyiv: Sik Group Ukraine [in Ukrainian].
3. Ivanova, M. (2015). Paradigm as a model of logistics development research. *Scientific Bulletin of Odessa National Economic University*. No. 10. P. 95-109. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nv\\_2015\\_10\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nv_2015_10_9) (date of application: 09/25/2019).
4. E.V. Krykavskiy Logistics and supply chain management: training. manual / E. Krykavskiy, O. Pokhilchenko, M. Fertch. – Lviv: LP Publishing House, 2017. – 844 p.
5. Kolodizeva T. O. Definition of supply chains and their role in increasing the efficiency of logistics activities of enterprises. *Problems of the economy*. 2015. No. 2. P. 133-139. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon\\_2015\\_2\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon_2015_2_20) (date of application: 09/25/2019).
6. Lysa S.S. Management of supply chains of trade networks. *Bulletin of ONU named after I.I. Mechnikova*. 2017. T. 22. Issue 1 (54). P. 80-84.
7. Popovych P.V. Problems of simulation modeling in the evaluation of economic efficiency in logistics / Popovych P. // *Bulletin of KhNTUSG*. – Kharkiv, 2016. – Issue No. 169. – pp. 226 - 229.
8. Popovych P.V. Economic aspects of using the services of 3PL operators by domestic enterprises. *Scientific journal*. – Lutsk: Lutsk National Technical University, 2016. No. 2.- P. 125-129.
9. P. V. Popovych Research of trends in the development of the market of road freight transportation in modern conditions / P. V. Popovych, O. S. Shevchuk, A. Y. Matviishyn, V. M. Lototska // *Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical sciences*. - 2016. - No. 2. - P. 224-229.
10. Popovych P.V. Analysis of the auto transport transportation market of Ukraine//Popovych P.V., Shevchuk O.S., Dzyura V.O., Babii M.V./ *Visnyk mechanical engineering and transport*, 2017 No. 2 Scientific journal of VNTU, Vinnytsia: VNTU, 2017, pp. 124-130.
11. Popov O.I. Criteria for evaluating the efficiency of supply chains of food industry enterprises. *Efficient economy*. 2010. No. 6. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=226> (access date: 09/25/2019).
12. Sigida L.O., Sigida N.O. Evaluating the efficiency of supply chains: a methodological aspect. *Scientific and industrial magazine "Business-navigator"*. 2017. Issue 2 (41). P. 63-69.

**Olga Chorna**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Pavlo Popovich**, Prof., DSc.

*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

**Mukola Mayak**, Prof., DSc.

*Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine*

**Oksana Shevchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Falovych**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.

*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

**Serhii Komarnitskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Podolsk State University, Kamianets-Podilskyi, Khmelnytskyi region, Ukraine*

### **Increasing the Efficiency of Supply Chain**

The article defines the important role of enterprise management as a tool of strategic development, while it should be noted that in order to achieve the set goals, it is necessary to use specialized methods and models - effective engineering, effective optimization, and effective reengineering of the enterprise's logistics systems. The goal is to study in depth the theoretical and practical foundations of the application of analytical methods and models in logistics to solve the problems of logistics management, to systematize the skills of developing and using analytical systems in various areas of application of logistics activities.

The views of various scientists on the meaning of the concept of "Effectiveness of the supply chain" are considered. The main directions and elements that make up the concept of supply chain efficiency have been studied. Let us note the main areas of effectiveness of SCM implementation: increasing the number of orders, increasing the stability of demand, reducing insurance reserves, reducing risk and increasing the reliability of planning and delivery. According to the basic supply chain process, it is recommended to consider the main indicators of supply chain performance evaluation in the SCOR model: planning, procurement, production, sales and returns. For each set of indicators, growth and decline indicators are highlighted separately.

A general index of supply chain performance evaluation is proposed. The direction of increasing the efficiency of the supply chain is proposed: increasing the visibility of the supply chain; certification training; investments in smart technologies; development of project plans.

**logistics system, supply chain, SCOR model, SCM, integral indicator, efficiency, management**

*Одержано (Received) 27.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**УДК 656.025**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.265-274](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.265-274)

**Р.А. Хабутдінов**, проф., д-р техн. наук

*Національний транспортний університет, Київ, Україна*

**І.О. Федоренко**, асп.

*Національний транспортний університет, Київ, Україна*

*e-mail: habutdl@gmail.com, fedorenko.ntu@gmail.com*

## **Порівняльний аналіз автобусів та електробуса за показником транспортної результативності технологічних впливів машинних процедур**

У статті представлено методику аналізу транспортної віддачі машинно-технологічних процедур автобусів та електробусів на міських маршрутах, яка спрямована на наукове-методичне забезпечення технологічно-інтенсивних і екологічних проектів міських автобусних перевезень з урахуванням концепції технологічно-сталого розвитку у сфері пасажирських перевезень. Отримано кількісні закономірності впливу різних факторів (технічних, дорожніх, транспортних) на величини показника ТВ транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусу і електробусу.

**автотранспортна операція, автомобільно-транспортна технологія, технічні ресурси, енергоефективність, машинно-технологічні процедури, автобус, електробус**

© Р.А. Хабутдінов, І.О. Федоренко, 2023

**Постановка проблеми.** На автотранспорті актуальні принципи сталого розвитку і концептуальні методи щодо оцінки, аналізу і синтезу процесів високо-технологічного і ресурсозберігаючого відтворення автотранспортних послуг (ВТРВАП). Вони необхідні для інноваційної реалізації ресурсне-ефективної та інтенсивно-розширеної мікроекономіки автотранспортних процесів (РЕІРМАП). Одним із таких є метод підвищення транспортної віддачі (результативності) машинно-технологічних процедур автотранспортних засобів (АТЗ) [1], якій відповідає принципам сталого розвитку автомобільно-транспортної технології та технологічних процесів автомобільних перевезень [2]. Для впровадження таких принципів використовуються нові підходи до наукового опису функціонування АТЗ як ресурсне-технічного і технологічного засобу виробництва (АРТТЗВ) у натуральних процесах автомобільних перевезень. В існуючих на автотранспорті методах аналізу організації автомобільних перевезень [3,4] використовуються модель рухомого складу (опис поведінки віртуально-мобільного кузову) і модель транспозиційного процесу за теоретичною схемою віртуального пересування кузову у нематеріальному просторі. У зв'язку з цим, принципи сталого розвитку технологічних процесів автомобільних перевезень неможливо впровадити. У даній статті представлено методику аналізу транспортної віддачі машинно-технологічних процедур автобусів (як АРТТЗВ) на міських маршрутах, як приклад реалізації нового підходу і вищезгаданих принципів. Крім того, на основі порівнювального аналізу автобусу і електробусу показано, що дана методика може бути використана для вирішення іншої важливої задачі – обґрунтування проектів підвищення екологічності міських пасажирських перевезень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У працях Хабутдінова Р.А. [1,2] вперше представлено і обґрунтовано актуальність і необхідність використання наукового опису функціонування АТЗ як ресурсне-технічного і технологічного засобу виробництва (АРТТЗВ), а також показників транспортної віддачі ТВ машинно-технологічних процедур АТЗ і енергоефективності перевезень. У роботах к. т. н. Піцика М.Г. [5] моделі цих показників адаптовано для вирішення задач підвищення транспортної енергоефективності автобусів малої і середньої місткості на міських маршрутах. Науковці Хмельов І.В. [6] і Гальона І.І. [7] також працювали над питанням впливу конструктивно-технічних, експлуатаційних та дорожніх факторів на показник транспортної результативності технологічних впливів машинно-технологічних процедур АТЗ великої та малої вантажності.

**Постановка (мета) завдання статті.** Метою статті є отримання кількісних закономірностей впливу різних факторів (технічних, дорожніх, транспортних) на величини показника ТВ транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусу і електробусу.

**Виклад основного матеріалу.** Важливими для виробничого функціонування автобусу як АРТТЗВ є чотири машинні процедури автомобільно-транспортної технології [1] (тобто машинно-технологічні процедури): енерго-перетворюючі, трансмісійні, тягово-динамічні, траєкторне-кінетичні. Різниця у операційній поведінки автобусу і електробусу тільки в сутності першої процедури, тому що у останнього відбувається перетворення потоку електричної енергії, а не тепломеханічної. Показником транспортної віддачі ТВ (результативності) комплексу машинно-технологічних процедур автобусу і електробусу (1) називається відношення дискретної транспортної роботи автобусу  $W(\Delta l)$ , яка відповідає їх пробігам  $\Delta l$  і часу руху  $\Delta t$  у моделі тестовій операції, до величини квадратичного імпульсу їх середньої сили тяги –  $P_m, P_m \cdot \Delta t^2$  [8,9]:

$$TB = \frac{W(\Delta D)}{P_m \Delta t^2} \rightarrow \max \quad (1)$$

Для аналізу середньозваженого значення показника ТВ транспортної результативності технологічних впливів машинних процедур автобуса в тестовій операції (за пробігом автобуса (TBC<sub>s</sub>) і за часом його руху (TBC<sub>t</sub>)) для автобусів з дизельним двигуном внутрішнього згорання і електробусів використовуються математичні моделі (2 і 3).

$$TBC_s = \frac{\sum I(T_{pi}) \cdot S_i}{\sum S_i} \quad (2)$$

$$TBC_t = \frac{\sum I(T_{pi}) \cdot t_i}{\sum t_i} \quad (3)$$

У таблицях 1 – 4 і на рисунках 1 – 8 представлено графіки залежностей середньозваженого значення показника транспортної віддачі машинно-технологічних процедур різних транспортних засобів в тестовій операції (як за їх пробігом (TBC<sub>s</sub>), так і за часом їх рухів (TBC<sub>t</sub>)) при зміні значень експлуатаційних (коефіцієнт використання пасажиромісткості автобуса  $\gamma_{ст}$ ) і дорожніх факторів (коефіцієнт опору коченню  $f$ ) для автобусів Богдан А70132 [10], МАЗ 103 [11] і електробуса NJL6128BEV Skywell [12].

Таблиця 1 – Значення показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробуса NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за їх пробігами (TBC<sub>s</sub>) при зміні коефіцієнту використання їх пасажиромісткості  $\gamma_{ст}$

$\gamma_{ст}$	1	0,8	0,6	0,4	0,2
Богдан А70132	0,373	0,299	0,224	0,149	0,075
МАЗ 103	0,477	0,382	0,286	0,191	0,095
Skywell NJL6128BEV	0,382	0,306	0,229	0,153	0,076

Джерело: розроблено авторами

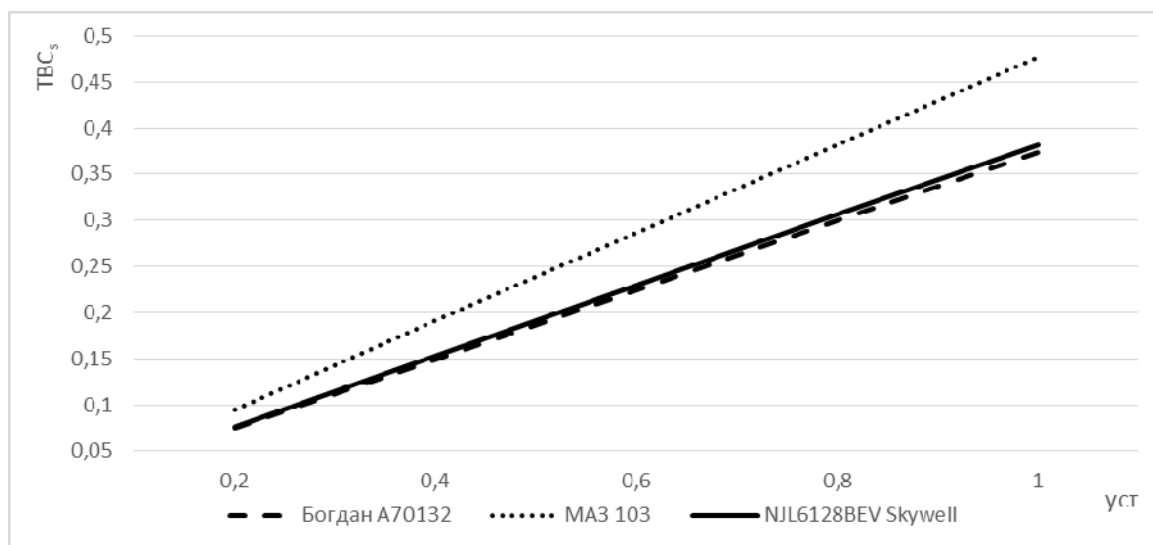


Рисунок 1 – Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробуса NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за їх пробігами (TBC<sub>s</sub>)

при зміні коефіцієнту використання їх пасажиромісткості  $\gamma_{ст}$

Джерело: розроблено авторами

Графіки залежності показника транспортної результативності технологічних впливів машинних процедур автобуса в циклі тестової операції по пробігу автобуса ( $TBC_s$ ) для автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробуса NJL6128BEV Skywell при зміні коефіцієнту використання пасажиромісткості автобуса  $Y_{ст}$ , що представлено на рисунку 1, демонструє зростаючу лінійну залежність  $TBC_s$  при зміні значень  $Y_{ст}$  в діапазоні 0,2 – 1.

Таблиця 2 – Значення показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробуса NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції- за їх пробігами ( $TBC_s$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$

$f$	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020
Богдан А70132	0,373	0,342	0,308	0,27	0,227
МАЗ 103	0,284	0,257	0,229	0,2	0,169
Skywell NJL6128BEV	0,382	0,378	0,374	0,37	0,364

Джерело: розроблено авторами

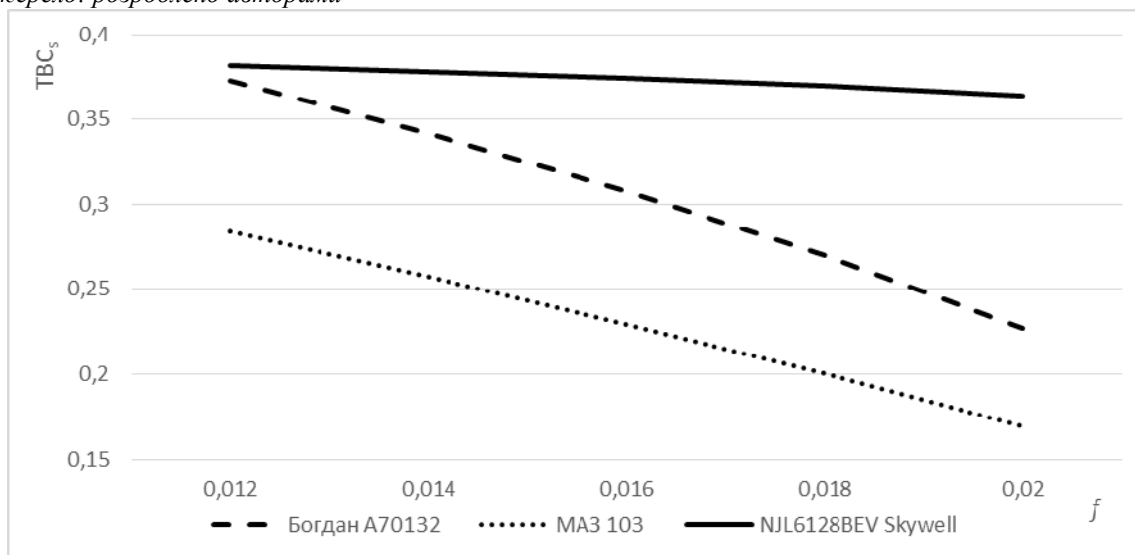


Рисунок 2 – Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробуса NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за їх пробігами ( $TBC_s$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 2 демонструє залежність показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробуса NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції- за їх пробігами ( $TBC_s$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$ . При цьому автобуси МАЗ 103 і Богдан А70132 мають різкі спадаючі лінійні залежності, значення показника транспортної результативності технологічних впливів машинних процедур автобуса в циклі тестової операції по пробігу автобуса ( $TBC_s$ ) зі зростанням коефіцієнту опору коченню  $f$  зменшується на 39,1% для автобуса Богдан А70132 і 40,5% для автобуса МАЗ 103. Електробус NJL6128BEV Skywell при зростанні коефіцієнту опору коченню  $f$  зменшується на 4,7%.



Таблиця 3 – Значення показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробусу NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) при зміні коефіцієнту використання пасажиромісткості автобуса  $\gamma_{ст}$ .

$\gamma_{ст}$	1	0,8	0,6	0,4	0,2
Богдан А70132	0,386	0,309	0,232	0,154	0,077
МАЗ 103	0,307	0,246	0,184	0,123	0,061
NJL6128BEV Skywell	0,376	0,3	0,225	0,15	0,075

Джерело: розроблено авторами

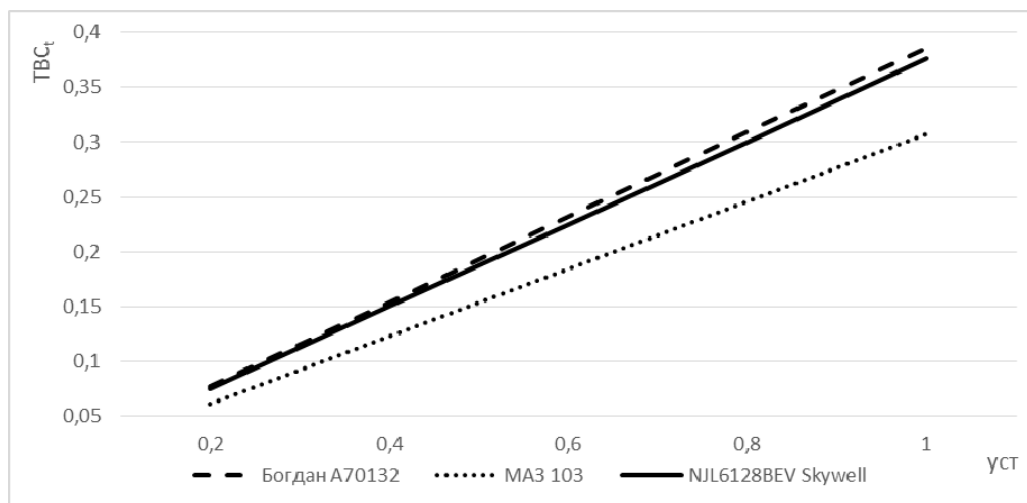


Рисунок 3 – Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробусу NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) при зміні коефіцієнту використання пасажиромісткості автобуса  $\gamma_{ст}$

Джерело: розроблено авторами

Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробусу NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) при зміні коефіцієнту використання пасажиромісткості автобуса  $\gamma_{ст}$ , що представлено на рисунку 3, демонструє зростаючу лінійну залежність  $TBC_s$  при зміні значень  $\gamma_{ст}$  в діапазоні 0,2 – 1. При цьому найвищі значення для автобуса Богдан А70132, автобус МАЗ 103 має найнижчі значення ( $TBC_t$ ).

Таблиця 4 – Значення показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробусу NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$

$f$	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020
Богдан А70132	0,386	0,352	0,315	0,274	0,226
МАЗ 103	0,307	0,282	0,255	0,226	0,195
NJL6128BEV Skywell	0,376	0,371	0,366	0,361	0,356

Джерело: розроблено авторами

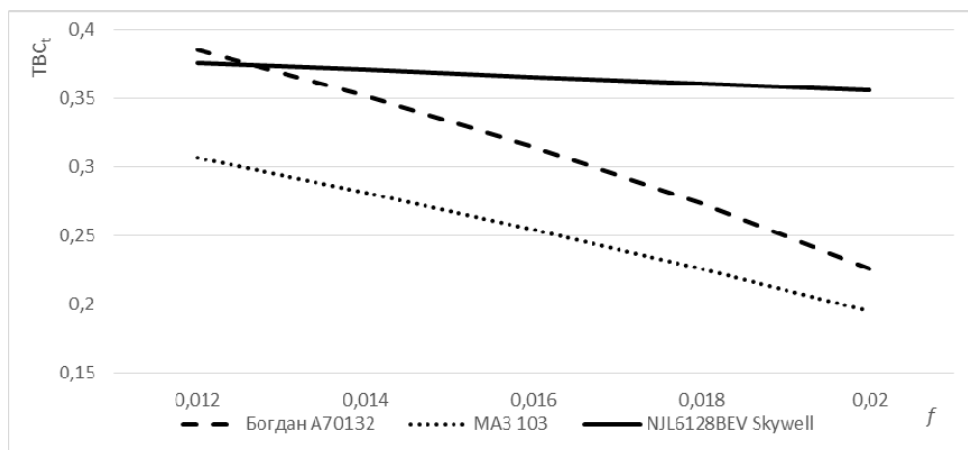


Рисунок 4 – Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробусу NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$   
*Джерело: розроблено авторами*

Рисунок 4 демонструє залежність показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробусу Skywell NJL6128BEV в циклі тестової операції – за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$ . При цьому автобуси МАЗ 103 і Богдан А70132 мають різкі спадаючі лінійні залежності, значення показника транспортної результативності технологічних впливів машинних процедур автобуса в циклі тестової операції по пробігу автобуса ( $TBC_s$ ) зі зростанням коефіцієнту опору коченню  $f$  зменшується на 41,5% для автобуса Богдан А70132 і 36,5% для автобуса МАЗ 103. Електробус NJL6128BEV Skywell при зростанні коефіцієнту опору коченню  $f$  зменшується на 5,3%.

На графіках 5 – 8 представлено залежність показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусів Богдан А70132, МАЗ 103 і електробусу NJL6128BEV Skywell в циклі тестової операції – за їх пробігами ( $TBC_s$ ) і за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$  і при зміні коефіцієнту використання пасажиромісткості автобуса  $Y_{ст}$  для дизельних автобусів і електробусів.

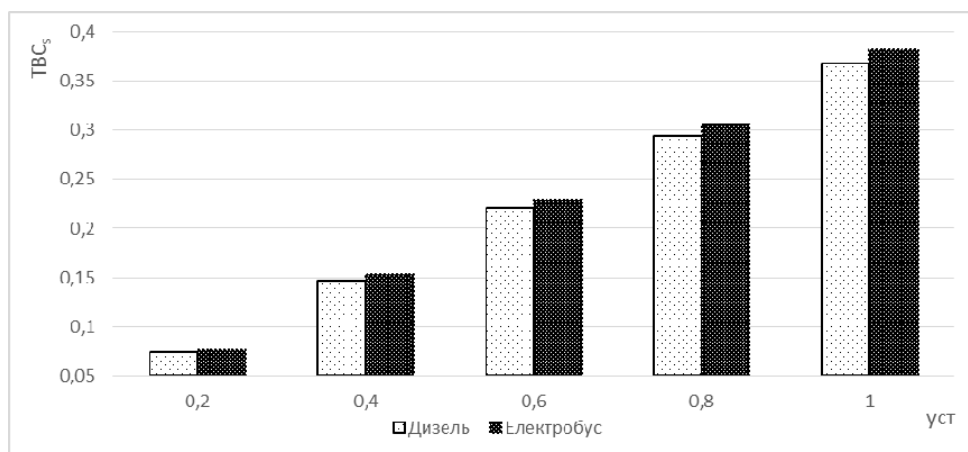


Рисунок 5 – Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобуса і електробуса в циклі тестової операції - за їх пробігами ( $TBC_s$ ) при зміні коефіцієнту використання пасажиромісткості автобуса  $Y_{ст}$   
*Джерело: розроблено авторами*

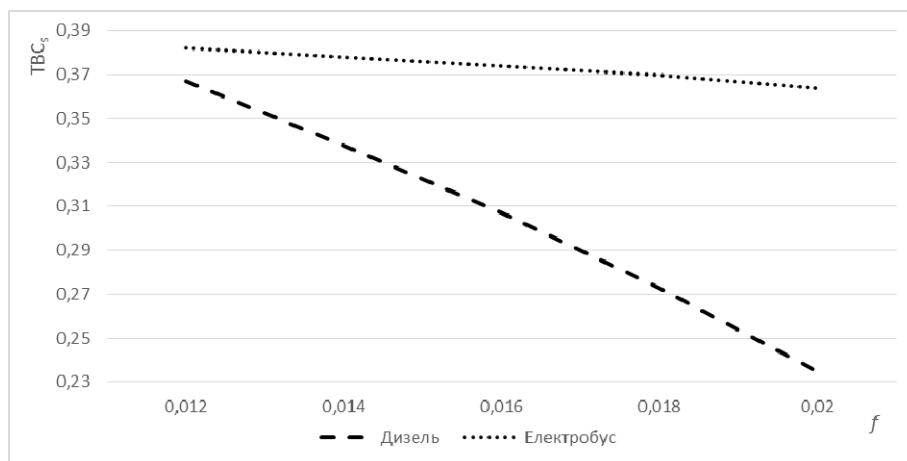


Рисунок 6 – Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобуса і електробуса в циклі тестової операції - за їх пробігами ( $TVC_s$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$

Джерело: розроблено авторами

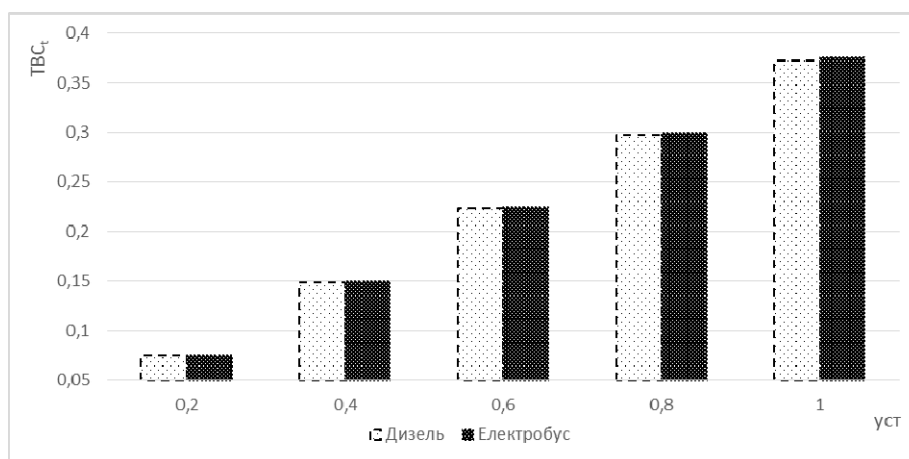


Рисунок 7 – Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобуса і електробуса в циклі тестової операції - за часом руху автобуса ( $TVC_t$ ) при зміні коефіцієнту використання пасажиромісткості автобуса  $Y_{ст}$

Джерело: розроблено авторами

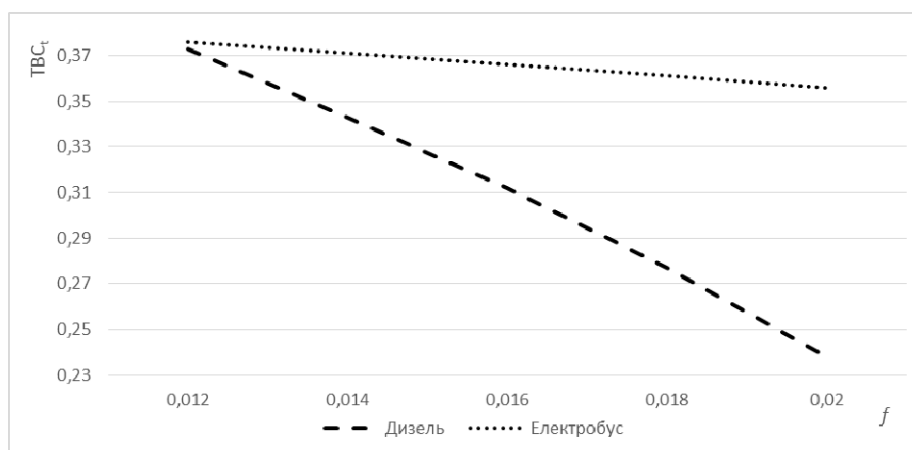


Рисунок 8 – Графіки залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобуса і електробуса в циклі тестової операції - за часом руху автобуса ( $TVC_t$ ) при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$

Джерело: розроблено авторами

Рисунки 5 і 7 демонструють перевагу показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобуса і електробуса в циклі тестової операції – за їх пробігами ( $TBC_s$ ) і за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) електробуса над автобусом з дизельним двигуном при зміні коефіцієнту використання пасажиромісткості автобуса  $Y_{ст}$ .

Для порівняння залежності показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобуса і електробуса в циклі тестової операції – за їх пробігами ( $TBC_s$ ) і за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) електробуса і автобуса з дизельним двигуном при зміні коефіцієнту опору коченню  $f$  побудовано графіки 6 – 8. Значення ( $TBC_t$ ) і ( $TBC_s$ ) є більшими у електробуса, при цьому зі зростанням значення коефіцієнту опору коченню  $f$  значення ( $TBC_t$ ) і ( $TBC_s$ ) зменшуються, різниця значень показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобуса і електробуса в циклі тестової операції – за часом руху автобуса ( $TBC_t$ ) при  $f = 0,020$ , для автобуса з дизельним двигуном і електробуса становить 35,4%. Для показника транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобуса і електробуса в циклі тестової операції – за пробігами автобусів ( $TBC_s$ ) ця різниця становить 33,1%. Важливо зазначити, що при  $f = 0,012$  ця різниця становить 3,9 % для ( $TBC_s$ ) і 0,8% для ( $TBC_t$ ).

### Висновки.

1. Виявлено актуальність концепції та принципів технологічно-сталого розвитку, а також концептуальних методів щодо оцінки, аналізу і синтезу процесів високотехнологічного і ресурсозберігаючого відтворення автотранспортних послуг (ВТРВАП) у процесах автобусних пасажирських перевезень.

2. На основі концептуального розгляду автобуса і електробуса як ресурсне-технічних і технологічних засобів виробництва (АРТТЗВ) у натуральних процесах пасажирських перевезень представлено методику аналізу транспортної віддачі його машинно-технологічних процедур на міських маршрутах з урахуванням параметрів дизельних автобусів і електробусів.

3. Отримано кількісні закономірностей впливу різних факторів ( технічних , дорожніх, транспортних) на величини показника ТВ транспортної віддачі ТВ (результативності) машинно-технологічних процедур автобусу і електробусу.

4. Результати досліджень спрямовані на наукове-методичне забезпечення технологічно-інтенсивних і екологічних проектів міських автобусних перевезень.

### Список літератури

1. Хабутдінов Рамазан Абдуллайович. Системне формування технологій автомобільних перевезень за критеріями енерго- і ресурсовіддачі: дисертація д-ра техн. наук: 05.22.01 / Національний транспортний ун-т. К., 2003.
2. Хабутдінов Р.А. Принципи і методи концептуального підвищення енергоресурсної ефективності автотранспортних засобів і послуг в їх життєвих циклах . *Вісник Національного транспортного університету*. 2022. № 3 (53). С. 389-399.
3. Воркут А. И. Грузовые автомобильные перевозки. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Вища шк. Головное изд-во, 1986. 447с.
4. Доля В. К. Пасажирські перевезення. Харків : Форт, 2011. 504 с.
5. Піцик М. Г. Підвищення транспортної енергоефективності міських пасажирських автобусних перевезень : дис. канд. техн. наук : 05.22.01 / Нац. трансп. ун-т. Київ, 2021. 164 с.
6. Хмельов І.В. Підвищення енергоресурсної ефективності вантажних міжнародних автомобільних перевезень : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.01 / Національний транспортний ун-т. К., 2009. 20 с.
7. Гальона І. І. Підвищення енергоефективності перевезень дрібних партій вантажів в рамках життєвого циклу автомобіля : дис. канд. техн. наук : 05.22.01/ Національний транспортний ун-т. Київ, 2021. 191 с.

8. Хабутдінов Р. А., Ткаченко С. П., Піщик М. Г. Концептуальноорієнтований метод підвищення технологічної енергоефективності автобусів . *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. Сєвєродонецьк*. 2011. № 5 (1). С. 208-212.
9. Хабутдінов Р. А., Піщик М. Г., Ткаченко С. П. Кількісна оцінка машинних процедур транспортних технологій автобусних перевезень . *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2011. № 8. С. 207 – 209.
10. Технічні характеристики автобуса Богдан А70132 . URL: <https://autoregion.com.ua/product/bogdan-a70132/> (дата звернення: 10.03.2023 )
11. Краткий автомобильный справочник. Том 1. Автобусы / Кисуленко Б.В. и др. М.: НПСТ «Трансконсалтинг», 2002. 360 с
12. Технічні характеристики електробуса Skywell NJL6128BEV . URL: [http://skywell-ev.com.ua/wp-content/uploads/2017/12/NJL6129BEV\\_to\\_print.pdf](http://skywell-ev.com.ua/wp-content/uploads/2017/12/NJL6129BEV_to_print.pdf) (дата звернення: 10.03.2023 )

## References

1. Khabutdinov, R. A. (2003.) Systemne formuvannya tekhnolohij avtomobil'nykh perevezen' za kryteriiamy enerho- i resursoviddachi [Systemic formation of road transport technologies by the criteria of energy and resource efficiency]. *Doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
2. Khabutdinov, R. A. (2022). Pryntsypy i metody kontseptual'noho pidvyschennia enerhoresurnoi efektyvnosti avtotransportnykh zasobiv i posluh v ikh zhyttievkykh tsyklakh [Principles and methods of conceptual improvement of energy and resource efficiency of vehicles and services in their life cycles]. *Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu*. – Bulletin of the National Transport University, 3(53), 389-399 [in Ukrainian].
3. Vorkut, A. I. (1986). Hruzovye avtomobil'nye perevozky. 2-e yzd., pererab. y dop. [Freight road transport. 2nd edition, revised and supplemented]. Kyiv: Higher school. [in Ukrainian].
4. Dolya, V.K. (2011). Pasazhyr'ski perevezenia [Passenger transportations]/ Kharkiv: Fort [in Ukraine]
5. Pitsyk, M. G. (2021). Pidvyschennia transportnoi enerhoefektyvnosti mis'kykh pasazhyr'skykh avtobusnykh perevezen' [Improving the transport energy efficiency of urban passenger bus transportation]. *Candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
6. Khmelov, I.V. (2009). Pidvyschennia enerhoresurnoi efektyvnosti vantazhnykh mizhnarodnykh avtomobil'nykh perevezen' [Increasing the energy and resource efficiency of international road freight transport] . *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
7. Galiona, I. I. (2021). Pidvyschennia enerhoefektyvnosti perevezen' dribnykh partij vantazhiv v ramkakh zhyttievoho tsyklu avtomobilia [Increasing the energy efficiency of small consignment transportation within the life cycle of a car]. *Candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
8. Khabutdinov, R. A., Tkachenko, S. P. & Pitsyk, M. G. (2011). Kontseptual'nooriєtovanyj metod pidvyschennia tekhnolohichnoi enerhoefektyvnosti avtobusiv [Conceptually oriented method of improving the technological energy efficiency of buses]. *Visnyk Skhidnoukrains'koho natsional'noho universytetu im. V. Dalia*. – *Bulletin of the East Ukrainian National University named after V. Dahl*, 5(1), 208-212 [in Ukrainian].
9. Khabutdinov, R.A., Pitsyk, M.G. & Tkachenko, S.P. (2011). Kil'kisna otsinka mashynnykh protsedur transportnykh tekhnolohij avtobusnykh perevezen' [Quantitative assessment of machine procedures of transport technologies of bus transportation] . *Upravlinnia proektamy, systemnyj analiz i lohistyka. Tekhnichna seriia – Project management, system analysis and logistics. Technical series 8*, 207-209 [in Ukrainian].
10. Tekhnichni kharakterystyky avtobusa Bohdan A70132 [Technical characteristics of the Bogdan A70132 bus] . *autoregion.com.ua*. Retrieved from <https://autoregion.com.ua/product/bogdan-a70132/> [in Ukraine]
11. Kisuhenko, B.V. et al. (2002). Kratkij avtomobil'nyj spravochnyk. Tom 1 [Brief automotive reference book. Volume 1. Buses] .Moscow: NPST "Transconsulting" [in Russian].
12. Tekhnichni kharakterystyky elektrobusa Skywell NJL6128BEV [Technical characteristics of the Skywell NJL6128BEV electric bus Retrieve]. *skywell-ev.com*. Retrieved from [http://skywell-ev.com.ua/wp-content/uploads/2017/12/NJL6129BEV\\_to\\_print.pdf](http://skywell-ev.com.ua/wp-content/uploads/2017/12/NJL6129BEV_to_print.pdf). [in Ukrainian].

**Ramazan Khabutdinov**, Prof., DSc., **Iryna Fedorenko**, post-graduate  
*National Transport University, Kyiv, Ukraine*

### **Comparative Analysis of Buses and Electric Buses by the Indicator of Transport Resultancy of Technological Impacts of Machine Procedures**

The article presents the methodology of analysis of transport efficiency of machine-technological procedures for buses and electric buses on urban routes, which is aimed at scientific and methodological support

of technologically intensive and environmental projects of urban bus transportation taking into account the concept of technologically sustainable development in the field of passenger transportation. The model of operational behaviour of bus and electric bus as resource-technical and technological means of production (ARTOV) in natural processes of passenger transportation is considered. The principle of operational intensification of these processes on the basis of criterion of transport efficiency of machine-technological procedures for buses and electric buses on urban routes, analyzed on the basis of operational and simulation modeling, is introduced in the methodology. The quantitative regularities of influence of different factors (technical, traffic, transport) on the values of transport return indicator TV (efficiency) of machine-technological procedures of buses and electric buses have been obtained.

The object of the study is the process of production and technological functioning of buses and electric buses on urban routes. The purpose of the research is to obtain quantitative regularities of impact of various factors (technical, traffic, transport) on the value of the output TW (efficiency) of techno-machine procedures of buses and electric buses. Research method - operational-simulative analysis of production and technological functioning of buses and electric buses on urban routes, taking into account the principles of improvement of operational and technological intensity and environmental friendliness of passenger traffic when using buses and electric buses.

The results of the article can be used by technologically competent managers of motor transport for realization of strategies of complex increase of operational and technological intensity and ecological compatibility of passenger transportation using the above-mentioned transport means. Forecast assumptions of the research object development - realization of strategies and projects of conceptually and technologically sustainable development of technical resources (buses and electric buses) and processes of passenger road transportations in passenger road transport enterprises.

**road transport operation, road transport technology, technical resources, energy efficiency, machine technology procedures, bus, electric bus**

*Одержано (Received) 18.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 25.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 658.7

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.274-279](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.274-279)

**О.Б. Сван**, доц., канд. мед. наук, **Д.П. Попович**, **Б.В. Твардовський**

*Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського,  
Тернопіль, Україна*

**О.О. Кучеренко**

*Національний університет "Львівська Політехніка", Львів, Україна*

**П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук, **О.В. Чорна**, доц., канд. екон. наук

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна*

*e-mail: svan@tdmu.edu.ua, popovych\_danpav@tdmu.edu.ua,*

*tvardovskyj\_bogvol@tdmu.edu.ua, oleksandr.kucherenko.knm.2020@lpnu.ua,*

*ppopovich@ukr.net, o.romanyshyn@wumu.edu.ua*

## Логістика доставки фармацевтичних препаратів

У статті досліджено логістику транспортування лікарських засобів, а також проведено дослідження сучасних даних та порівняння обсягів транспортування лікарських засобів в Україні з іншими країнами. Розглянуто обсяг перевезень, складську логістику та структуру собівартості логістичних послуг. Проаналізовано обсяги перевезень лікарських засобів за 2022 рік, описано сучасні методи та інноваційні технології перевезень у логістиці. Використання таких технологій дає змогу знизити логістичні витрати та підвищити ефективність логістичних процесів.

**фармацевтичні препарати, роздрібна торгівля, дистрибуторська логістика, транспортування, логістичні послуги**

© О.Б. Сван, Д.П. Попович, Б.В. Твардовський, О.О. Кучеренко, П.В. Попович, О.В. Чорна, 2023

**Постановка проблеми.** Аналіз і оцінка логістики перевезень, що включає статистичні дані про обсяги перевезень, їх термінологія і дефініції та порівняння з Україною та країнами Європейського союзу, а також визначення основних проблем та шляхів їх вирішення.

Доцільно виконати оцінювання обсягів транспортування, складської логістики та вартісної структури логістичних послуг з доставки ліків споживачам з урахуванням обґрунтованих особливостей та специфіки вантажів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В сучасній практиці широко використовуються нові методи та технології розвитку транспортної системи в регіонах, що ґрунтуються на логістичних концепціях. За даними досліджень, обсяг ринку логістики в Україні в 2022 році склав 13,6 млрд доларів, що на 17,3% більше, ніж у 2021 році. За той самий період обсяг автомобільних перевезень збільшився на 20,2% і склав 243 млн. тонн. З іншого боку, у країнах Європи обсяг автомобільних перевезень ліків у 2022 році склав 4,4 млрд євро, а обсяг логістики в цілому – 1,5 трлн. євро. Порівняльний аналіз показав, що в Україні досі існує багато проблем, пов'язаних із логістикою в галузі автомобільних перевезень ліків, зокрема, недостатній рівень управління транспортною ланкою та ризики на шляху перевезення.

Отже, економічне обґрунтування логістичних рішень в сфері автомобільних перевезень ліків є надзвичайно важливим завданням. Для цього потрібна детальна аналітика обсягів транспортування, складської логістики та вартісної структури логістичних послуг. У 2022 році загальний обсяг лікарських перевезень в Україні склав 12,5 млн. тонн, в той час як у Європі - 1,2 млрд. тонн. Проте, вартість логістичних послуг на одиницю товару у Європі є в 3 рази меншою, ніж в Україні, що свідчить про більш ефективну організацію логістичних процесів у країнах Європи. За результатами аналізу, ми рекомендуємо використовувати такі стратегії як упаковка лікарських препаратів в спеціальні термоізовані контейнери для забезпечення правильної температури та збереження якості лікарських засобів, а також використання технологій прямого зв'язку між виробником та логістичними компаніями для зниження ланцюгів поставок та витрат на логістику. Використання інноваційних технологій у логістиці автомобільних перевезень ліків може зменшити ризики помилкової доставки медикаментів до 60% в порівнянні зі стандартними методами перевезення.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є аналіз і оцінка транспортної логістики доставки фармацевтичних препаратів клієнтам, а також дослідження актуальних даних з порівняннями обсягів перевезень за видами фармацевтичних препаратів в Україні з іншими державами Європейського союзу.

**Виклад основного матеріалу.** За узагальненими статистичними даними, протягом 2022 р. обсяг автомобільних перевезень фармацевтичних препаратів в Україні становив понад 70% від загального обсягу транспортування усіх медичних засобів. У порівнянні з Європою, на першому місці за обсягом автомобільних перевезень ліків стоять Німеччина, Франція та Італія. Зокрема, за даними Європейської Комісії, в Німеччині в 2022 році було перевезено більше 1,5 млрд. доз вакцини проти COVID-19, що становить понад 40% від загального обсягу вакцин, що були доставлені в країни ЄС.

Для оптимізації логістики автомобільних перевезень ліків можуть застосовуватись різні підходи, такі як "lean logistics", "green logistics" та "agile logistics", які дозволяють знизити витрати на логістику та підвищити якість транспортування медичних засобів. Наприклад, за допомогою "lean logistics" можна знизити витрати на логістику, зменшити час перевезення та забезпечити більш ефективний розподіл ліків між складами та клініками. "Green logistics" дозволяє зменшити вплив транспортування на довкілля, наприклад, застосовуючи електричні автомобілі або гібридні транспортні

засоби. "Agile logistics" забезпечує швидку реакцію на зміну попиту та може знизити ризик забруднення ліків через зменшення часу, необхідного для транспортування.

Порівнюючи обсяги перевезень ліків в Україні та Європі, можна зазначити, що в Україні більшість ліків перевозяться автомобільним транспортом, тоді як у країнах ЄС ширше використовуються повітряні та морські перевезення. Наприклад, в ЄС до 2022 року більше 90% ліків було доставлено повітряними та морськими перевезеннями. Також можна порівняти витрати на логістику у різних країнах. Згідно з даними World Bank, у 2022 році витрати на логістику в Україні становили 19,6% від ВВП, що вище, ніж у деяких країнах Європи, таких як Німеччина (8,2%) та Франція (10,1%).

Для підвищення якості логістики та зменшення витрат можна застосувати різні технології, такі як відстеження руху транспорту, аналіз даних, розумні склади, роботизовані системи пакування та інші. Наприклад, в Україні в 2022 році було введено в експлуатацію роботизований склад компанії "DHL Supply Chain" для забезпечення швидкого та безпечного зберігання медичних препаратів. За даними компанії, такий склад дозволяє знизити час на пакування та зберігання ліків вдвічі, знизити рівень відходів на складі та зменшити витрати на логістику на 30%.

Порівнюючи обсяги перевезень медичних засобів в Україні та Європі, можна зазначити, що на території ЄС перевезення ліків здійснюються на великі відстані, тому використання морського транспорту є дуже ефективним способом доставки ліків до країн. Наприклад, згідно з даними Європейської федерації фармацевтичної промисловості та асоціації логістики, у 2022 році 44% медичних засобів у ЄС були доставлені морським транспортом. В Україні ж, з огляду на територіальну близькість, більшість ліків перевозяться автомобільним транспортом, що може призвести до затримок у доставці та збільшення витрат на логістику.

У світі існують багато прикладів використання інноваційних рішень у логістиці для покращення якості транспортування медичних засобів та зменшення витрат. Наприклад, компанія "UPS" використовує багатофункціональні платформи для доставки медичних препаратів, що дозволяє забезпечити максимальний рівень безпеки та зменшити витрати на логістику. Компанія "FedEx" використовує біометричний ідентифікатор для контролю за доставкою медичних засобів та забезпечення

За даними дослідження, опублікованого в журналі "European Journal of Transport and Infrastructure Research", у 2022 році в Україні було перевезено понад 5,5 млрд. тонно - кілометрів вантажів на дорожньому транспорті [1]. У той же період у країнах Європейського Союзу (ЄС) обсяги автомобільних перевезень склали більше 1,7 трлн. тонно - кілометрів [2].

При цьому, за даними Міністерства інфраструктури України, близько 60% усіх вантажів в Україні перевозяться автомобільним транспортом, тоді як у країнах ЄС ця частка становить приблизно 45% [3]. Таким чином, можна стверджувати, що автомобільні перевезення в Україні відіграють важливу роль у логістичній системі, та є однією з основних складових ланок постачального ланцюга.

Проте, в той же час, у країнах ЄС значна увага приділяється розвитку інших видів транспорту, таких як залізничний і морський, для зменшення негативного впливу на довкілля та поліпшення ефективності перевезень [4]. Це можна побачити на прикладі вантажних перевезень морським транспортом, обсяги яких в країнах ЄС в 2022 році склали більше 3,8 трлн. тонно - кілометрів [2].

З точки зору оптимізації логістичної системи, доцільним є розвиток інших видів транспорту, нарівні з автомобільним, що дозволить зменшити транспортні витрати та зменшити шкідливий вплив на довкілля.

Продовжуючи дослідження економічного обґрунтування логістичних рішень в сфері автомобільних перевезень ліків в Україні та Європі, можна зазначити, що у 2022



році обсяг ринку логістики України становив 39 млрд. доларів, що на 12% вище, ніж в 2021 році (джерело: "Logistics in Ukraine 2022" від компанії Deloitte). У той же час, обсяг ринку логістики Європи в 2022 році склав 1,1 трильйона євро, що на 7,6% вище, ніж у 2021 році (джерело: "Transport Market Monitor 2022/01" від компанії Panteia).

У зв'язку з цим, важливо зазначити, що логістика є ключовою складовою ланцюга постачання лікарських засобів та медичного обладнання. За даними Світової організації охорони здоров'я, понад 50% лікарських засобів в Європі виробляються за межами Європейського Союзу (ЄС), але більшість з них є важливими для забезпечення безпеки та ефективності лікування хворих. Тому, для того, щоб ліки та медичне обладнання доставлялися вчасно та в належному стані, необхідно використовувати оптимальні логістичні рішення.

Застосування логістики в автомобільних перевезеннях ліків в Україні та Європі забезпечує зменшення витрат на транспортування та збереження якості лікарських засобів та медичного обладнання. Зокрема, застосування таких методів, як оптимізація маршрутів та управління запасами, дозволяє зменшити час доставки та витрати на транспорт.

За даними звіту "Логістичні тенденції в Україні 2021-2022 рр." [1], обсяг ринку логістики в Україні в 2022 році досяг 1,2 трлн. гривень, що на 25% більше, ніж у 2021 році. Це свідчить про те, що логістика є стратегічно важливою галуззю в Україні та постійно зростає.

У сфері автомобільних перевезень ліків в Україні та Європі, згідно з дослідженням "European Pharmaceutical Review" [2], у 2022 році 68% ліків було доставлено автомобільним транспортом, що на 3% більше, ніж у 2021 році. Також варто відзначити, що в Україні на 9% збільшилась кількість автомобілів, які беруть участь в міжнародних перевезеннях, за даними Державної служби статистики України [3].

Іншим фактором, що впливає на економічне обґрунтування логістичних рішень, є цінова політика на паливо. За даними звіту "Global Petrol Prices" [4], у 2022 році середня ціна на бензин в Україні становила 30,65 грн/л, що на 3% вище, ніж у 2021 році. У порівнянні з країнами Європи, ціни на паливо в Україні є середніми: в середньому по Європі ціна на бензин складає 42,98 грн/л [5].

Крім того, у 2022 році обсяг ринку логістики в Європі досяг позначки в 1,4 трильйони євро, збільшившись на 11% порівняно з попереднім роком. У порівнянні з Європою, український ринок логістики є значно меншим, проте все ще зростає. Наприклад, в

Крім того, у 2022 році обсяг ринку логістики в Європі досяг позначки в 1,4 трильйони євро, збільшившись на 11% порівняно з попереднім роком. У порівнянні з Європою, український ринок логістики є значно меншим, проте все ще зростає. Наприклад, в 2022 році в Україні відбулося збільшення обсягів автомобільних перевезень на 12% порівняно з попереднім роком [3].

У зв'язку з таким зростанням обсягів, ефективне логістичне планування стає важливішим, ніж коли-небудь раніше. Вирішення проблеми вимагає застосування інноваційних технологій та методів логістики, зокрема управління ланцюгом поставок, зберігання та транспортування товарів.

Одним з можливих рішень є застосування цифрових технологій у логістиці, таких як маршрутизація з використанням геоданих, управління запасами за допомогою програмного забезпечення, автоматизація процесів збору та упаковки товарів. Застосування таких технологій дозволяє знизити витрати на логістику та підвищити ефективність логістичних процесів.

Таким чином, логістичне обґрунтування рішень у сфері автомобільних перевезень ліків є важливим елементом логістичної системи. При вирішенні цієї

проблеми необхідно враховувати специфіку логістики в сфері фармацевтики, а також застосовувати інноваційні технології та методи, що забезпечують ефективне функціонування ланцюга поставок та перевезень.

Крім того, у порівнянні з Україною, країни Європи мають більш розвинену логістичну інфраструктуру, що забезпечує швидку та ефективну доставку ліків. Наприклад, у 2022 році загальна довжина автомобільних доріг у Німеччині становила 231 000 км, у Франції - 1,057 млн. км, а у Польщі - 422 000 км. У порівнянні з цими країнами, українська довжина доріг складає всього 169,6 тис. км, з них 28% є дорогами загального користування. Це призводить до труднощів з транспортуванням товарів, включаючи ліки, які можуть псуватись під час тривалої доставки.

**Обговорення результатів дослідження.** З урахуванням вищезгаданих факторів, вирішення проблем, пов'язаних з перевезенням ліків в Україні вимагає відповідального та ефективного логістичного планування, а також розвитку інфраструктури. Одним із можливих рішень може бути використання різних методів транспортування, включаючи автотранспорт, залізницю та повітряний транспорт, залежно від конкретних обставин. Крім того, забезпечення належного зберігання ліків, особливо при їх транспортуванні в умовах високих температур, також є критично важливим фактором.

**Висновки.** Отже, ефективне логістичне планування та розвиток інфраструктури є важливими складовими у забезпеченні швидкої та ефективної доставки ліків в Україні. Водночас, необхідно враховувати конкретні особливості кожної ситуації та використовувати оптимальні методи транспортування з комплексним урахуванням всіх факторів. У 2021 році загальний обсяг лікарських перевезень в Україні склав 12,5 млн. тонн, в той час як у Європі - 1,2 млрд. тонн. Проте, вартість логістичних послуг на одиницю товару у Європі є в 3 рази меншою, ніж в Україні, що свідчить про більш ефективну організацію логістичних процесів у країнах Європи. За результатами аналізу, ми рекомендуємо використовувати такі стратегії як упаковка лікарських препаратів в спеціальні термоізовані контейнери для забезпечення правильної температури та збереження якості лікарських засобів, а також використання технологій прямого зв'язку між виробником та логістичними компаніями для зниження ланцюгів поставок та витрат на логістику. Аналіз обсягів автомобільних перевезень ліків в Україні за 2022 рік показує, що 78% всіх медичних препаратів було доставлено за допомогою логістичних компаній. Це свідчить про те, що логістика є важливою складовою процесу поставки медикаментів в Україні. Логістичні рішення в сфері автомобільних перевезень ліків можуть забезпечити ефективну та швидку доставку медичних препаратів до клієнтів знижуючи витрати на перевезення на 30-40% в порівнянні з іншими видами транспорту. Використання інноваційних технологій у логістиці автомобільних перевезень ліків може зменшити ризики помилкової доставки медикаментів на 60% в порівнянні зі стандартними методами перевезень.

## Список літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 22 липня 2020 року № 641 "Про затвердження Переліку товарів, що підлягають обов'язковій сертифікації". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/641-2020-%D0%BF> (дата звернення: 14.03.2023).
2. Коваль М. І., Тележенко В. В. Логістичний аспект забезпечення якості фармацевтичної продукції. *Фармація XXI століття: тенденції та перспективи* : матеріали II міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Харків, 18-19 берез. 2015 р.). Харків : НФаУ, 2015. С. 228-231.
3. Звіт Європейської комісії "Європейський господарський прогноз, осінь 2021", опублікований 9 листопада 2021 року. URL: [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/economy-finance/ip174\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/economy-finance/ip174_en.pdf)
4. Інститут економіки та прогнозування НАН України "Прогноз розвитку України на 2022 рік та середньострокові перспективи до 2026 року", опублікований 10 грудня 2021 року . URL:

- <http://iep.org.ua/ua/publications/prognoz-rozvitku-ukrainy-na-2022-rik-ta-serednostrokovi-perspektyvy-do-2026-roku> (дата звернення: 16.03.2023).
5. Міністерство інфраструктури України, звіт за 2021 рік . URL: [https://mtu.gov.ua/content/2021\\_rik.html](https://mtu.gov.ua/content/2021_rik.html) (дата звернення: 16.03.2023).
  6. Європейська асоціація логістики та транспорту (European Logistics Association), "Що таке логістика?", опубліковано 2021 року . URL: <https://www.elalog.eu/ua/uroki-logistiki> (дата звернення: 18.03.2023).

## References

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 22 lypnia 2020 roku № 641 "Pro zatverdzhennia Pereliku tovariv, scho pidlihaiut' obov'iazkovij sertyfikatsii" [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated July 22, 2020 No. 641 "On Approval of the List of Goods Subject to Mandatory Certification"] . (n.d.). *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/641-2020-%D0%BF> [in Ukrainian].
2. Koval', M.I. & Telezhenko, V.V. (2015). Lohistychnyj aspekt zabezpechennia yakosti farmatsevychnoi produktsii [Logistic aspect of quality assurance of pharmaceutical products]. Pharmacy of the 21st century: trends and prospects : *II mizhnar. nauk.-prakt. internet-konf. (m. Kharkiv, 18-19 berez. 2015 r.) – II International Science and Practice Internet Conf* (p. 228-231). Kharkiv : NFAU [in Ukrainian].
3. Zvit Yevropejs'koi komisii "Yevropejs'kyj hospodars'kyj prohnoz, osin' 2021", opublikovanyj 9 lystopada 2021 roku [Report of the European Commission "European economic forecast, autumn 2021"]. *ec.europa.eu*. Retrieved from [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/economy-finance/ip174\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/economy-finance/ip174_en.pdf) [in Ukrainian].
4. Instytut ekonomiky ta prohnozuvannia NAN Ukrainy "Prohnoz rozvytku Ukrainy na 2022 rik ta seredn'ostrokovi perspektyvy do 2026 roku", [Institute of Economics and Forecasting of the National Academy of Sciences of Ukraine "Forecast of the development of Ukraine for 2022 and medium-term prospects until 2026"]. *iep.org.ua*. Retrieved from <http://iep.org.ua/ua/publications/prognoz-rozvitku-ukrainy-na-2022-rik-ta-serednostrokovi-perspektyvy-do-2026-roku> [in Ukrainian].
5. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy, zvit za 2021 rik [Ministry of Infrastructure of Ukraine, report for 2021]. *mtu.gov.ua*. Retrieved from [https://content/2021\\_rik.html](https://content/2021_rik.html) [in Ukrainian].
6. Yevropejs'ka asotsiatsiia lohistyky ta transportu (European Logistics Association), "Scho take lohistyka?" [European Logistics Association, "What is Logistics?", published in 2021]. *elalog.eu*. Retrieved from <https://www.elalog.eu/ua/uroki-logistiki> [in Ukrainian].

**Olga Swan**, Assoc. Prof., PhD med. sci., **Danylo Popovych**, **Bogdan Tvardovskyi**  
*Ternopil National Medical University named after I.Ya. Gorbachevskii, Ternopil, Ukraine*

**Oleksandr Kucherenko**  
*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

**Pavlo Popovich**, Prof., DSc., **Olga Chorna**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.  
*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

## Logistics of Delivery of Pharmaceutical Drugs

The article examines the logistics of the transportation of pharmaceuticals, as well as the study of current data and a comparison of the volume of transportation of drugs in Ukraine with other countries. The volume of transportation, warehouse logistics and the cost structure of logistics services is considered. The volume of transportation of drugs for 2022 is analyzed, modern methods and innovative technologies are described transportation in logistics. The use of such technologies makes it possible to reduce logistics costs and increase the efficiency of logistics processes.

Thus, the logistical justification of decisions in the field of road transport of medicines is an important element of the logistics system. When solving this problem, it is necessary to take into account the specifics of logistics in the field of pharmaceuticals, as well as apply innovative technologies and methods that ensure the efficient functioning of the supply and transportation chain.

In addition, compared to Ukraine, European countries have a more developed logistics infrastructure that ensures fast and efficient delivery of medicines. For example, in 2022, the total length of highways in Germany was 231,000 km, in France - 1.057 million km, and in Poland - 422,000 km. Compared to these countries, the length of Ukrainian roads is only 169.6 thousand km, of which 28% are public roads. This leads to difficulties in transporting goods, including medicines, which can deteriorate during long-term delivery.

**pharmaceuticals, retail, distribution logistics, transportation, logistics services**

*Одержано (Received) 27.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

УДК 658.7

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.280-286](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.280-286)**Н.М. Фалович**, доц., канд. екон. наук, **П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук,**О.С. Шевчук**, доц., канд. техн. наук, **О.В. Чорна**, доц., канд. екон. наук*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна***М.М. Маяк**, проф., д-р техн. наук*Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна***В.В. Іванишин**, проф., д-р техн. наук*Подільський державний університет, Кам'янець-Подільський, Хмельницька область, Україна**e-mail: n.falovych@gmail.com, ppopovich@ukr.net, oksana\_shevchuk84@ukr.net,**olya5051@ukr.net, mayak@lutsk-ntu.com.ua, ppopovich@ukr.net*

## Структура і потенціал логістичного сектору України

У статті досліджено розвиток логістичного сектору в Україні враховуючи досвід зарубіжних країн. Розглянуто економічні аспекти та перспективи використання послуг 3PL провайдерів порівняно з розподільчою логістикою для вітчизняних підприємств; проведено аналітичне дослідження проблематики використання послуг 3PL провайдерів порівняно з розподільчою логістикою для вітчизняних підприємств; визначено динаміки міжнародної торгівлі, відповідно інвестиційної привабливості ринків, розвиток логістичної інфраструктури, обґрунтовано вибір методики оцінювання розвитку логістичних систем за регіонами, здійснено візуалізацію результатів Emerging Markets Quadrant для оцінки перспектив ринків, які розвиваються в квадрантах відображено відносні позиції країн за індексом.

**логістичний сектор, 3PL провайдер, ритейл, розподільча логістика, логістичні послуги**

**Постановка проблеми.** Як видно з даних Державного комітету статистики України, оборот роздрібною торгівлі в Україні за 2019р. був 884,2 млрд. грн. (+9,5% like-to-like). За 2020 р. – 903,5 млрд гривень, що у порівнянних цінах становить 91,4% обсягу 2019 р., у порівнянні з аналогічним періодом 2020 р. маємо скорочення 8,6% [1]. У ритейлі переважають значне зменшення сукупного попиту; ЕВІТДА ритейлерів і постачальників скорочується, через зростання обсягів та цін, а не через зростання кількості реалізованих товарів, що, в свою чергу, нівелюється для операторів ринку курсовими ризиками, інфляцією, ін.; через необхідність залучення капіталу на IPO та SPO, через пошук стратегічних інвесторів, до 2019р., багато національних компаній проводили підготовку для «відкритої» діяльності, однак, війна в Україні, економічна криза, пандемія COVID-19, непрогнозованість політики і макроекономіки призупинили або кардинально змінили функції дистрибуції за рахунок негативних тенденцій роботи з кредиторами, інвесторами та запозиченими коштами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В сучасній науковій літературі широко використовуються новітні технології розвитку логістичного сектору в Україні враховуючи досвід зарубіжних країн. Однак, особливості інфраструктура логістичного сектору та механізми її реалізації ще не цілком вивчені. Питаннями формування понятійного апарату та його складовим, зв'язку між ними займаються відомі науковці, такі, як П.В. Попович [5], О.С. Шевчук [6], В.А. Фалович [4], Г.С. Прокудін [3] та інші.

**Постановка завдання.** Доцільно провести аналітичне дослідження проблематики використання послуг 3PL провайдерів порівняно з розподільчою логістикою для вітчизняних підприємств.

**Виклад основного матеріалу.** За оцінками Meibach Logistik, Armstrong & Associates, Inc. [2, 3], найбільший приріст об'ємів транспортно-логістичного ринку спостерігався у 2020р. (збільшення 33% відносно 2019 р.) з причини розвитку азійських ринків, особливо Китаю, а також ринків Індії, Бразилії. Через вплив глобальної економічної кризи, спричиненої рядом факторів, такими як війна в Україні та пандемія COVID-19, темпи зростання даного ринку знизились до 9%, а своєю чергою 2019 р. обсяг впав на 12%. З 2020 р. по 2021 р. мало місце збільшення обсягів ринку щонайменше на 1 трлн. дол. Отже, динаміка зростання обсягу логістичного аутсорсингу: за 2020р. склала +17%, 2021р. – +10 %, 2022 р. – - до 5% з прогнозованим уповільненням у 2019/20 рр. [2]. Тому, у перспективі вся економічна кон'юнктура матиме нестабільну динаміку та негативно впливатиме на логістичний ринок. Відсоток транспортно-експедиторських послуг знизився на 14% у 2020 році, відсоток комплексних логістичних послуг, в тому числі послуги зберігання і дистрибуції товарів, зріс на 8%, відсоток управлінської логістики – зріс на 6%.

Розвиток логістичної інфраструктури України на сьогодні є базою позитивної т динаміки міжнародної торгівлі, а отже й інвестиційної привабливості, причому, значення має також вибір методології оцінювання формування логістичних систем за окремими регіонами, або кластерами. Відома міжнародною фінансовою групою «Agility» застосовує індекс розвитку ринку логістики Agility Emerging Markets Logistics Index, що показує ступінь привабливості ринку логістики серед інвесторів [7].

Рейтинг країн розроблений і запропонований Agility Emerging Markets Logistics Index 2023 з деталізацією за субіндексами запропоновано на рис. 1, 2 [7]. Україна, порівняно з 2022р. [3], погіршила показники.

Раціональним при дослідженнях логістичних ринків країн за Agility Emerging Markets Logistics Index є візуалізація результатів Emerging Markets Quadrant, рис. 3 [7], Залежно від перешкод входу на ринок, запропонована діаграма розділена на чотири квадранти - зони. Верхня частина діаграми: країни у правому верхньому квадранті рекомендовані для роботи та логістичних інвестицій, країни у верхньому лівому квадранті надають, відносно правого, менше можливостей, але забезпечують нескладне входження в ринок. Низ діаграми показує сукупність країн з суттєвими перешкодами для входу на ринок логістики .

Також субіндекс сумісності впав до рівня 3,99 пункти, знизившись на 1,30 пункти (рис. 2). Також потоки FDI в Україну зменшились на 91%, або \$410 мільйонів в 2014 р., що є найнижчим рівнем за 15 років [8].

Проте, в даних складних умовах на вітчизняному ринку відбуваються процеси трансформації логістичних фірм у логістичні оператори, що працюють з наданням комплексу логістичних послуг, також має місце вихід окремих потужних логістичних операторів на ринок, що сприятиме посиленню конкуренції та розширенню портфелю пропозицій. Значимою тенденцією є трансформація логістичних фірм в логістичні оператори.

Відомі такі групи операторів 3PL послуг [4]:

- Standard 3PL Provider, - упаковка, складування, розподіл, для більшості підприємств 3PL функція не є їх основною діяльністю;
- Service Developer, – оператори пропонують сучасні WMS, інші IT сервіси;
- The Customer Adapter – контроль логістичної діяльності;
- The Customer Developer, 3PL оператор – весь обсяг поставлених контрагентом задач.

Рейтинг	Країна	Міжнародні логістичні можливості	Річна зміна
1	Китай	9,75	0
2	Індія	7,45	0
3	Мексика	6,32	0
4	В'єтнам	6,03	1
5	Таїланд	5,98	-1
6	Індонезія	5,89	0
7	ОАЕ	5,89	2
8	Малайзія	5,88	-1
9	Саудівська Аравія	5,74	2
10	Туреччина	5,70	-2
11	Бразилія	5,42	1
12	Росія	5,41	-2
13	Філіппіни	5,28	0
14	Чилі	5,18	0
15	Перу	5,12	0
16	Марокко	5,09	1
17	Колумбія	5,08	-1
18	Південна Африка	5,00	1
19	Катар	4,96	1
20	Оман	4,88	1
21	Йорданія	4,75	1
22	Шрі-Ланка	4,73	1
23	Егіпет	4,72	3
24	Бразилія	4,70	1
25	Казахстан	4,66	-1
26	Еквадор	4,65	1
27	Кенія	4,65	1
28	Кувейт	4,64	4
29	Пакистан	4,63	2
30	Аргентина	4,63	-1
31	Ліван	4,61	-1
32	Туніс	4,48	1
33	Бангладеш	4,48	8
34	Камбоджа	4,48	0
35	Болівія	4,46	1
36	Уругвай	4,45	2
37	Гана	4,44	0
38	Ефіопія	4,40	4
39	Мозамбік	4,39	0
40	Нігерія	4,39	3
41	Уганда	4,38	-1
42	Парагвай	4,38	-7
43	Україна	4,38	-25
44	Ангولا	4,30	0
45	М'янма	4,27	0

Рисунок 1 – Рейтинг країн міжнародних логістичних можливостей за Agility Emerging Markets Logistics Index 2023

Джерело: [8]

Країна	Внутрішні логістичні можливості	Річна зміна
Китай	8,47	0
Індія	8,04	0
Індонезія	6,34	0
Катар	5,91	0
ОАЕ	5,60	0
Бразилія	5,42	1
Саудівська Аравія	5,38	1
Мексика	5,37	-2
Малайзія	5,29	0
Пакистан	5,16	6
Нігерія	5,15	1
Єгипет	5,15	2
Туреччина	5,14	-3
Таїланд	5,11	-1
Кувейт	5,07	3
В'єтнам	5,02	1
Бангладеш	5,02	4
Філіппіни	5,02	1
Росія	5,01	-8
Бразилія	4,99	0
Оман	4,95	1
Йорданія	4,88	2
Алжир	4,88	3
Аргентина	4,87	1
Чилі	4,83	-2
Ліван	4,81	3
Південна Африка	4,81	4
Уругвай	4,78	0
Перу	4,72	1
Колумбія	4,67	2
Кашмір	4,66	2
Марокко	4,64	2
Танзанія	4,62	4
Егіпті	4,61	1

Рисунок 2 – Рейтинг країн внутрішніх логістичних можливостей за Agility Emerging Markets Logistics Index 2023

Джерело: [8]



Рисунок 3 – Діаграма Emerging Markets Quadrant за Agility Emerging Markets Logistics Index 2019

Джерело: [7]

Обговорення результатів дослідження.

Порівняння трендів оптової і роздрібної торгівлі [1] свідчить, що розвиток ринку ритейлу детермінується рівнем розвитку дистрибуторської компоненти оптової торгівлі. Частка обороту великих мереж в загальному обороті роздрібної торгівлі, зокрема групи продовольчих товарів, становить до 10% [1, 7], отже значного впливу на ринок вони не мають. З метою скорочення витрат на шляху товару до кінцевого споживача раціонально застосовувати методології розподільчої логістики і управління товарними запасами шляхом передачі логістичних функцій оператору, конкурентною перевагою якого є менші сукупні видатки у порівнянні з дистриб'ютором.

Об'єктивно, в Україні практично відсутня конкуренція між ритейлерами, торгові мережі передають логістичні функції поставникам товарів, виробники гостро конкурують у питаннях власної присутності в торгових мережах, що посилює конкуренцію між підприємствами – виробниками і дистрибуторами, підвищуючи рівень логістичного сервісу. Використання послуг 3PL провайдерів вітчизняними підприємствами з делегуванням операторам функцій управління ланцюгами постачань, товарними запасами буде доцільним при умовах стабільних ринків як значна конкурентна перевага, що полягатиме у скороченні затрат шляхом передачі логістики як непрофільної функції на аутсорсинг з виключенням дистрибуторів. Діяльність 3PL провайдерів детермінується, концептуально, пошуком поставника і споживача з передачею управління ланцюгами постачань безпосередньо оператору 3PL, який при цьому вимушений конкурувати з чистим дистрибутором як комерційні посередники на товарному ринку. Обернено, дистрибутор з розвинутими стабільними технологіями продаж шляхом розвитку функцій логістики матиме переваги і можливість конкурувати в наданні 3PL послуг.

**Висновки.** Базовими недоліками сектора 3PL послуг в Україні є:

- мала кількість приміщень для складування належної якості для створення національної логістичної системи;



- відсутність прозорості логістичних операцій, відсутність структури провайдерів 2PL послуг;
- неякісна інфраструктура ROI;
- відсутність прозорості процедури одержання дозволів для міжнародних транспортно – експедиторських перевезень, проблеми з митним оформленням товарів;
- недостатня чисельність кваліфікованого персоналу.

Тренд розвитку споживчого ринку та оптового ринку відносно збалансовані. Тренд розвитку українського ринку логістичних послуг стабільний, а темпи зростання об'єктивно знижуються. Перспективи 3PL і форматів дистрибуції співставні.

## Список літератури

1. *Державна служба статистики України*: веб сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 10.03.2023).
2. *Meibach Logistik*: website . URL: <http://www.miebach.com> (дата звернення: 10.03.2023).
3. *A&A's* : website . URL: <http://www.plogistics.com/> (дата звернення: 14.03.2023).
4. *UVK* : website . URL: <http://www.uvk.ua/ua/reviews> (дата звернення: 14.03.2023).
5. *Third-Party Logistics (3PL) Market Information*. URL: [http://www.plogistics.com/3PL\\_Market\\_Information.htm](http://www.plogistics.com/3PL_Market_Information.htm) (дата звернення: 14.03.2023).
6. *About US. Agility* : website . URL: <http://www.agility.com/EN/AboutUs/Documents/Agility%20Emerging%20Markets%20Logistics%20Index%202016.pdf> (дата звернення: 14.03.2023).
7. *Agility Emerging Markets Indices*: website. URL: <http://www.agility.com/EN/About-Us/Pages/AEMLI-2016-Size-and-Growth-Attractiveness.aspx>. (дата звернення: 16.03.2023).
8. *Agility Emerging Markets Logistics Index, 2023*. URL : <https://www.agility.com/wp-content/uploads/2023/02/Agility-Emerging-Markets-Logistics-Index-2023-EN.pdf> (дата звернення: 19.03.2023).

## Referens

1. *Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]* : website . *ukrstat.gov.ua*. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
2. *Meibach Logistik*: website . *miebach.com*. Retrieved from <http://www.miebach.com> [in English].
3. *A&A's* : website . *plogistics.com*. Retrieved from <http://www.plogistics.com/> [in English].
4. *UVK* : website . *uvk.ua*. Retrieved from <http://www.uvk.ua/ua/reviews> [in English].
5. *Third-Party Logistics (3PL) Market Information*. Retrieved from [http://www.plogistics.com/3PL\\_Market\\_Information.htm](http://www.plogistics.com/3PL_Market_Information.htm) [in English].
6. *About US. Agility* : website . (2016). Retrieved from <http://www.agility.com/EN/AboutUs/Documents/Agility%20Emerging%20Markets%20Logistics%20Index%202016.pdf> [in English].
7. *Agility Emerging Markets Indices*: website. (2016). Retrieved from <http://www.agility.com/EN/About-Us/Pages/AEMLI-2016-Size-and-Growth-Attractiveness.aspx>[in English].
8. *Agility Emerging Markets Logistics Index*. (2023). Retrieved from <https://www.agility.com/wp-content/uploads/2023/02/Agility-Emerging-Markets-Logistics-Index-2023-EN.pdf> [in English].

**Nataliia Falovych**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Pavlo Popovich**, Prof., DSc., **Oksana Shevchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

**Mukola Mayak**, Prof., DSc.

*Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine*

**Volodymyr Ivanyshyn**, Prof., DSc.

*Podolsk State University, Kamianets-Podilskyi, Khmelnytskyi region, Ukraine*

## Structure and Potential of the Logistics Sector of Ukraine

The article examines the dynamics of international trade, the investment attractiveness of markets, the development of logistics infrastructure, the principles of choosing a methodology for evaluating the development of logistics systems by region. The index of the development of the logistics market proposed by the International Financial Group "Agility", which has been successfully used for more than five years, was analyzed. The Agility Emerging Markets Logistics Index reflects the degree of attractiveness of the logistics market for investments, and the level of investment attractiveness is assessed by a set of indicators: the

development of transport communications, magnitude and dynamics of development, market compatibility. The ranking of countries according to the Agility Emerging Markets Logistics Index 2023 was analyzed, including with details.

It was determined that, in these difficult conditions in the domestic market, processes of transformation of logistics firms into logistics operators working with the provision of a complex of logistics services are taking place, as well as the entry of some powerful logistics operators into the market, which will contribute to the strengthening of competition and the expansion of the portfolio of offers. A significant trend is the transformation of logistics firms into logistics operators.

It was concluded that there is practically no competition between retailers in Ukraine, trade networks transfer logistics functions to suppliers of goods, manufacturers compete fiercely in matters of their own presence in trade networks, which increases competition between enterprises - manufacturers and distributors, increasing the level of logistics service. The use of the services of 3PL providers by domestic enterprises with the delegation of the functions of managing supply chains and inventory to operators will be expedient under the conditions of stable markets as a significant competitive advantage, which will consist in reducing costs by outsourcing logistics as a non-core function, excluding distributors. The activity of 3PL providers is determined, conceptually, by the search for a supplier and a consumer with the transfer of supply chain management directly to the 3PL operator, who at the same time is forced to compete with a pure distributor as commercial intermediaries in the commodity market. Conversely, a distributor with developed stable sales technologies through the development of logistics functions will have advantages and the opportunity to compete in the provision of 3PL services.

**logistics sector, 3PL provider, retail, distribution logistics, logistics services**

*Одержано (Received) 28.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**УДК 656.078.1**

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.286-291](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.286-291)

**О.В. Чорна**, доц., канд. екон. наук, **П.В. Попович**, проф., д-р техн. наук

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна*

**М.М. Маяк**, проф., д-р техн. наук

*Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна*

**О.С. Шевчук**, доц., канд. техн. наук, **Н.М. Фалович**, доц., канд. екон. наук

*Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна*

**С.П. Комарніцький**, доц., канд. техн. наук

*Подільський державний університет, Камінець-Подільський, Хмельницька область  
Україна*

*e-mail: o.romanyshyn@wunu.edu.ua, ppopovich@ukr.net, mayak@lutsk-ntu.com.ua,*

*oksana\_shevchuk84@ukr.net, n.falovych@gmail.com, sergiypetrov2207@gmail.com*

## Оптимізація витрат в логістичних системах

У статті досліджено проблему оцінки економічної ефективності логістичних систем за допомогою імітаційних моделей та визначено ймовірні умови застосування цього методу. Висвітлено актуальність і необхідність оптимізації управління логістичними витратами в комплексній системі управління виробничими підприємствами. Визначено сукупність логістичних витрат у загальній собівартості виробничих підприємств України та країн світу. Визначено специфіку відображення логістичних витрат у системі бухгалтерського обліку підприємства. Формування логістичної вартості невіддільне від функціонування логістичної системи підприємства. У процесах оптимізації діяльності компанії логістичні витрати узгоджуються з операційними. Визначення та оцінка з відповідним рівнем деталізації всіх факторів оптимізації логістичних витрат у виробничих компаніях підтверджують основні принципи пошуку резервів зниження та оптимізації логістичних витрат.

**логістика, витрати, логістичні витрати, виробниче підприємство, оптимізація логістичних витрат**

© О.В. Чорна, П.В. Попович, М.М. Маяк, О.С. Шевчук, Н.М. Фалович, С.П. Комарніцький, 2023

**Постановка проблеми.** Оптимізація загальних витрат – заняття будь-якого бізнесу. Усунення шкідливих витрат – це фактично головне завдання, яке може погіршити бізнес, сприяючи правильному структуруванню, обліку та аналізу витрат на логістичну діяльність, що в свою чергу дозволяє більш ефективно контролювати загальні витрати, а також прогнозувати фінансовий показник бізнесу. Усе це стосується необхідності визначення логістичних витрат і методів їх мінімізації. Серед багатьох питань, пов'язаних зі з'єднанням ефективної ринкової економіки, одним із найактуальніших і різноманітних є створення стабільної та ефективної логістичної структури в агропромисловому комплексі країни. Одним із показників, що характеризує ефективність логістики, є рівень логістичних витрат. Україна діє до країни з високими логістичними витратами, що значно впливає на ефективність економіки країни загалом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження витрат на логістичну діяльність підприємства, зокрема шляхів їх зменшення присвячені праці таких науковців як: зокрема, в працях Л. Міротіна, О. Мороза, Ю. Пономарьова, ін. Робота цих вчених виникає в наступному: Логістика представляє собою управління матеріальними потоками на етапі закупівель на макро- та мікрорівнях сировини, матеріалів, продукції та продукції, товарів, робіт, послуг. Функції логістики включають обробку замовлень, формування матеріально-технічного забезпечення, комплектацію, упаковку, транспортування, складування тощо. Традиційно логістика повинна забезпечувати рух певного продукту до споживача, виступаючи певною виробничою інфраструктурою економіки. Вплив логістики на витрати, пов'язані з реалізацією товарів, очевидний. У рамках підходу ці витрати включають витрати на виконання замовлень, включаючи витрати на переробку товарів, транспортування та зберігання, управління запасами, упакування та сервісну діяльність (постачання запасних частин, після продажне обслуговування). Як правило, збільшенням їх частки на ньому. Згідно, ефективністю логістичної системи є рівень забезпечення фактичного результату при логістичній діяльності, також в праці запропоновано мінімізацію логістичних витрат з урахуванням якісних сервісних показників. Ефективність логістичної системи в визначається як система показників, якою характеризується рівень якості функціонування логістичної системи при заданому рівні сумарних логістичних витрат враховуючи часові показники, показники якості та активи як показник швидкості обороту обігових коштів і окупності основних засобів. За даними досліджень, ефективність логістичного ланцюга, в цілому, менше 10 %, подальше підвищення ефективності досягається винятково глибоким розумінням і аналізом логістичних процесів. Однозначних дефініцій у визначеннях ефективності функціонування логістичних систем і оцінці ефективності на сьогодні не має.

Слід зазначити, що до логістичних витрат належить витрати, пов'язані з переміщенням і зберіганням товаро-матеріальних цінностей від первинного джерела до кінцевого споживача. До матеріально-технічних витрат підприємства, крім фактичної собівартості, слід віднести також упущену вигоду, спричинену іммобілізацією оборотних коштів (виробничі запаси, незавершене виробництво, готова продукція), збитки підприємства через неналежну якість ресурсів і готової продукції на всіх етапах логістичного ланцюга, починаючи від постачання до кінця розподілу продукції компанії. На думку Є. В. Новопісної, логістичні витрати є невід'ємною частиною загальних витрат підприємства, і ці витрати є витратами, які супроводжують рух матеріального потоку, тобто формують паралельно з ним.

Т. І. Савенкова визначає логістичні витрати як витрати, пов'язані з виконанням логістичного бізнесу (розміщення замовлення на постачання продукції, закупівля, складування продукції, транспортування в середині виробництва, проміжне зберігання, зберігання готової продукції, відвантаження, зовнішнє тощо), а також персонал,

обладнання, приміщення, склади. Витрати на інвентаризацію, передачу даних замовлення, інвентаризацію, доставку. Подібне визначення дала Н.К. Моїсеєва, додавши можливість форс-мажорної форми. За її висновком логістичні витрати являють собою грошовий вираз використаної праці, засобів і предметів праці, фінансових витрат і різноманітних негативних наслідків форс-мажорних подій, якими є матеріальні цінності (сировина, матеріали, товари) між підприємствами і підприємствами. час, резерви обслуговування.

На думку Ч. Сковронька, логістичні витрати проявляються в грошовому споживанні на місці праці, засобів і предметів праці, фінансових витратах, а також матеріальними цінностями (сировиною, матеріалами, продукцією) між підприємствами та утриманням виробничих запасів. За М.В.Ретою, логістична вартість – це грошовий вираз загальної кількості матеріальних, трудових, фінансових та інформаційних ресурсів, спожитих. Задорожний та А. Грицишин поділили фактори, що впливають на формування логістичних витрат, на дві категорії: кількісні та якісні. Такі класифікації є правильними, але деякі фактори важко віднести до якоїсь певної групи: якісної чи кількісної.

Враховуючи проведення дослідження та особливості логістики, висока вартість логістики в Україні зумовлена:

- по-перше, інфраструктурними чинниками (транспортно-логістична система країни – загалом низька; дороги – низька якість; залізниці – в незадовільному стані; майже повна поява водних шляхів для транспортування вантажів; великі транспортні відстані; експортні великі галузі далеко від портів; невиправдане розміщення багатьох підприємств; високі портові збори в українських портах; основні проблеми залізничного транспорту (відсутність вагонів, розподіл локомотивів та існуючий вагонний парк)

- по-друге, внутрішні логістичні фактори підприємства (технічний рівень паркінгів, висока зношеність основних фондів; низький рівень організаційного управління внутрішньою логістикою; давня організація доставки товарів від виробника до споживача); по-третє, за специфічними факторами агропромислового комплексу, які впливають на матеріально-технічне забезпечення даної конкретної галузі (значний вплив інженерної сезонності через обмеження використання ресурсів; взаємозв'язок усіх логістичних процесів з природними циклами; наявність географічної локалізації виробництва).

Аналізуючи різні точки зору, можна виявити, що відмінність авторської точки зору полягає у визначенні та поясненні сутності, складу та методу оцінки кожного елемента логістичних витрат.

Слід зазначити, що логістичні витрати характеризуються: розподілом витрат на різні групи за традиційними аспектами (видом і обсягом); високою і часто зростаючою часткою в загальних витратах підприємства; мінливістю; розподілом відповідальності за їх виникнення серед багатьох організаційних ланок і робочих місць, що складають логістичну систему, трудомісткість заходів, пов'язаних із визначенням її загального обсягу та виконанням численних обчислювальних операцій. Традиційно логістичні витрати можна за походженням; за носієм витрат; за рахунками аналізу витрат; за етапами логістичного процесу.

Розрізняють такі логістичні витрати:

- постійні витрати, незалежні від обсягу виробництва і реалізації продукції, тобто незалежні від інтенсивності матеріальних потоків. Сюди, зокрема, входять витрати на оренду складських приміщень;

- змінні витрати, які залежать від інтенсивності матеріальних потоків, контрольованих фірмою. До них належать витрати на придбання сировини, транспортні витрати;

- загальна вартість, або загальна собівартість, як сума постійних і змінних витрат;

- середня вартість – розмір відповідних витрат на одиницю матеріального потоку;
- граничні витрати, визначені як збільшення відповідних витрат;
- постійні витрати, змінні витрати, загальні витрати та середні витрати, зумовлені збільшенням матеріального потоку на одиницю.

Усі складові логістичні витрати можуть мати постійний або змінний характер, при реалізації якого покриваються як постійні, так і змінні витрати, але утворюється прибуток.

**Постановка завдання.** Мета дослідження полягає у визначенні особливостей управління логістичними витратами виробничого підприємства та обґрунтуванні шляхів їх оптимізації витрат в логістичних системах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Основна проблема, яка виникає при розподілі логістичних витрат, полягає в тому, що традиційні основні види витрат і методи їх класифікації обліку зазвичай не містять достатньої та надійної інформації щодо розподілу витрат, пов'язаних з логістичними процесами. Це пояснюється тим, що традиційні системи бухгалтерського обліку включають витрати на логістику в інші групи корпоративних витрат, які неможливо проаналізувати, щоб врахувати всі дослідження управлінських рішень та їх вплив на загальну ефективність логістичної системи. Складність викликана впливом факторів внутрішнього та зовнішнього середовища. склад залежить від організації ціноутворення, характеру розподілу прибутку їх, структури фінансових ресурсів. Одним із ключових моментів теорії логістичних витрат є фактори, що впливають на їх формування. Виявлення впливу факторів на собівартість та її облік дає можливість впливати на собівартість підприємства.

Фактори формування логістичних витрат можна розділити та проаналізувати на різних рівнях відповідно до різного ступеня їхнього впливу:

- базовий (стратегічний) рівень, якщо розглядати вплив просторового розташування підприємства, типу виробництва, організації виробництва, організації постачання, організації розподілу тощо на формування логістичних витрат;

- перший рівень деталізації – слідкуйте за налаштуванням факторів логістичної діяльності та елементів інфраструктури, які можуть вплинути на логістичні витрати (розташування виробничого приміщення, розташування постачальника, розташування споживача, використання власного транспорту або транспортних осіб, використання проміжного зберігання, наявність інтегрованих інформаційних систем тощо);

- другий рівень факторного уточнення не вдасться ідентифікувати факторів;

- третій рівень деталізації повинен обґрунтовуватися на розподілі цих елементів у поєднанні з факторами, які фактично формують кожен із зазначених вищих елементів логістичних витрат.

Діяльність будь-якого підприємства отримує отримання прибутку за рахунок задоволення потреб споживачів, що здійснюються певними витратами. Витрати залежать від того, наскільки ефективно компанія використовує методи зниження витрат. Витрати на логістику для підприємств традиційно становлять від 5% до 35% від продажів, залежно від типу бізнесу, географічного охоплення діяльності, матеріальних ресурсів, ваги та цінових характеристик готової продукції. Щоб контролювати витрати на логістику, можна запропонувати: зосередитися на контролі вартості виникнення. Обробляйте дані по-різному від різних типів витрат, скорочуючи види діяльності (процедури, інженерні роботи, операції), щоб зменшити витрати. Спроби знизити рівень додаткових витрат недостатньо ефективними (може знизитися якість продукції). Ви не можете намагатися робити недорогі речі, які вам навіть не потрібні, оцініть кампанії для всього підприємства.

Для цього необхідно знати результати діяльності за всіма функціональними напрямками логістики. Основним завданням зниження логістичних витрат є стабільне і

правильне агрегування всіх витрат, що забезпечується при русі товару від виробника до споживача. Найбільш точні та вірні дані про витрати дають можливість використовувати обґрунтовані управлінські рішення та отримувати максимальну віддачу від управління процесами в логістиці.

Помірко Н.М. підкреслює можливість мінімізації витрат на логістику за допомогою детальних структур. Вчені поділяють витрати на логістику на: витрати на фізичне переміщення (транспортні витрати), витрати на запаси (витрати на замовлення, витрати на утримання запасів (капітальні витрати, витрати на склад, витрати на обслуговування запасів, витрат на ризики запасів), витрати на утримання запасів у дорозі, витрати на виснаження запасів), і вартість процесу управління інформацією. Тому вартість капіталу розраховується шляхом встановлення відсоткової ставки відносно вартості запасів. Очевидно, що процентні ставки є постійним фактором, який визначається ринком. Тобто вартість запасів є змінною величиною, оскільки вона залежить від кількості запасів. Компанії можуть змінити рівень запасів, зменшивши поточний рівень запасів і рівень страхових запасів. Крім того, витрати на доставку не збільшуються з частотою доставки, якщо вони включені у вартість кінцевого продукту. Крім того, витрати на доставку не збільшуються з частотою доставки, якщо вони включені у вартість кінцевого продукту. Те ж саме стосується й інших витрат, які виділяються в структурі логістичних витрат підприємства. Основне завдання виникає у визначених факторів, що впливають на витрати, їх характер та можливості зміни. Шляхи зниження рівня витрат на логістичну діяльність підприємства: виключити ті види діяльності, знизити витрати; забезпечити загальний контроль витрат; знайти дешевші ресурси; підвищити продуктивність працівників; оновити логістичний ланцюг, коли інвестування в бізнес найвитратніша ланка в ланцюзі поставок, покращити взаємодію між компанією та її постачальниками та споживання в процесі постачання (координації діяльності компанії та її партнерів щодо термінової поставки) продукції, скорочення складських операцій, управління запасами, зберіганням та постачанням готової продукції), використання інкрементальних методів роботи для підвищення продуктивності працівників та ефективності діяльності. функції у виробництві та розподілі продукції.

**Висновки.** Запропонований метод зниження логістичних витрат дійсно ефективний для підвищення ефективності підприємства. Завдяки аналізу логістичних витрат керівництво бізнесу може стратегічно спланувати розподіл продукції, що дозволяє уникнути непотрібних витрат виробництва та максимізувати прибуток виробництва. Тому можна дати наступне визначення логістичних витрат: логістичні витрати – це оцінка вартості ресурсів, які використовуються для виконання різноманітних логістичних операцій на етапах потоку матеріального потоку, потоку інформації та потоку капіталу. Взаємодія між компанією та її постачальниками та покупцями – учасниками ланцюжків поставок, включаючи розміщення замовлень, закупівлю, складування, транспортування, відвантаження тощо.

## Список літератури

1. Голубовський Л. В. Аналіз сучасних методів управління витратами. Галицький економічний вісник. 2016. № 1 (26). С. 187-192.
2. Задорожний З. Логістичні витрати та їх класифікація. *Вісник Тернопільського національного економічного університету*. 2017. Вип. 2. С. 109–117.
3. Конищева Н.І. Управління логістичною діяльністю виробничого підприємства: навч. посіб. Економіка підприємства. Київ.: ЦУЛ, 2015. 265 с.
4. Крикавський Є. В., Похильченко О. А., Чернописька Н. В. та ін. Економіка логістики: навч. посіб. / за заг. ред. Крикавського Є. В., Похильченко О. А.. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2014. 640 с.

5. Лотиш О.Я. Управління логістичними витратами на підприємстві. *Економічний аналіз*. 2015. № 2. С. 240–243.
6. Нікшич С.М., Крикавський Є.В., Мамчин М.М., Сопільник Р.Л. Оптимізація логістичних витрат у сфері управління хімічними підприємством. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2009. 398 с.
7. Попович П.В. Аналітичні технології в забезпеченні економічної ефективності логістичних систем. *Вісник ХНТУСГ*. 2016. Вип. № 169. С. 223 - 225
8. Сачинська Л. В. Управління логістичними витратами підприємства. Основи теорії: навч. посіб. / за заг. ред. Сачинська Л.В. 2-ге вид., допов. і переробл. Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка» ; «Інтелект-Захід», 2012. 456 с.

## References

1. Golubovsky, L.V. (2016). Analiz suchasnykh metodiv upravlinnia vytratamy [Analysis of modern cost management methods]. *Halyts'kyj ekonomichnyj visnyk – Galician Economic Herald, No. 1 (26)*, 187-192 [in Ukrainian].
2. Zadorozhny, Z. (2017). Lohistychni vytraty ta ikh klasyfikatsiia [Logistics costs and their classification] . *Visnyk Ternopil's'koho natsional'noho ekonomichnoho universytetu – Bulletin of the Ternopil National Economic University, Issue 2*, 109–117 [in Ukrainian].
3. Konishcheva, N.I. (2015). Upravlinnia lohistychnoiu diial'nistiu vyrobnychoho pidpriemstva [Management of logistics activities of a production enterprise]. *Business Economics*. Kyiv : TsUL [in Ukrainian].
4. Krykavskiy, E.V., Pokhylchenko, O.A., Chernopyshka, N.V. et. al. (2014). Ekonomika lohistyky [Economics of logistics]. Lviv: National Publishing House. Lviv Polytechnic University, [in Ukrainian].
5. Lotysh, O.Ya. (2015). Upravlinnia lohistychnymy vytratamy na pidpriemstvi [Management of logistics costs at the enterprise]. *Ekonomichnyj analiz – Economic analysis, No. 2*, 240–243 [in Ukrainian].
6. Nikshich, S.M., Krykavskiy, E.V., Mamchyn, M.M. & Sopilnyk, R.L. (2009). Optyimizatsiia lohistychnykh vytrat u sferi upravlinnia khimichnymy pidpriemstvom [Optimization of logistics costs in the field of chemical enterprise management]. Lviv: National. Lviv Polytechnic University [in Ukrainian].
7. Popovych, P.V. (2016). Analitychni tekhnolohii v zabezpechenni ekonomichnoi efektyvnosti lohistychnykh system [Analytical technologies in ensuring the economic efficiency of logistics systems]. *Visnyk KhNTUSH – Herald of KhNTUSG, Issue 169*, 223 - 225[in Ukrainian].
8. Sachinska, L.V. (ed.). (2012). *Management of logistics costs of the enterprise. Basics of the theory: teaching. manual* . (2d ed.). Lviv: National; "Intellect-West" [in Ukrainian].

**Olga Chorna**, Assoc. Prof., PhD econ. sci., **Pavlo Popovich**, Prof., DSc.

*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

**Mukola Mayak**, Prof., DSc.

*Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine*

**Oksana Shevchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Nataliia Falovych**, Assoc. Prof., PhD econ. sci.

*Western Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine*

**Serhii Komarnitskyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Podolsk State University, Kamianets-Podilskyi, Khmelnytskyi region, Ukraine*

### Cost Optimization in Logistics Systems

The article examines the problem of assessing the economic efficiency of logistics systems using simulation models and determines the likely conditions for the application of this method.

The relevance and necessity of optimizing the management of logistics costs in the complex management system of production enterprises is highlighted. The set of logistics costs in the total cost of production enterprises of Ukraine and countries of the world is determined. The specifics of displaying logistics costs in the company's accounting system have been determined. The formation of logistics cost is inseparable from the functioning of the enterprise's logistics system. In the process of optimizing the company's activities, logistics costs are coordinated with operational costs. The determination and evaluation with the appropriate level of detail of all factors for optimizing logistics costs in production companies confirm the basic principles of finding reserves for reducing and optimizing logistics costs.

The proposed method of reducing logistics costs is really effective for increasing the efficiency of the enterprise. Thanks to the analysis of logistics costs, business management can strategically plan the distribution of products, which allows to avoid unnecessary production costs and maximize production profits in the end. Interaction between the company and its suppliers and buyers - participants in the supply chain, including placing orders, purchasing, warehousing, transportation, shipping, etc.

**logistics, costs, logistics costs, production enterprise, optimization of logistics costs**

*Одержано (Received) 25.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 30.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*

**Н.В. Потаман**, доц., канд. техн. наук, **О.О. Орда**, доц., канд. техн. наук  
*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна*  
*e-mail: potaman81@ukr.net, kost.alexandra@gmail.com*

## Моделювання процесу митної переробки вантажів при проходженні транспортних засобів через державний кордон України

В системах доставки вантажів у міжнародному сполученні все частіше застосовуються логістичні принципи роботи. При цьому важливу роль грає ефективна взаємодія усіх ланок логістичних ланцюгів, в число яких входить й процес митної переробки вантажів. Підвищення конкуренції на ринку вантажних міжнародних перевезень обумовило необхідність виділення процесу митної переробки вантажів у окрему ланку логістичного ланцюга доставки вантажів. Побудовано модель процесу митної переробки вантажів на основі теорії мереж Петрі.

**митна переробка, транспортування, сеті Петрі, логістичні принципи, математична модель, митна система, ефективність**

**Постановка проблеми.** Процес європейської інтеграції України ставить перед державою низку актуальних завдань. Розв'язання пріоритетних завдань зовнішньоекономічної стратегії щодо приближення до світових стандартів та критеріїв оптимальних параметрів відкритості й прозорості вітчизняної економіки, інтегрування України у світовий економічний простір, поглиблення її співпраці з іншими державами пов'язане із відповідним транспортним забезпеченням, покращенням якості та прискоренням процесу вантажопереробки в пунктах пропуску на державному кордоні.

Використання геостратегічного потенціалу України в умовах розвитку глобалізаційних процесів взаємодії в гуманітарній сфері, а також створення реальних передумов вирішення основного геополітичного завдання нашої держави – вступу України до Європейського Союзу. Розвиток митної служби України в умовах перетворень, що відбуваються у світовому суспільстві, потребує створення багатофункціональної, конкурентоспроможної, ефективно керованої структури відповідно до найбільш сучасних моделей митниць світу.

Митна система держави формується як результат її митної політики, тобто комплексу заходів держави відносно використання митної системи в зовнішньоекономічних цілях. Митна політика повинна забезпечити реалізацію економічних, соціальних, фінансових і торгово-політичних намірів держави [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ринок транспортно-логістичних послуг України дуже перспективний, з огляду на унікальне розташування нашої країни на транспортному перехресті Європи про що свідчить найвищий серед європейських країн коефіцієнт транзитності [2]. Зростає значення митно-логістичної складової зовнішньоекономічної діяльності держави на всіх регіональних рівнях її прояву. Україна граничить із сьома країнами, на границях з якими визначено 234 пункту пропуску – 144 міжнародних, 36 міждержавних, 55 місцевих [3, 4].

Як відомо, Закарпатська область межує з чотирма державами: Угорщиною, Словаччиною, Румунією та Польщею. Ураховуючи виняткове географічне



розташування Карпатський регіон один із найпривабливіших в Україні за інфраструктурою та специфікою роботи. Для прикладу можна представити роботу митного поста «Вилок» – це міжнародний автомобільний пункт пропуску з цілодобовим режимом функціонування. Пропускна спроможність за добу становить: легкових автомобілів - 2800 од ; вантажних автомобілів - 200 од ; фізичних осіб - 7000 чол [5].

**Постановка завдання:** побудова моделі процесу митної переробки вантажів, яка дозволяє приймати обґрунтовані технологічні, конструктивні, управлінські рішення, змінювати вхідні параметри, здійснювати перспективне планування на основі інформації про зайнятість контрольних пунктів, митних зон прикордонної митниці, бригад митників, пропускної здатності пунктів пропуску, технічних засобів митного контролю та зв'язку, види митних режимів, нормування тривалості всіх складових митної переробки вантажів. А також дає можливість аналізувати час на виконання митних процедур за різними видами митних режимів. Для розробки моделі застосовується теорія мереж Петрі, яка дозволяє досліджувати імовірнісні процеси з урахуванням відмов та черг.

**Виклад основного матеріалу дослідження:** Зростаюча конкуренція на ринку транспортних послуг, інтеграція транспортної системи України в європейські структури обумовлюють необхідність пошуку нових заходів щодо підвищення якості транспортного обслуговування, мінімізація витрат часу та ресурсів учасників логістичного ланцюга доставки вантажів. Актуальним залишаються питання удосконалення транспортних технологій, їх узгодження з виробничими, торговельними, складськими і митними технологіями, спрощення та удосконалення митних процедур, підвищення ефективності митного контролю та митного оформлення експортно-імпортного вантажопотоку для отримання синергетичного ефекту [6, 7].

Логістична організація митної переробки вантажів - це логістизація процесів організації митних режимів, пов'язаних з фактичним переміщенням товарів через митний кордон України, тобто це сукупність процесів реалізації митних режимів, пов'язаних з фізичним переміщенням зовнішньоторговельних вантажів через митний кордон. Логістичний підхід складається у встановленні адекватності інформаційного та матеріального потоків, визначенні технології оптимального переміщення ресурсів і товарів, визначенні потреб до якості товарів та їх упакуванню, виявленні причин утворення втрат часу, національного використання матеріальних і трудових ресурсів, обладнання та приміщень. Останнім часом величезна увага в економічній літературі приділяється проблемі логістизації [8].

Перший напрямок оснований на аналізі митно-логістичних (товарно-інформаційно-фінансових) потоків, пов'язаних з перетином митного кордону України зовнішньоторговими потоками і стягненням відповідних митних зборів і платежів. Отже, основою митно-логістичних потоків є зовнішньоторгові потоки, які мають транскордонний, транзитний характер. Вони включають вхідні (імпорт) і вихідні (експорт) види потоків. Їх супроводжують інформаційні потоки: вихідні (від митниці до центрального органа), та вхідні (навпаки), супровідні (документи на товар). Фінансові потоки, в свою чергу, бувають вихідні (перерахування мита в держбюджет) і вхідні (державне фінансування митниць) [9].

Для досягнення мети дослідження проводиться побудова логістичного ланцюга доставки вантажів у міжнародному сполученні з обов'язковим визначенням саме тих ланок, які по функціональним ознакам відносяться безпосередньо до митних процедур (рис. 1).

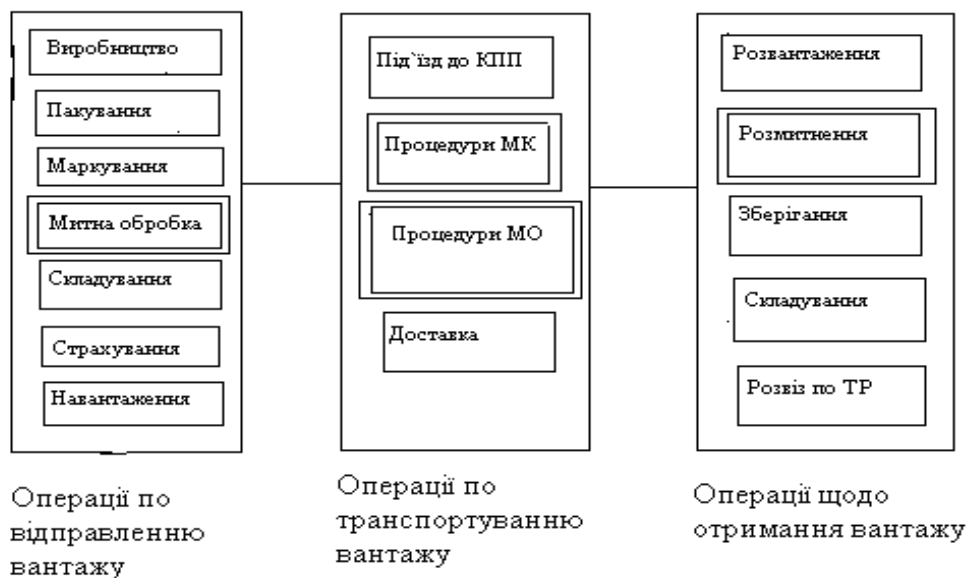


Рисунок 1 – Логістичний ланцюг доставки вантажів з визначенням ланок митної переробки вантажів  
Джерело: розроблено авторами

Об'єктом даної роботи виступає процес митної переробки вантажів, що являє собою сукупність процесів реалізації митних режимів, зв'язаних з фізичним переміщенням зовнішньоторговельних вантажів через митний кордон [10]. При побудові логістичного ланцюга доставки вантажів у міжнародному сполученні необхідно виявити основні елементи, з яких складається логістичний ланцюг.

В результаті аналізу технології перевезення вантажів у міжнародному сполученні можна виділити такі елементи:

- автотранспортне підприємство. Через цей елемент головним чином здійснюється інформаційний потік. Даний елемент є споживачем і передавачем інформаційного потоку. Споживачем, оскільки, інформація про потребу в транспорті передається від постачальника до АТП. Передавачем, оскільки АТП може передавати інформацію про наявність необхідної кількості транспортних засобів, їх технічний та комерційний стан постачальнику;

- постачальник (склад постачальник) – ця ланка є початком руху матеріального потоку від постачальника до споживача. В ній відбувається навантаження транспортного засобу та оформлення всіх необхідних для перевезення вантажу документів;

- пункт пропуску через державний кордон України – в цій ланці перевіряється відповідність матеріального потоку інформаційному, а також оформлення необхідних документів для проходження кордону;

- прикордонний перехід іншої держави – в даному елементі зосереджені аналогічні підрозділи, що й на пункті пропуску через державний кордон України, виконуються аналогічні операції.

Останньою ланкою в даному логістичному ланцюзі є термінал споживача. На терміналі зосереджені складські приміщення та митний підрозділ, який при перевірці всіх необхідних документів дає дозвіл на розвантаження транспортного засобу.

В часовому розрізі виділяють три групи транспортних операцій:

- що передують зовнішньоторговій угоді;
- що з'являються в процесі її реалізації;
- операції після завершення угоди.

Умовою ефективної митної переробки вантажів виступає мінімізація часу, витраченого на митну переробку вантажів

$$T_{mi} = \sum_{i=1}^m T_{mi} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $T_{mi}$  – час на митну переробку вантажів в  $i$ -ій фазі, год.;

$m$  – кількість фаз.

Час митної переробки вантажів в  $i$ -ій фазі визначається за наступною залежністю

$$T_{cp} = \sum_{j=1}^n T_{ocj} \cdot \delta_{ocj} + T_{вирj} \cdot \delta_{вирj}, \quad (2)$$

де  $T_{ocj}$  – час на очікування виконання  $j$ -ої технологічної операції щодо митної переробки вантажів у  $i$ -ій фазі, год;

$T_{вирj}$  – час на виконання  $j$ -ої технологічної операції щодо митної переробки вантажів у  $i$ -ій фазі, год.;

$n$  – кількість операцій, які виконуються у фазі або кількість очікувань виконання операцій;

$\delta_{ocj}$  – вірогідність очікування  $j$ -ої технологічної операції щодо митної переробки вантажів у  $i$ -ій фазі;

$\delta_{вирj}$  – вірогідність виконання  $j$ -ої технологічної операції щодо митної переробки вантажів у  $i$ -ій фазі.

При митній переробці вантажів поряд з виконанням технологічних операцій (виробничих) виникає ряд міжопераційних простоїв, які пов'язані з очікуванням початку виконання операцій за різних умов та обставин.

Таким чином час на очікування виконання  $j$ -ої технологічної операції щодо митної переробки вантажів у  $i$ -ій фазі можливо записати у наступному вигляді:

$$T_{oc} = t_{oc}^{внм} + t_{oc}^{нКПП} + t_{oc}^{мпроц} + t_{oc}^{мпр}, \quad (3)$$

де  $t_{oc}^{внм}$  – час очікування митного оформлення на внутрішній митниці, год;

$t_{oc}^{нКПП}$  – час очікування транспортних засобів в черзі при під'їзді до КПП, год;

$t_{oc}^{мпроц}$  – час очікування митних процедур на КПП (митний контроль, митне оформлення та інші митні процедури), год;

$t_{oc}^{мпр}$  – час очікування на розмитнення вантажу на митниці призначення, год.

Відповідно час на виконання  $j$ -ої технологічної операції щодо митної переробки вантажів у  $i$ -ій фазі пропонується визначати по формулі

$$T_{вир} = T_{н-р} + T^{внм} + T^{нКПП} + T_{заг}^{мпроц} + T^{мпр} + T^{мпр}, \quad (4)$$

де  $T_{н-р}$  – час на виконання навантажувально - розвантажувальної роботи;

$T^{внм}$  – час на виконання митного оформлення на внутрішній митниці, год;

$T^{нКПП}$  – час на під'їзд до КПП транспортних засобів, год;

$T_{заг}^{мпроц}$  – час на проведення митних процедур на КПП (митний контроль, митне оформлення та ін.), год;

$T^{мпр}$  – час на під'їзд транспортного засобу до митниці призначення, год;

$T^{мпр}$  – час на розмитнення вантажу на митниці призначення, год.

Представлення системи мережею Петрі засноване на двох основоположних поняттях: події і умови. Виникненням подій управляє стан системи, що може бути описаний безліччю умов. Умова може приймати або значення «істина», або значення «хибність». Виникнення події в системі можливе, якщо виконуються певні умови - передумови події. Виникнення події може призвести до виконання інших умов – післяумови події.

Статистичні характеристики процесу митної переробки визначені на прикладі митного пункту пропуску «Вилок». Паспорт пункту пропуску: код 300010200; країна на межі Угорщина, ПП Вішне-Немецьке; регіон Закарпатська область; митниця підпорядкування Карпатська Регіональна Митниця; вид транспорту – автодорожній; види контролю: прикордонний, митний, санітарний, фітосанітарний, ветеринарний, екологічний.

За прямим варіантом при наявності фішок позиції *P36* (кількість автомобілів у перевізника) автомобілі поступають до навантажувально-розвантажувального пункту, де здійснюється навантажування автомобілів за допомогою навантажувально-розвантажувальних механізмів *P1*, в цьому випадку перехід *T1* виступає часом на НРР. *P2* відображає кількість завантажених автомобілів, які готові до відправлення. Далі автомобілі прямують до внутрішньої митниці *P3*. Перехід *T2* позначає час доставки вантажу до внутрішньої митниці. На внутрішній митниці вантаж проходить митні процедури, час затрачений на це відображається у переході *T3*. Кількість автомобілів, які пройшли митні процедури на внутрішній митниці *P8*. Далі автомобілі прямують до контрольно-пропускного пункту, перехід *T4* відображає час їзди автомобіля до КПП. *T5* позначає кількість автомобілів, які готові до виконання митних процедур. Передбачається, що митний контроль та митне оформлення на контрольно-пропускному пункті може здійснюватись одночасно, тому перехід *T5* має вигляд переходу-перемикача типу *TX*, який розподіляє автомобілі з будь-якою вірогідністю. Кількість автомобілів, які готові до виконання митного оформлення позначено *P7*. Кількість автомобілів, які готові до виконання митного контролю *P6*. Необхідно також враховувати час на підхід митних інспекторів до автомобіля, це відображає перехід *T6*, *T7*. Перехід *T9*, *T8* відображає час на митний контроль та оформлення при роботі митних інспекторів *P8*, *P9*. Після проведення митного контролю та оформлення на контрольно-пропускному пункті автомобіль прямує до митниці призначення для розмитнення. *P18* позначає кількість автомобілів, які надійшли до митниці призначення, у свою чергу *T11* відображає час на під'їзд автомобіля до митниці призначення. На внутрішній митниці автомобілі з вантажем проходять розмитнення. *T12* відображає час на розмитнення. Після процедури розмитнення автомобіль прямує до вантажоодержувача, кількість автомобілів, як надійшли до вантажоодержувачів позначаємо *P16*. Час доставки вантажу до вантажоодержувачів позначаємо *T13*. Укрупнена модель мереж Петрі, яка описує процес митної переробки вантажів наведена на рис. 2.

За побудованою моделлю на основі мереж Петрі було проведено експеримент. До моделі було введено часові параметри та кількісні фактори, які впливають на процес митної переробки вантажів при доставці в міжнародному сполученні. Фактори по першому експерименту складають: кількість автомобілів – 1 авт.; кількість вантажу – 15 т; кількість навантажувально-розвантажувальних механізмів – 3 од.; кількість митних інспекторів для здійснення митного контролю – 2 чол.; кількість митних інспекторів для здійснення митного - оформлення – 2 чол.

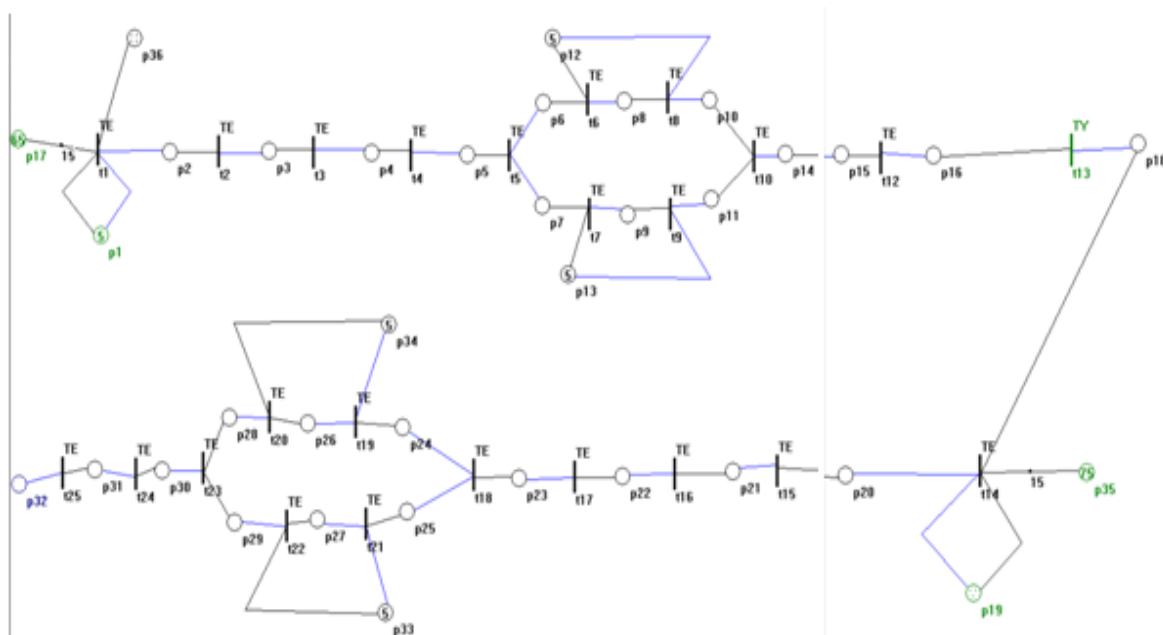


Рисунок 2 – Модель процесу митної переробки вантажів  
 Джерело: розроблено авторами

Результати моделювання за першим експериментом представлені на рис. 3.

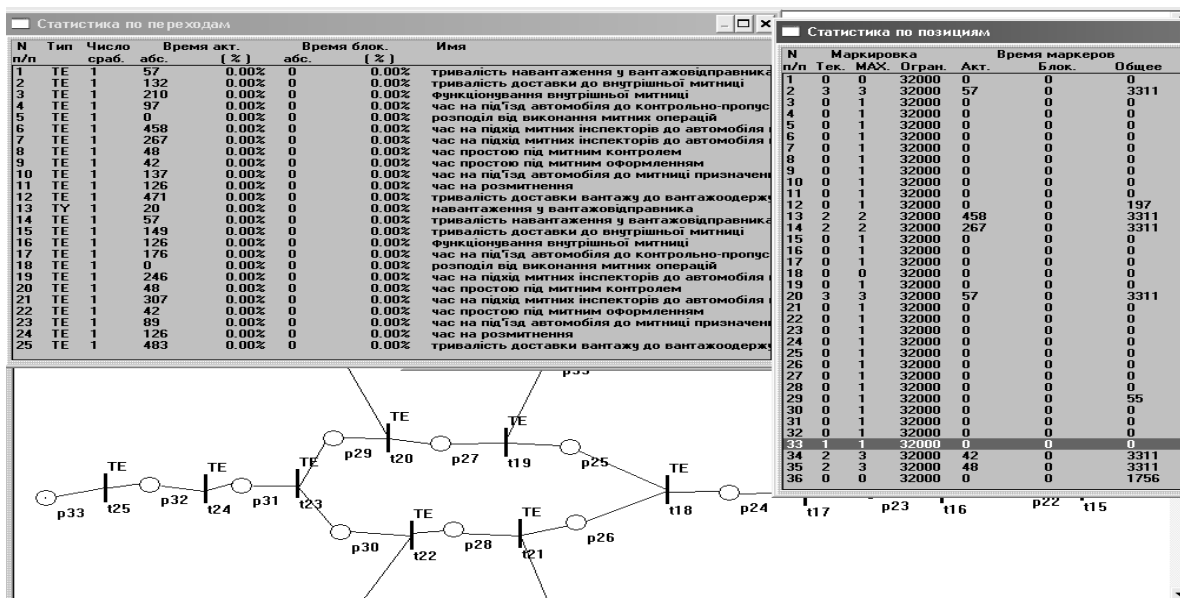


Рисунок 3 – Результат моделювання  
 Джерело: розроблено авторами

Встановлено, що очікування виникають внаслідок нерівномірності процесу роботи контрольного пункту пропуску через державний кордон України та нерівномірним розподілом вантажопотоку по митних зонах прикордонної митниці, що обумовлено наявністю черг на контрольних пунктах, обмеженою пропускною здатністю пунктів пропуску, недостатньою кількістю співробітників та технічних засобів митного контролю і зв'язку.

**Висновки.** Для розробки моделі процесу митної переробки вантажів доцільно застосовувати системи паралельної обробки інформації та паралельної діючих об'єктів, до яких можна віднести, наприклад, моделювання за допомогою мереж Петрі. Розроблена на основі мереж Петрі модель опису процесу митної переробки вантажів показує, що крім наглядності та простоти в застосуванні, вона дає можливість враховувати різні імовірнісні фактори.

Розробивши математичну модель митної переробки вантажів при проходженні транспортних засобів через державний кордон можна зробити висновок, що поряд з технологічними операціями (час на виконання митного оформлення на внутрішній митниці, час на проведення митних процедур на КПП) існують не продуктивні операції – простої (час очікування митного оформлення на внутрішній митниці, час очікування митних процедур на КПП), які суттєво впливають на час проходження митного кордону. Математичний апарат мереж Петрі дозволить вивчити динаміку функціонування системи, що досліджується, та її поведінку при різних початкових умовах. Виявлено, що найбільший вплив на час митної переробки вантажів має кількість робітників митного контролю та митного оформлення;

За допомогою побудови математичної моделі на основі мереж Петрі досягнуто ефект на 1,11%. В результаті застосування розробленої математичної моделі процесу митної переробки вантажів отримано ефект, який складає 42 хв.

## Список літератури

1. Проблеми організації, управління та підвищення ефективності транспортних перевезень ; за ред. Л.М. Савчук, Г.С. Прокудіна. Дніпро: Пороги, 2021. 300 с.
2. Пасічник А.М., Андрущенко В.О., Кравчук С.С. Імітаційне моделювання роботи вантажного митного комплексу . *Вісник Національного транспортного університету*. 2010. №21(2). С. 209-213
3. Потаман Н.В., Макарова О.О. Удосконалення процесу митної переробки вантажів при перетині державного кордону України. *Актуальні проблеми науки, освіти і технологій: теорія і практика* : зб. тез доповідей Міжнародної наук.-практ. конф. (Полтава, 8 лютого 2022 р.): у 2 ч. Полтава: ЦФЕНД, 2022. Ч. 2. С. 35-37.
4. Лужанська Н. О., Коцюк О. Я. Дослідження діяльності вантажних митних комплексів як ланки логістичного ланцюга. *Вісник Національного транспортного університету*. 2010. Вип. 21, Ч. 2. С. 158-160
5. Мельник М.В. Інститут митних режимів в митному праві України : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.07 / Міжрегіональна академія управління персоналом. Київ, 2016. 251 с.
6. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, ратифікована Верховною Радою України Законом від 16 вересня 2014 р. № 1678-VII. Дата оновлення: 30.11.2015. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/984_011#Text) (дата звернення: 12.03.2023)
7. Стояновський О.О., Терещенко М.В. Методика моделювання транспортного комплексу . *Вісник Академії митної служби України*. 2008. N3. С. 78-84.
8. Хома В.О., Молдован Е.С. Сучасний стан національного правового забезпечення митного режиму безмитної торгівлі та напрями його вдосконалення. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2019. № 5. С. 104–108. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2019-5/23>.
9. Кравчук С.С. Дослідження технологічних операцій та митних процедур в митниці призначення. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля*. 2010. №4 (146). С. 82-87.
10. Пасічник А.М., Кравчук С.С. Аналіз технології переробки вантажів на вантажній станції, що обслуговує вантажний митний комплекс. *Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті*: зб. тез міжнар. наук.-практ. конф. 2010. С. 17.

## References

1. Savchuk, L.M. & Prokudina, G.S. (Eds.) (2021). *Problems of organization, management and increasing the efficiency of transportation*. Dnipro: Porogi [in Ukrainian].
2. Pasichnik, A.M., Andrushchenko, V.O. & Kravchuk, S.S. (2010). Imitacijne modelyuvannya roboti vantazhnogo mitnogo kompleksu [Simulation modeling of the work of the cargo customs complex] . *Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu – Bulletin of the National Transport University, 21(2)*, 209-213 [in Ukrainian].
3. Potaman, N.V. & Makarova, O.O. (2022). Udoskonalennya procesu mitnoi pererobki vantazhiv pri peretini derzhavnogo kordonu Ukraïni [Improvement of the process of customs processing of goods when crossing the state border of Ukraine]. Actual problems of science, education and technologies: theory and practice: *Mizhnarodna naukovo-praktichna konferencija (Poltava, 8 liutoho 2022 r.) – International Scientific and practical Conference (pp. 35-37) (part.2)*. Poltava: TsFEND [in Ukrainian].
4. Luzhans'ka, N.O. & Kocyuk, O.YA. (2010). Doslidzhennya diyal'nosti vantazhnih mitnih kompleksiv yak lanki logistichnogo lancyuga [Study of the activity of cargo customs complexes as a link of the logistics chain]. *Visnik Nacional'nogo transportnogo universitetu – Bulletin of the National Transport University, Issue 21, part. 2*, 158-160 [in Ukrainian].
5. Mel'nik, M.V. (2016). Institut mitnih rezhimiv v mitnomu pravi Ukraïni [Institute of Customs Regimes in the Customs Law of Ukraine]. *Candidate's thesis. / Mizhregional'na akademiya upravlinnya personalom. Kiiiv* [in Ukrainian].
6. Uгода pro asociaciyu mizh Ukraïnoyu, z odnieï storoni, ta Evropejs'kim Soyuzom, Evropejs'kim spivtovaristvom z atomnoi energii i ihnimi derzhavami-chlenami, z inshoi storoni, ratifikovana Verhovnoyu Radoyu Ukraïni Zakonom vid 16 veresnya 2014 r. № 1678-VII [The Association Agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their member states, on the other hand, was ratified by the Verkhovna Rada of Ukraine by Law No. 1678-VII of September 16, 2014.]. Data onovlennya: 30.11.2015. *zakon.rada.gov.ua*. Retrieved from [https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/984\\_011#Text](https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/984_011#Text). [in Ukrainian].
7. Stoyanovskij, O.O. & Tereshchenko, M.V. (2008). Metodika modelyuvannya transportnogo kompleksu [Methodology for modeling the transport complex]. *Visnik Akademii mitnoi sluzhbi Ukraïni – Bulletin of the Academy of the Customs Service of Ukraine, 3*, 78-84 [in Ukrainian].
8. Homa, V.O. & Moldovan, E.S. (2019). Suchasnij stan nacional'nogo pravovogo zabezpechennya mitnogo rezhimu bezmitnoi torgivli ta napryami jogo vdoskonalennya [The current state of the national legal support of the customs regime of duty-free trade and directions for its improvement]. *Yuridichnij naukovij elektronij zhurnal – Legal scientific electronic journal, 5*, 104–108. Retrieved from <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2019-5/23> [in Ukrainian].
9. Kravchuk, S.S. (2010). Doslidzhennya tekhnologichnih operacij ta mitnih procedur v mitnici priznachennya [ Study of technological operations and customs procedures in the customs office of destination]. *Visnik Skhidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu im. V.Dalya – Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after V. Dala, 4 (146)*, 82-87 [in Ukrainian].
10. Pasichnik, A.M. & Kravchuk, S.S. (2010). Analiz tekhnologii pererobki vantazhiv na vantazhnij stancii, shcho obslugovue vantazhnij mitnij kompleks.[Analysis of cargo processing technology at the cargo station serving the cargo customs complex]. *Modern information technologies in transport, industry and education: Mizhnar. nauk.-prakt. konf. – International Science and Practice Conference (p.17)*. [in Ukrainian].

**Natalia Potaman**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandra Orda**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.  
*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*

### **Modelling the Process of Customs Processing of Cargoes During the Passage of Vehicles Through the State Border of Ukraine**

Developing a model of the customs cargo handling process that allows making sound technological, design, and management decisions, changing input parameters, and carrying out long-term planning based on information on the occupancy of control points, customs zones of the border customs office, customs teams, throughput capacity of checkpoints, technical means of customs control and communication, types of customs regimes, and standardisation of the duration of all components of customs cargo handling.

To develop a model of the customs cargo processing process, it is advisable to use systems of parallel information processing and parallel operation of objects, which include, for example, modelling with the help of Petri nets. The model developed on the basis of Petri nets for describing the customs cargo handling process

shows that, in addition to being clear and easy to use, it makes it possible to take into account various probabilistic factors.

Having developed a mathematical model of customs processing of cargo when vehicles cross the state border, it can be concluded that along with technological operations (time for customs clearance at the internal customs, time for customs procedures at the checkpoint), there are non-productive operations - downtime (time for waiting for customs clearance at the internal customs, time for waiting for customs procedures at the checkpoint), which significantly affect the time of customs border crossing. The mathematical apparatus of Petri nets will allow to study the dynamics of the system under study and its behaviour under different initial conditions.

It has been found that the number of customs control and customs clearance officers has the greatest impact on the time of customs processing of goods.

By building a mathematical model based on Petri nets, an effect of 1.11% was achieved. As a result of applying the developed mathematical model of the customs cargo processing process, an effect of 42 minutes was obtained.

**customs processing, transportation, Petri nets, logistics principles, mathematical model, customs system, efficiency**

*Одержано (Received) 30.03.2023*

*Прорецензовано (Reviewed) 31.03.2023*

*Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023*



## ЗМІСТ

**Комп'ютерні науки***Oksana Chernenko, Nina Rudenko, Daryna Bondar*

Development of simulator software on the topic "Normal algorithms" of the distance learning course "Theory of Algorithms" ..... 3

*К.В. Крячко, А.М. Шрамко, В.В. Коврига*

Раціоналізація спільної роботи залізничних станцій у вузлі ..... 10

**Кібербезпека***К.М. Марченко, О.В. Оршака*

Інформаційна безпека життєдіяльності людини і суспільства в умовах війни ..... 16

**Прикладна механіка***В.М. Боков, О.Ф. Сіса, В.Я. Мірзак, Р.В. Телюта, В.В. Пукалов*

Удосконалення технології розбирання металоконструкцій механізованого шахтного кріплення ..... 22

*М.І. Черновол, І.В. Шепеленко*

Системний підхід до формування показників якості відновлених деталей ..... 30

**Галузеве машинобудування***Н. М. Кандяк, А. Б. Коломієць, О. О. Котовський*

Засоби керування кроковим двигуном та вимірювання зусиль під час дослідження процесу згинання аркушевого матеріалу ..... 37

**Будівництво та цивільна інженерія***Г.Д. Портнов, В.В. Дарієнко, В.В. Пукалов*

Вибір параметрів ущільнення макета конструкції з листовим склом ..... 45

*І.А. Карпюк, В.М. Карпюк, А.І. Костюк, Р.В. Глібоцький, О.О. Постернак*

Деформативність та тріщиностійкість пошкоджених балок з базальтопластиковою арматурою, підсилених вуглепластиковим полотном ..... 56

*В.А. Пашинський, М.В. Пашинський*

Методика визначення кліматичних навантажень за даними регіональної мережі метеостанцій ..... 77

**Агроінженерія***М.І. Денисенко*

До питання відновлення та зміцнення деталей робочих органів ґрунтообробної техніки ..... 86

*А.С. Лімонт, З.А. Лімонт*

Стійкість до вилягання і забур'яненість стеблостою льону-довгунця з урахуванням густоти посівів перед збиранням ..... 100

**Автомобільний транспорт**

<i>Andrii Molodan, Yevhen Dubinin, Oleksandr Polyanskyi, Mykola Potapov, Mykola Poltavskyi, Maksim Krasnokutskyi</i> Changes in engines energy indicators when the cylinders are disconnected in the unloaded mode of operation .....	110
<i>Ю.В. Дзядикевич, О.Б. Сван, О.П. Захарчук, П.В. Попович, Р.І. Розум, М.В. Буряк</i> Захист елементів двигунів транспортних засобів від окислення: технологічний аспект .....	120
<i>Л.А. Тарандушка, М.П. Рудь, О.В. Батраченко</i> Аеродинамічний аналіз впливу повітряних потоків від вантажівки на рух мотоцикла .....	127
<i>В.І. Бодак</i> Використання електромобілів як таксі .....	136
<i>М.В. Буряк, Р.І. Розум, О.П. Захарчук, П.В. Попович, П.Б. Прогній, Л.Н. Чорній</i> Вплив агресивних середовищ на експлуатаційні характеристики матеріалів несучих конструкцій колісних транспортних засобів .....	143
<i>Ю.В. Дзядикевич, О.П. Захарчук, П.В. Попович, Р.І. Розум, М.В. Буряк, В.В. Шевчук</i> Використання боридних і силіцидних покриттів у ДВЗ: технологічний аспект .....	151
<i>Andrii Molodan, Yevhen Dubinin, Oleksandr Polyanskyi, Mykola Potapov, M. Krasnokutskyi, O. Pushkarenko</i> Method of engine energy indicators estimating when the cylinders are disconnected in the loaded mode of operation .....	159
<i>В.В. Аулін, Д.В. Голуб</i> Обґрунтування механізму функціонування мехатронної системи склоочищення автомобіля .....	167
<i>Д.М. Квашук, В.Ю. Ларін, С.Ф. Філоненко, А.П. Стахова</i> Моделювання витрат та вимірювання електричної енергії електродвигунів .....	176
<i>В.В. Кальченко, В.І. Венжега, Г.В. Пасов</i> Підвищення точності та продуктивності обробки плоских поверхонь деталей, що входять до вузлів і агрегатів автомобілів .....	187
<i>Я.В. Кужельний, О.О. Аксьонова, Д.С. Машковцев</i> Аналіз конструктивних особливостей різних типів коробок перемикачів передач автомобілів .....	196

<i>Г.В. Пасов, В.І. Венжега, А.В. Кологойда</i> Вивчення роботи механізмів, які працюють у автомобілебудуванні із застосуванням анімаційного симулятора.....	205
--	-----

### Транспортні технології (за видами)

<i>Д.В. Голуб</i> Підвищення ефективності управління технологічним процесом доставки на основі аналізу статичних та динамічних резервів транспортної системи .....	214
<i>Т.В. Гайкова, В.Г. Загорянський, А.О. Леонтович</i> Впровадження цифрових технологій в управління ланцюгами постачань .....	222
<i>Т.В. Гайкова, О.В. Мороз, С.Р. Олексієнко магістр</i> Аналіз перспектив розвитку проекту каршерінгу.....	229
<i>В.А. Войтов, А. Г. Кравцов, М. В. Карнаух, О. М. Горяїнов, А.С. Козенок, І.А. Бабич</i> Оцінка ергономічної стійкості транспортного потоку на дільницях дорожньої мережі. Ідентифікація математичної моделі.....	236
<i>Volodymyr Zahorianskyi, Mykola Moroz, Tetyana Haykova</i> Model of the optimal composition of the main technical facilities of a container transport and technological system.....	246
<i>І.О. Кузєв, А.О. Уманська, А.О. Кострецов</i> Особливості митного оформлення митних процедур 252-258	
<i>О.В. Чорна, П.В. Попович, М.М. Маяк, О.С. Шевчук, Н.М. Фалович, С.П. Комарніцький</i> Підвищення ефективності ланцюгів поставок .....	258
<i>Р.А. Хабутдінов, І.О. Федоренко</i> Порівняльний аналіз автобусів та електробуса за показником транспортної результативності технологічних впливів машинних процедур.....	265
<i>О.Б. Сван, Д.П. Попович, Б.В. Твардовський, О.О. Кучеренко, П.В. Попович, О.В. Чорна</i> Логістика доставки фармацевтичних препаратів.....	274
<i>Н.М. Фалович, П.В. Попович, О.С. Шевчук, О.В. Чорна, М.М. Маяк, В.В. Іванишин</i> Структура і потенціал логістичного сектору України.....	280
<i>О.В. Чорна, П.В. Попович, М.М. Маяк, О.С. Шевчук, Н.М. Фалович, С.П. Комарніцький</i> Оптимізація витрат в логістичних системах .....	286
<i>Н.В. Потаман, О.О. Орда</i> Моделювання процесу митної переробки вантажів при проходженні транспортних засобів через державний кордон України .....	292

## CONTENT

### Computer Science

*Oksana Chernenko, Nina Rudenko, Daryna Bondar*

Development of simulator software on the topic "Normal algorithms" of the distance learning course "Theory of Algorithms" ..... 3-9

*Kateryna Kryachko, Anna Shramko, Vladislav Kovriga*

Rationalization of Joint Work of Railways Stations in the Node ..... 10-15

### Cybersecurity

*Konstantyn Marchenko, Oleh Oryshaka*

Information Security of Human Life and Society in Conditions of War ..... 16-21

### Applied Mechanics

*Victor Bokov, Oleh Sisa, Volodymyr Mirzak, Ruslan Teliuta, Viktor Pukalov*

Improvement of Technology for Dismantling Metal Structures of Mechanized Mine Supports ..... 22-29

*Mykhailo Chernovol, Ihor Shepelenko*

A Systematic Approach to Forming Quality Indicators for Refurbished Parts ..... 30-36

### Industry Engineering

*Nazar Kandiak, Andrii Kolomiets, Ostap Kotovskii*

Means of Controlling a Stepper Motor and Measuring Forces During the Study of the Folding Process of Sheet Material ..... 37-44

### Construction and Civil Engineering

*Hennadii Portnov, Viktor Darienko, Viktor Pukalov*

Selection of Sealing Parameters of the Structure Layout With Sheet Glass ..... 45-55

*Irina Karpiuk, Vasily Karpiuk, Anatoly Kostyuk, Roman Hlibotskyi, Oleksandr Posternak*

Deformability and crack resistance of damaged beams with basalt-plastic reinforcement reinforced with carbon-plastic sheet ..... 56-76

*Victor Pashynskyi, Mykola Pashynskyi*

Methods of Determining Climatic Loads According to the Data of the Regional Network of Weather Stations ..... 77-85

### Agroengineering

*Mykola Denisenko*

Regarding the Issue of Restoration and Strengthening of Details of the Working Bodies of Soil Machinery ..... 86-99

*Anatoliy Limont, Zlata Limont*

Resistance to Lodging and Weediness of Long Flax Stalks, Taking Into Account the Density of Crops Before Harvest 100-109

### Road Transport

<i>Andrii Molodan, Yevhen Dubinin, Oleksandr Polyanskyi, Mykola Potapov, Mykola Poltavskyi, Maksim Krasnokutskyi</i> Changes in Engines Energy Indicators when the Cylinders are Disconnected in the Unloaded Mode of Operation .....	110-119
<i>Yuriy Dzyadykevych, Olga Swan, Olena Zakharchuk, Pavlo Popovich, Ruslan Rozum, Mukola Buryak</i> Protection of Vehicle Engine Elements Against Oxidation: Technological Aspect .....	120-127
<i>Lyudmyla Tarandushka, Maksym Rud, Oleksandr Batrachenko</i> Aerodynamic Analysis of the Influence of Air Flows From a Truck on Motorcycle Motion.....	127-135
<i>Vladymyr Bodak</i> Use of Electric Vehicles as Taxis.....	136-142
<i>Mykola Buriak, Ruslan Rozum, Olena Zakharchuk, Pavlo Popovich, Pavlo Progniy, Leonid Chornii</i> Influence of Aggressive Environments on the Performance Characteristics of Materials of Bearing Structures of Wheeled Vehicles .....	143-150
<i>Yuriy Dzyadykevych, Olena Zakharchuk, Pavlo Popovich, Ruslan Rozum, Mukola Buryak, Viktor Shevchuk</i> The Use of Boride and Silicide Coatings in Fire engines: Technological Aspect .....	151-159
<i>Andrii Molodan, Yevhen Dubinin, Oleksandr Polyanskyi, Mykola Potapov, Maksim Krasnokutskyi, Oleg Pushkarenko</i> Method of Engine Energy Indicators Estimating when the Cylinders are Disconnected in the Loaded Mode of Operation .....	159-166
<i>Viktor Aulin, Dmytro Holub</i> Justification of the Mechanism of the Functioning of the Mechatronic System of Car Windshield Cleaning .....	167-176
<i>Dmytro Kvashuk, Vitali Larin, Serhii Filonenko, Anzhelika Stakhova</i> Cost Modeling and Measurement of Electrical energy of Electric Motors .....	176-186
<i>Volodymyr Kalchenko, Volodymyr Venzhega, Hennadiy Pasov</i> Increasing the Accuracy and Productivity of Processing Flat Surfaces of Parts that Are Part of Car Assemblies and Assemblies.....	187-195
<i>Yaroslav Kuzhelnyi, Olga Aksonova, Dmytro Mashkovtsev</i> Analysis of Design Features of Different Types of Car Gearboxes .....	196-204
<i>Hennadii Pasov, Volodymyr Venzheha, Yaroslav Kuzhelnyi</i> Studying the Mechanisms that Work in the Automotive Industry Using an Animation Simulator .....	205-213

### Transport Technologies (by Types)

<i>Dmytro Holub</i> Increasing the Efficiency of Management of the Technological Process of Delivery Based on the Analysis of Static and Dynamic Reserves of the Transport System.....	214-221
<i>Tetiana Haikova, Volodymyr Zahorianskyi, Alona Leontovych</i> Integration of Digital Technologies Into Supply Chain Management .....	222-228
<i>Tetiana Haikova, Olena Moroz, Serhii Oleksiienko</i> Analysis of Prospects of Development of Car-Sharing .....	229-235
<i>Viktor Vojtov, Andrey Kravtsov, Mykola Karnaukh, Oleksiy Goryayinov, Anna Kozenok, Inna Babych</i> Assessment of the Ergonomic Stability of the Traffic Flow on Sections of the Road Network. Identification of the Mathematical Model .....	236-245
<i>Volodymyr Zahorianskyi, Mykola Moroz, Tetiana Haikova</i> Model of the optimal composition of the main technical facilities of a container transport and technological system .....	246-252
<i>Ihor Kuziev, Anatolyi Kostretsov</i> Peculiarities of Customs Clearance of Customs Procedures .....	252-258
<i>Olga Chorna, Pavlo Popovich, Mukola Mayak, Oksana Shevchuk, Nataliia Falovych, Serhii Komarnitskyi</i> Increasing the Efficiency of Supply Chain .....	258-265
<i>Ramazan Khabutdinov, Iryna Fedorenko</i> Comparative Analysis of Buses and Electric Buses by the Indicator of Transport Resultancy of Technological Impacts of Machine Procedures .....	265-274
<i>Olga Swan, Danylo Popovych, Bogdan Tvardovskyi, Oleksandr Kucherenko, Pavlo Popovich, Olga Chorna</i> Logistics of Delivery of Pharmaceutical Drugs .....	274-279
<i>Nataliia Falovych, Pavlo Popovich, Oksana Shevchuk, Mukola. Mayak, Volodymyr Ivanyshyn</i> Structure and Potential of the Logistics Sector of Ukraine .....	280-286
<i>Olga Chorna, Pavlo Popovich, Mukola Mayak, Oksana Shevchuk, Nataliia Falovych, Serhii Komarnitskyi</i> Cost Optimization in Logistics Systems .....	286-291
<i>Natalia Potaman, Oleksandra Orda</i> Modelling the Process of Customs Processing of Cargoes During the Passage of Vehicles Through the State Border of Ukraine.....	292-300

**Матеріали подаються у друкованому вигляді та на електронному носії.** Обсяг статті – 5-12 сторінок. Основний текст рукопису друкується 12 кеглем; шрифт – Times New Roman; міжрядковий інтервал – 1,0; відступ – 1,25 см; поля: верх – 2 см, низ – 3см, право, ліво – 2 см. Текст повинен бути вирівняний по ширині аркуша.

Підписи до рисунків і набирати шрифтом Times New Roman 10 (по центру), таблиць 14 (з абзацу). Після рисунка, таблиці схеми – вказується джерело

Рисунки й таблиці розміщуються в тексті статті з вирівнюванням по центру сторінки, без обтікання текстом у рамках поля набору. Рисунки й таблиці подаються в статті безпосередньо після тексту, де їх згадано вперше. На кожен формулу, таблицю, рисунок, графік у тексті мають бути обов'язкові посилання.

**Анотація** українською мовою – до 10 рядків тексту (до 500 знаків), обов'язково 3-7 ключових слів;

**Анотація** англійською мовою повинна бути не менше ніж 1800 знаків:

**Структура анотацій:**

- мета статті;
- короткий опис виконаної роботи;
- висновки по роботі;
- перелік ключових слів;

**Структура основного тексту статті:**

1. **Постановка проблеми.**
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**
3. **Постановка завдання (мета статті).**
4. **Виклад основного матеріалу.**
5. **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

**Схема організації матеріалу статті:**

1. УДК
2. Ініціали, прізвище, вчене звання, науковий ступінь
3. Місце роботи, місто, країна. e-mail
4. Назва статті.
5. Анотація і ключові слова мовою статті.
7. Основний текст статті.
8. Список літератури. \*
9. References
10. Розширена анотація і ключові слова англійською (українською) мовою.

Редакційна колегія Центральноукраїнського наукового вісника повідомляє, що всі статті які надходять перевіряються на плагіат системою Unicheck (<https://corp.unicheck.com>)

**Адреса для надсилання:** stat\_kntu@ukr.net, aulinvv@gmail.com

**ДОВІДКА ПРО АВТОРА**  
**українською та англійською мовами**

	Українською	Англійською
<b>Прізвище, ім'я, по-батькові:</b>		
<b>Місце роботи (повна назва, без аббревіатур), місто, країна:</b>		
<b>Посада (повна назва, без аббревіатур):</b>		
<b>Наукова ступінь:</b>		
<b>Вчене звання:</b>		
<b>Назва статті:</b>		
<b>*Спеціальність:</b>		
<b>Адреса для надсилання збірнику:</b>		
<b>Контактні телефони (бажано мобільний):</b>		
<b>E-mail:</b>		
<b>ORCID ID (XXXX-XXXX-XXXX-XXXX)</b>		

\* – 122 Комп'ютерні науки; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; 208 Агроінженерія

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВИЙ ВІСНИК.  
ТЕХНІЧНІ НАУКИ

**В и п у с к 7(38)**  
**Частина I**

Відповідальний за випуск С.В. Лисенко, О.П. Доренський

Комп'ютерна верстка І.М. Каліч

Тиражування О. Г. Каліч

*Приватне підприємство «Ексклюзив-Систем»  
Свідоцтво № ДК 4470 від 17.01.2013р.  
25006, м. Кіровоград, вул. Шевченка, 25  
тел./факс 24-35-53*

Підписано до друку 03.04.2023р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman. Офсетний друк. Умов. друк. арк. 38,75  
Тираж 300 прим. Зам. № 0792