

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки
Заснований у грудні 1996 р.

4/2022

Редакційна колегія:

Al-Azzeh J., д-р філософії, доцент (Йорданія)
Антонюк В. С., д-р техн. наук, професор
Артемчук В. О., д-р техн. наук, с.н.с.
Базіло К. В., д-р техн. наук, професор
Батраченко О. В., д-р техн. наук, доцент
Бондаренко М. О., д-р техн. наук, професор
Бондаренко Ю. Ю., канд. техн. наук, професор
Вамболь В. В., д-р техн. наук, професор
Вашенко В. А., д-р техн. наук, професор
Вітенько Т. М., д-р техн. наук, професор
Вербицький С. Б., канд. техн. наук
Вязовик В. М., д-р техн. наук, доцент
Гальченко В. Я., д-р техн. наук, професор
Гевод В. С., д-р хім. наук, доцент
Зайчук О. В., д-р техн. наук, професор
Заболотній С. В., д-р техн. наук, професор
Iavich M., д-р філософії, професор (Грузія)
Kažys R. J., д-р техн. наук, професор (Литва)
Коваленко І. Л., д-р техн. наук, професор
Лобода О. А., д-р хім. наук
Лукашенко В. М., д-р техн. наук, професор
Мусієнко М. П., д-р техн. наук, професор
Осипенко В. І., д-р техн. наук, професор
Палагін В. В., д-р техн. наук, професор
Півоваров О. А., д-р техн. наук, професор
Плахотний О. П., д-р техн. наук, доцент
Прокопенко Т. О., д-р техн. наук, професор
Ситник О. О., д-р техн. наук, професор
Скиба М. І., канд. техн. наук, доцент
Смотраєв Р. В., канд. техн. наук, доцент
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор
Сухенко В. Ю., д-р техн. наук, професор
Уткіна Т. Ю., канд. техн. наук, доцент
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор (гол. ред.)
Федоров Є. Є., д-р техн. наук, професор
Фролова Л. А., д-р техн. наук, професор
Хоменко О. М., канд. хім. наук, доцент
Яценко І. В., д-р техн. наук, професор

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський
державний технологічний університет

Свідоцтво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
КВ № 6061 від 16.04.2002.

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

- АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ
- ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
- ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Редакційна рада видання:

Григор О. О., д-р політ. наук, професор,
ректор Черкаського державного
технологічного університету (голова ради);
Гончаров А. В., канд. техн. наук, доцент,
перший проректор ЧДТУ;
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор,
проректор з науково-дослідної роботи
і міжнародних зв'язків ЧДТУ;
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор;
Литвин О. В., нач. ред.-видав. відділу ЧДТУ

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЧДТУ, к. 604/1, бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 51-36-71

vtn.chdtu.edu.ua (подання статей)

В.о. технічного секретаря **Ярослав Тарасенко**
e-mail: vtn@chdtu.edu.ua

4•2022

ВІСНИК

**Черкаського державного
технологічного університету**

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

**Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu**

TECHNICAL SCIENCE

4 • 2022

**Видання включене до Переліку
наукових фахових видань України
як фахове видання з технічних наук
(спеціальності 101, 113, 121, 122, 123, 125,
126, 131, 132, 133, 151, 152, 161, 172)
категорія «Б»
(накази МОНУ від 02.07.2020 №886,
від 24.09.2020 №1188)**

**Видання зареєстровано
у міжнародних наукометричних базах,
каталогах і системах пошуку:**
Index Copernicus Journals Master List,
BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref,
Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Eurasian Scientific Journal Index (ESJI),
ResearchBib – Academic Resource Index,
Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat,
Open Ukrainian Citation Index

Електронна версія:
vtn.chdtu.edu.ua; visnyk.chdtu.edu.ua

Затверджено вченою радою
Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 7 від 19.12.2022.

За повного або часткового
передрукування матеріалів
посилання на «Вісник Черкаського
державного технологічного
університету» є обов'язковим.

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<i>Bazilo C. V., Filimonov S. O., Filimonova N. V.</i> Rational shape of the tank of a small-sized ultrasonic system for the intensification of extraction process.....	5
<i>Філімонов С. О., Бачеріков Д. С.</i> Модель гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна.....	13

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Прокопенко Т. О., Поволоцький Я. О.</i> Система критеріїв оцінювання ефективності проєктів галузі інформаційних технологій	23
<i>Фауре Е. В., Скуцький А. Б., Лавданський А. О.</i> Імітаційна модель системи передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням даних у середовищі Simulink	31
<i>Ситник О. О., Кисельов В. Б., Кисельова Г. О., Костюченко В. І.</i> Математична модель надійності комп'ютерної техніки.....	48
<i>Дреєва Г. М., Дреєв О. М., Мелешко Є. В., Миронець І. В.</i> Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова	58

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

<i>Хоменко О. М., Кравченко Л. М., Жицька Л. І., Бондаренко Ю. Г.</i> Еколого-гігієнічна оцінка надходження нітратів в організм людини з питною водою	67
<i>Ущановський Д. Ю., Воробйова В. І., Плівак О. А., Мотронюк Т. І., Васильєв Г. С.</i> Обмеження нітратного електроліту міднення для швидкісного електрохімічного 3D-друку	77

CONTENTS

AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

<i>Bazilo C. V., Filimonov S. O., Filimonova N. V.</i> Rational shape of the tank of a small-sized ultrasonic system for the intensification of extraction process	5
<i>Filimonov S. O., Bacherikov D. S.</i> Model of screw linear piezoelectric motor.....	13

INFORMATION TECHNOLOGIES

<i>Prokopenko T. O., Povolotskyi Ya. O.</i> A system of criteria for evaluating the efficiency of projects in the field of information technologies	23
<i>Faure E. V., Skutskyi A. B., Lavdanskyi A. O.</i> Simulation model for information transmission system with non-separable data factorial coding in Simulink environment.....	31
<i>Sytnyk O. O., Kyselov V. B., Kyselova H. O., Kostiuchenko V. I.</i> Mathematical model of computer equipment reliability	48
<i>Drieieva H. M., Drieiev O. M., Meleshko Ye. V., Myronets I. V.</i> Software simulation model of computer network with multifractal traffic simulation based on Markov chain.....	58

CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING, ECOLOGICAL SECURITY

<i>Khomenko O. M., Kravchenko L. M., Zhitska L. I., Bondarenko Yu. G.</i> Environmental and hygienic assessment of nitrate entry into the human body with drinking water.....	67
<i>Ushchapovskyi D. Yu., Vorobyova V. I., Plivak O. A., Motronyuk T. I., Vasyliiev G. S.</i> Limitations of copper nitrate electrolyte for fast electrochemical 3D-printing.....	77

[0000-0002-1571-401X] **C. V. Bazilo**, Dr. Tech. Sc., Professor,
[0000-0003-1727-3286] **S. O. Filimonov**, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua
[0000-0003-0136-7587] **N. V. Filimonova**, Ph. D.
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

RATIONAL SHAPE OF THE TANK OF A SMALL-SIZED ULTRASONIC SYSTEM FOR THE INTENSIFICATION OF EXTRACTION PROCESS

Functional food products allow a person to maintain his/her health, as well as fully meet the physiological needs for energy and nutrients that the body uses to build cells, organs and tissues. Extraction is one of the most common methods used in the process of obtaining biologically active substances from plant or animal raw materials. Extraction efficiency can be increased by using intensifying methods used in the extraction process, such as ultrasound.

The paper considers the design and features of mathematical description of ultrasonic systems for the intensification of the extraction process, the principle of operation of which is based on the use of piezoelectric ultrasonic radiators. A computer model of an ultrasonic system to intensify the extraction process with a tank of different shapes has been built using the COMSOL Multiphysics software package, taking into account the full set of geometric, physical, mechanical and electrical parameters. As a result, the frequency is determined at which the maximum amplitudes of oscillations of ultrasonic systems with a tank in the form of a horn are provided for intensifying the extraction process, which leads to the implementation of the most efficient resonant mode of operation of the system. The locations of the maximum acoustic pressure on the object of extraction in an ultrasonic system to intensify the extraction process in the manufacture of concentrated drinks for functional purposes are determined.

Further research by the authors can be directed to the experimental studies of the horn-shaped ultrasonic system, as well as determining the most efficient tank geometry of the ultrasonic horn-shaped tank system using the COMSOL Multiphysics application package.

Keywords: piezoelectric element, ultrasonic system, extraction process, acoustic pressure, modelling.

Introduction. Today, functional food products, especially health-improving and preventive ones, with a high content of vitamins, trace elements, macronutrients, essential amino acids, and biologically active substances (BAS), are becoming more popular. Such products allow a person to maintain his/her health, as well as fully meet the physiological needs for energy and nutrients that the body uses to build cells, organs and tissues. Therefore, it is the food industry that is currently an important component of healthcare and occupies a special place in the field of intellectual and industrial human activity [1, 2]. According to the Law of Ukraine "On the quality and safety of food products and food raw materials", a functional food product is a food product that contains medicinal components and/or can be used to prevent or mitigate the course of human disease [3].

Extraction is one of the most common methods used in the process of obtaining biologi-

cally active substances from plant or animal raw materials. Extraction efficiency can be increased by using intensifying methods used in the extraction process, such as ultrasound.

One of the promising physical methods of influencing substances in order to intensify biotechnological processes is a method based on the use of acoustic vibrations of ultrasonic range [4].

All ultrasonic technologies are based on the effects of the interaction of ultrasound with the medium. Powerful ultrasound causes several specific effects in liquid media – cavitation, intense micro- and macro-flows, leading to rapid and high-quality mixing of medium components, the formation of stable emulsions, extraction of soluble components from particles that are in the liquid, the swelling and destruction of these particles [5]. Piezoelectric transducers are applied in the design and development of highly efficient ultrasonic systems for the intensification of biotechnological processes, which are widely used

in various fields of science and technology, in particular medicine. Piezoelectric transducers are widely used as sources of ultrasonic vibrations. The change of the characteristics of piezoelectric components can have technological and dimensional limitations, especially for mobile small-sized ultrasonic equipment. Modelling of their characteristics can drastically reduce the number of experiments that are necessarily performed during the development of new devices. Moreover, with the help of a mathematical model, it is possible to make a rational choice of production technology that is to choose from a number of technologies the least expensive one.

Problem statement. Extraction is one of the most common methods used in the process of obtaining biologically active substances from plant or animal raw materials. All extraction processes are limited by diffusion at the interface of the phases through the diffusion layer with the gradient of the concentrations of the extracted substance. The use of mixing devices does not significantly improve an interphase mass transfer.

Despite the rapid development of the production of synthetic food flavours, flavour additives, and nutraceuticals, a lot of biologically active substances are still obtained from natural plant or animal raw materials.

Extraction of biologically active substances is the most time-consuming stage of raw material processing. Traditional extraction methods often take hours, days, or even weeks. The use of ultrasound can significantly expedite the extraction process, increase the yield and reduce the cost of the extracted substance, improve working conditions and increase its productivity.

The possibilities of significantly increasing the efficiency of extraction technologies and devices through ultrasound are far from being depleted. This reduces the need for chemical additives, and new principles of radiator design decrease the credibility of the inactivation of biologically active substances.

Traditional extraction methods are very long and time-consuming. One of the promising methods is the use of ultrasonic extraction. It is necessary to find an individual approach to the choice of optimal modes of ultrasonic processing to achieve the maximum yield of valuable components in the liquid phase while maintaining their structure [5].

The use of ultrasound has significant advantages over traditional raw material processing

technologies. In particular, it provides deeper penetration of the solvent into the material with a cellular structure, reduces the processing time, provides a higher product yield and reproducibility, reduces solvent consumption, increases the speed of the process, and allows the extraction of thermolabile substances. The equipment does not require large maintenance costs, less energy is consumed for processing; as a result, the process becomes more environmentally friendly and economically justified.

Currently, ultrasonic equipment is underused due to the high cost, narrow specialization and low efficiency of previously developed large-sized industrial plants, the lack of small-sized high-efficiency ultrasonic devices for modern small and medium-sized industries, military units, and individual applications.

The development of ultrasonic technology is also hindered by the low awareness of consumers about the effectiveness of ultrasonic impacts and the lack of methodological recommendations that take into account the peculiarities of the use of ultrasonic technologies in small production.

Intensification of extraction by ultrasonic exposure can be achieved due to the following factors: acceleration of diffusion of interacting substances on the verge of separation of phases and liquid transfer inside the extracted material; violation of colloidal structures in the adjacent layer and reduction of viscosity in the volume of the medium. In this case, during the extraction process in a cavitating liquid, it is possible to increase the efficiency of the process.

Under the influence of ultrasonic vibrations, faster and more active destruction of intracellular tissues of plant raw materials occurs, which leads to an intensification of the extraction process and allows to increase the content of biologically active compounds in the solution. An increase in the coefficient of internal molecular diffusion under other equal conditions can be achieved by reducing the size of the extracted material.

Modern ultrasonic technologies are based on the use of two properties that certain materials have: piezoelectricity and magnetostriction. The works [6-8] consider the design of ultrasonic systems for the intensification of biotechnological processes, containing a piezoelectric ultrasonic generator, based on the generation of electrical oscillations of a certain frequency, which a mate-

rial with piezoelectric properties (transducer) transforms into mechanical oscillations. The papers [9-11] present the features of modelling ultrasonic systems for the intensification of cavitation processes, the principle of operation of which is based on the use of piezoelectric ultrasonic radiators. However, the considered works are not united by any systematic approach, they have the character of disparate episodes, on the basis of which it can be argued that at present there is a need to create a holistic technique for modelling of piezoelectric transducers, which could be used as a theoretical basis for calculating the characteristics and parameters of systems based on their basis. Thus, the relevance of the development of physically meaningful models of systems with piezoelectric transformations remains at the present time.

The **aim** of the work is to determine the rational shape of the tank of an ultrasonic system for the intensification of the extraction process.

To determine the rational shape of the tank of the ultrasonic system, it is necessary to perform the following tasks: create virtual models with different shapes of tanks similar to physical models and determine the acoustic pressure in the liquid.

Materials and methods. The COMSOL Multiphysics software has been used to create a virtual model and study the acoustic pressure during the operation of an ultrasonic system to intensify the extraction process [12].

Figure 1 shows the variants of the investigated axonometric models of an ultrasonic system for intensifying the extraction process in the manufacture of functional concentrated drinks with various tank options.

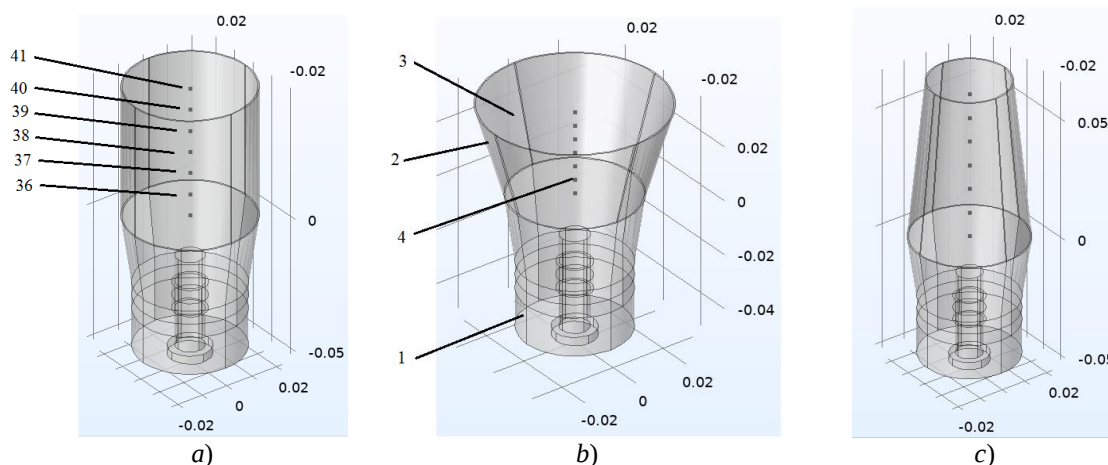


Figure 1. General view of axonometric models of ultrasonic systems for intensifying the extraction process with different shapes of tanks: a) of a cylindrical shape: 1 – ultrasonic radiator; 2 – tank, 3 – liquid, 4 – points where acoustic pressure is recorded (36-41 numbering of points corresponds to the numbering of the COMSOL Multiphysics model and is the same for all structures); b) in the form of a horn; c) in the form of a tapering horn

Details of a mathematical model that takes into account multiphysics processes described by a combination of various partial differential equations and some of the highlights of calculations using the Piezoelectric Effects module and the COMSOL Solid Mechanics and Electrostatics tools are detailed in [13, 14]. The analysis of the operation of the ultrasonic system for the intensification of the extraction process has been carried out in the Frequency response mode. The Pressure Acoustics, Frequency Domain module is used to determine the acoustic pressure. Acoustic-Structure Boundary is used to combine the above modules.

Direct is used as a resolver, in which the SPOULES numerical method is chosen for solving systems of linear equations with sparse matrices [15].

The dimensions of the tank shapes are chosen in such a way that the volume remains constant. For our case, it is $7,116 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$.

Tank dimensions: for the model with a tank in the form of a cylinder, the diameter is 45 mm, the height is 49 mm, the wall thickness is 1 mm; the horn-shaped tank model has a bottom diameter of 45 mm, a top diameter of 64 mm, a height of 33.2 mm, and a wall thickness of 1 mm; the tapering horn tank model has a diameter

of 45 mm, a top diameter of 32 mm, a height of 65.9 mm, and a wall thickness of 1 mm.

The dimensions of the ultrasonic transducer are the same for all models: waveguide diameter maximum is 55 mm, waveguide diameter minimum is 45 mm, waveguide length is 24 mm, reflector thickness is 12 mm, piezoelectric elements diameter is 45 mm, total length is 46 mm. The tank and the ultrasonic radiator are connected using epoxy glue. As a material for modelling a piezoelectric transducer, a brand of piezoceramics PZT-4 is used. The grade of the material of the waveguide and reflector of the ultrasonic radiator, as well as the tank corresponds to AISI 4340 steel. Water is used as a liquid.

When modelling an ultrasonic system to intensify the extraction process, the type of boundary conditions Fixed to the upper end of the tank is adopted. Electric potential 300 V is applied to the outer sides of piezoelectric elements, and the common "minus" (Ground) – to the sides of piezoelectric elements connected to each other. The polarization of piezoelectric parts is opposite.

The principle of operation of the ultrasonic system is as follows. When an alternating electrical voltage is applied to piezoelectric elements, mechanical vibrations occur, which are transmitted to the liquid tank, resulting in acoustic pressure in the liquid.

Numerical experiments and research results. An important step in obtaining reliable results of numerical simulation is the construction of a finite element model of the ultrasonic system design by introducing a mesh (Mesh), on which the results of calculations significantly depend. The computational mesh of finite elements is chosen with such conditions. We have used Lagrangian finite elements with elementary basis functions of the second order – Lagrange-Quadratic. The number of Lagrangian elements is 6 per local wavelength, which propagates in the structure and in water. The mesh is built by a tetragonal partition, a variant of one of which is shown in Figure 2.

The main resonance of the ultrasonic radiator used is designed for a frequency of 40 kHz. Since the strength of the acoustic impact directly depends on the choice of the operating (resonant) frequency of the ultrasonic emitter, the determination of the maximum acoustic pressure is carried out at frequencies in the range from 37 kHz

to 47 kHz, which is carried out using the Acoustic-Structure Boundary multiphysical connection, we determine the acoustic pressure in the control points according to Figure 1.

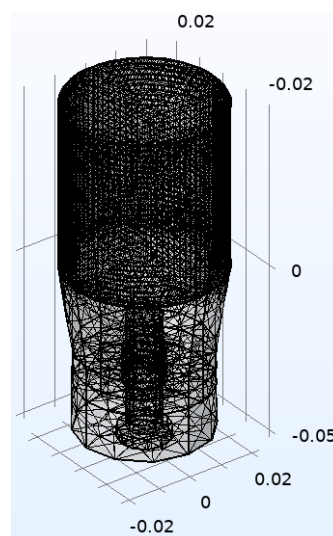


Figure 2. Finite element model of an ultrasonic system for intensifying the extraction process with a tank in the form of a cylinder

The results of simulation of the ultrasonic system for the model with a tank in the form of a cylinder are shown in Figure 3.

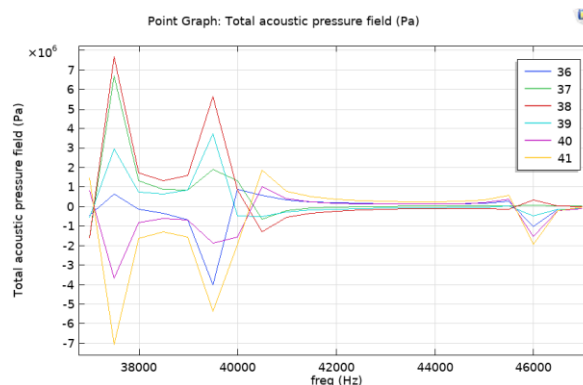


Figure 3. Frequency response of acoustic pressure in a tank in the form of a cylinder with liquid in an ultrasonic system

The results of simulation of the ultrasonic system for the model with a tank in the form of a horn and tapering horn are shown in Figures 4, 5.

Figures 3-5 show that the maximum sound pressure corresponds to frequencies of 37.5 kHz, 38 kHz, 39.5 kHz, 41 kHz and 45 kHz. It should be noted that values of acoustic pressure above zero correspond to the upward direction of the vector, and below zero – to the downward vector direction of the ultrasonic radiator.

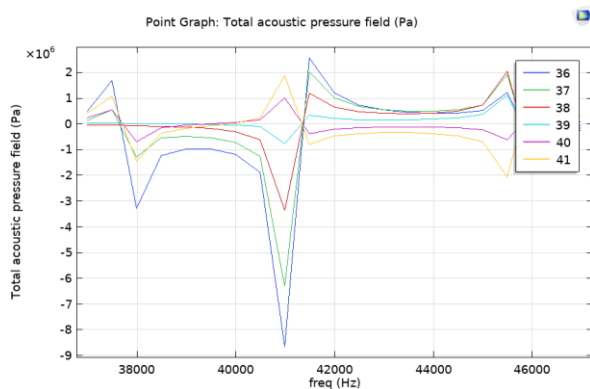


Figure 4. Frequency response of acoustic pressure in a tank in the form of a horn with liquid in an ultrasonic system

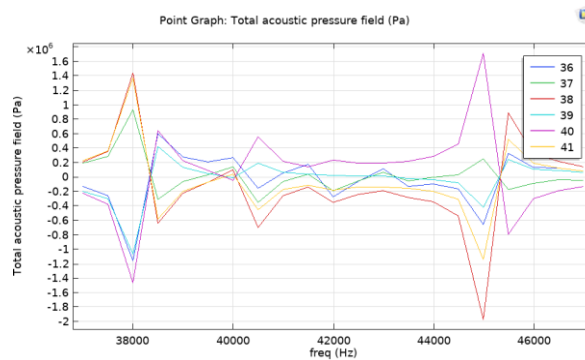


Figure 5. Frequency response of acoustic pressure in a tank in the form of a tapering horn with liquid in an ultrasonic system

In addition to graphical results in the calculation process, a visualization of the propagation of acoustic pressure is also obtained, which

is shown in Figure 6. These results are presented as a longitudinal section about the centre and correspond to the highest acoustic pressure.

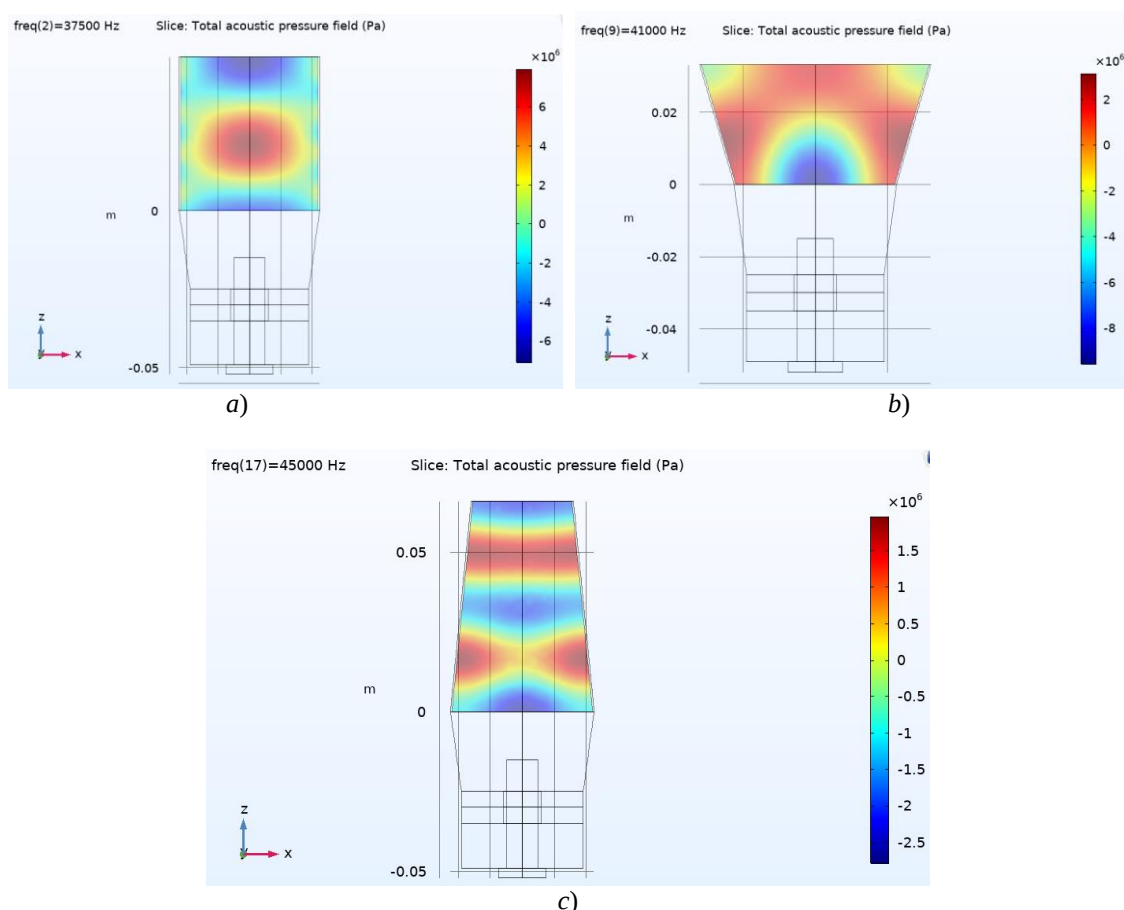


Figure 6. Results of numerical simulation to determine the acoustic pressure in ultrasonic systems with different shapes of the tank with liquid at frequencies: a) 37.5 kHz; b) 41 kHz; c) 45 kHz

From Figure 6 (on the scale on the right side) it can be seen that the highest acoustic pressure reaches $8.6 \cdot 10^6$ Pa at a resonance frequency of 41 kHz for the construction of an ultrasonic system with a tank in the form of a horn.

Discussion of results. It can be seen from the graphs that the maximum acoustic pressure: for an ultrasonic system with a tank in the form of a cylinder is observed at a frequency of 37.5 kHz and 39.5 kHz at points 38 and 41 and is $7.6 \cdot 10^6$ Pa and $5.6 \cdot 10^6$ Pa, respectively; for an ultrasonic system with a tank in the form of a horn is observed at a frequency of 41 kHz at point 36 and is $8.63 \cdot 10^6$ Pa; for an ultrasonic system with a tank in the form of a tapering horn is observed at frequency of 38 kHz and 45 kHz at point 38 and is $1.44 \cdot 10^6$ Pa and $1.96 \cdot 10^6$ Pa, respectively. This means that the intensification of the extraction process will be faster in an ultrasonic system with a tank in the form of a horn.

To test ultrasonic system for extraction, an experimental sample is developed (Figure 7). Cylindrical tank dimensions: diameter is 45 mm, height is 49 mm, wall thickness is 1 mm.



Figure 7. Experimental sample of ultrasonic system for extraction

The essence of the experiment is as follows. The tank is filled with liquid (water), and the object of extraction (propolis with a volume of 1 cm^3) is also placed there at a distance of 1 cm from the bottom. Then, a signal from a high-voltage generator with a frequency

of 38.5 kHz and an amplitude of 300 V is applied to piezoceramic elements of the ultrasonic system. As a result, mechanical vibrations have arisen, which are transmitted to the tank with liquid, as a result of which the propolis extraction process takes place. The test results of the experimental sample have confirmed the operability of the developed design.

Conclusions. The design of tanks of ultrasonic systems, the principle of operation of which are based on the use of piezoelectric ultrasonic radiators, for increasing acoustic pressure to intensify the extraction process is considered.

The scientific novelty of the work lies in the improvement of the computer model of the ultrasonic system for intensifying the extraction process using the COMSOL Multiphysics software package, taking into account the full set of geometric, physical, mechanical and electrical parameters.

The practical value of the work is as follows:

- the rational shape of the tank of the ultrasonic system and the frequency at which the maximum acoustic pressure of ultrasonic systems is provided for the intensification of the extraction process have been determined, which leads to the implementation of the most efficient resonant mode of operation of the system;
- places of concentration of maximum acoustic pressure on the extraction object in the ultrasonic system to intensify the extraction process have been defined;
- the obtained data can be used in the design of devices based on ultrasonic radiating systems to intensify the extraction process in the production of functional concentrated beverages.

Further research by the authors may be aimed at experimental studies of the horn-shaped ultrasonic system, as well as determining the most efficient tank geometry of the ultrasonic horn-shaped tank system using the COMSOL Multiphysics application package.

References

- [1] N. O. Stetsenko, *Technology of Health Drinks and Phyto-Concentrates*. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 2018 [in Ukrainian].

- [2] A. I. Ukrainets, and H. O. Simakhina, *Technology of Health Food Products*. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 2009 [in Ukrainian].
- [3] On amendments to the Law of Ukraine "On the quality and safety of food products and food raw materials", *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, no. 50, 2005. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2809-15#Text>. Accessed on: Oct. 22, 2022 [in Ukrainian].
- [4] C. V. Bazilo, V. M. Zaika, and Yu. Yu. Bondarenko, "Peculiarities of using ultrasound for intensification of biochemical processes in pharmaceuticals", in *Abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference "Sensors, Devices and Systems – 2017"*. Cherkasy – Mykolayiv – Kherson – Lazurne, 2017, pp. 56–57.
- [5] D. Panda, and S. Manickam, "Cavitation technology – the future of greener extraction method: A review on the extraction of natural products and process intensification mechanism and perspectives". *Applied Sciences*, vol. 9 (4), 766, 2019. doi: 10.3390/app9040766.
- [6] K. G. Zinoviadou, C. M. Galanakis, M. Brnčić et al., "Fruit juice sonication: Implications on food safety and physicochemical and nutritional properties", *Food Research International*, vol. 77, part 4, pp. 743-752, 2015. doi: 10.1016/j.foodres.2015.05.032.
- [7] M. Abid, S. Jabbar, T. Wu, M. M. Hashim et al., "Effect of ultrasound on different quality parameters of apple juice", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 20, iss. 5, pp. 1182-1187, 2013. doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.02.010.
- [8] Y. Poodi, M. Bimakr, A. Ganjloo, and S. Zarringhalami, "Intensification of bioactive compounds extraction from Feijoa (*Feijoa sellowiana* Berg.) leaves using ultrasonic waves", *Food and Bioproducts Processing*, vol. 108, pp. 37-50, 2018. doi: 10.1016/j.fbp.2017.12.004.
- [9] Z. Shen, J. Xu, Z. Li, Y. Chen, Y. Cui, and X. Jian, "An improved equivalent circuit simulation of high frequency ultrasound transducer", *Front. Mater.*, vol. 8, 663109, 2021. doi: 10.3389/fmats.2021.663109.
- [10] W. Tangsopha, J. Thongsri, and W. Busayaporn, "Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency", in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075747.
- [11] M. S. Mat-Shayuti, T. M. Y. S. Tuan Ya, M. Z. Abdullah et al., "Simulations of different power intensity inputs towards pressure, velocity & cavitation in ultrasonic bath reactor", *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, pp. 57-62, 2020. doi: 10.1016/j.sajce.2020.06.002.
- [12] L. Wang, L. Zhao, Z. Jiang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019. doi: 10.1063/1.5119328.
- [13] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [14] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *J. Nano-Electron. Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018. doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [15] B. Behera, abd H. B. Nemade, "Investigating translational motion of a dual friction-drive surface acoustic wave motor through modeling and finite element simulation", *Simulation*, vol. 95 (2), pp. 117-125, 2019. doi: 10.1177/0037549718778770.

[0000-0002-1571-401X] **К. В. Базіло**, д-р техн. наук, професор,
[0000-0003-1727-3286] **С. О. Філімонов**, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: s.filimonov@chdtu.edu.ua
[0000-0003-0136-7587] **Н. В. Філімонова**, канд. техн. наук
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

РАЦІОНАЛЬНА ФОРМА РЕЗЕРВУАРУ МАЛОГАБАРИТНОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАКЦІЇ

Сьогодні популярнішими стають харчові продукти функціонального призначення, зокрема оздоровчого та профілактичного, з підвищеним вмістом вітамінів, мікроелементів, макроелементів, незамінних амінокислот та біологічно активних речовин. Такі продукти дають людині змогу зберігати своє здоров'я, а також повністю задовольнити фізіологічні потреби в енергії та харчових сполуках, якими користується організм для побудови клітин, органів і тканин.

Екстракція – один з найбільш поширених методів, використовуваних у процесі отримання біологічно активних речовин з рослинної або тваринної сировини. Ефективність екстракції може бути збільшена, використовуючи інтенсифікуючі методи впливу, що застосовуються в процесі екстракції, наприклад ультразвук.

В роботі розглянуто конструкцію резервуарів ультразвукових систем для збільшення акустичного тиску при інтенсифікації процесу екстракції, принцип дії яких базується на використанні п'єзоелектричних ультразвукових випромінювачів.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні комп'ютерної моделі ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції за допомогою пакета програм COMSOL Multiphysics, враховуючи повний набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів. Практична цінність роботи полягає у визначенні раціональної форми резервуару ультразвукової системи та частоти, при якій забезпечуються максимальний акустичний тиск ультразвукової системи для інтенсифікації процесу екстракції, що приводить до реалізації найбільш ефективного резонансного режиму роботи системи. Отримані дані можуть бути використані при проектуванні пристроїв на основі ультразвукових випромінюючих систем для інтенсифікації процесу екстракції при виготовленні концентрованих напоїв функціонального призначення. Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на експериментальні дослідження ультразвукової системи у формі рупора.

Ключові слова: п'єзоелемент, ультразвукова система, процес екстракції, акустичний тиск, моделювання.

УДК 534.133

[0000-0003-1727-3286] **С. О. Філімонов**, канд. техн. наук, доцент,
[0000-0002-6854-8676] **Д. С. Бачеріков**, аспірант

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МОДЕЛЬ ГВИНТОВОГО ЛІНІЙНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

Тема рідких добрив в Україні – це тренд останніх кількох років. Внесення рідких мінеральних добрив замість гранульованих під час сівби набуває популярності серед українських сільгоспвиробників. Ця технологія особливо актуальна, на думку експертів, у регіонах із дефіцитом вологи, а також у тих господарствах, де практикується ресурсозберігаюче землеробство. Багато виробників сільгосптехніки сьогодні йдуть шляхом модернізації існуючих моделей ґрунтообробних та посівних машин додатковим обладнанням для внесення рідких добрив. Оснащення передбачає встановлення на раму агрегату спеціальних ємностей для робочого розчину. При цьому, до кожного сошника підводяться широкі шланги, які за допомогою насосів подають добрива. Таким чином, внесення рідких добрив відбувається разом з висівом насіння, за рахунок спеціальних дозаторів.

В роботі запропоновано та виготовлено нову конструкцію дозатора з п'єзокерамічним двигуном. У дослідному зразку використовується нове технічне рішення стосовно регулювання норми вливу.

Розроблено еквівалентну електричну модель гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна на основі методу електромеханічних аналогій, яка дозволить швидше розробити схему керування (драйвера). За допомогою розробленої еквівалентної електричної моделі гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна отримано амплітудно-частотні характеристики біморфних п'єзоелементів двигуна при збудженні одного біморфного п'єзоелемента. Отримані дані показали, що зменшився вплив коливання одного біморфного п'єзоелемента на інші за рахунок зменшення ребер жорсткості.

Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні дозаторів для вливу рідких добрив з п'єзокерамічним двигуном.

Ключові слова: автоматизація, приладобудування, сільгосптехніка, дозатор, рідкі добрива, п'єзоелектричний двигун, біморфний п'єзоелемент.

Вступ. Переважна більшість господарств України використовує сухі добрива в своїх технологіях вирощування рослин, однак, попри це, популярність рідких добрив зростає.

Тема рідких добрив в Україні – це тренд останніх кількох років. Внесення рідких мінеральних добрив замість гранульованих під час сівби набуває популярності серед українських сільгоспвиробників (рисунк 1) [1]. Ця технологія особливо актуальна, на думку експертів, у регіонах із дефіцитом вологи, а також у тих господарствах, де практикується ресурсозберігаюче землеробство.

Інтерес сільгоспвиробників до використання рідких мінеральних добрив зростає з кожним роком [2, 3]. Це пов'язано з тим, що їх виробництво обходиться дешевше й вони краще розподіляються при підґрунтовому внесенні.

Крім того, в рідких добривах менше токсичних для рослини речовин. Наприклад, при гранулюванні сечовини утворюється біурет, кількість якого визначається прямою залежністю від температури й часу нагрівання.

Саме рідкі добрива найбільш ефективно засвоюються з погляду біології: рідка форма є найбільш доступною для рослин, особливо в посуху.

Безумовно, внесені традиційно у вигляді гранул добрива мають спочатку розчинитися у воді, і тільки після цього вони зможуть поглинатися й успішно працювати на ріст і розвиток рослини [4]. Особливо добре рідка форма працює на старті росту, до того ж, у ній вища концентрація діючої речовини, в той час як вартість таких добрив трохи нижча, ніж гранульованих (виключаються витрати на сушіння й т. ін.).

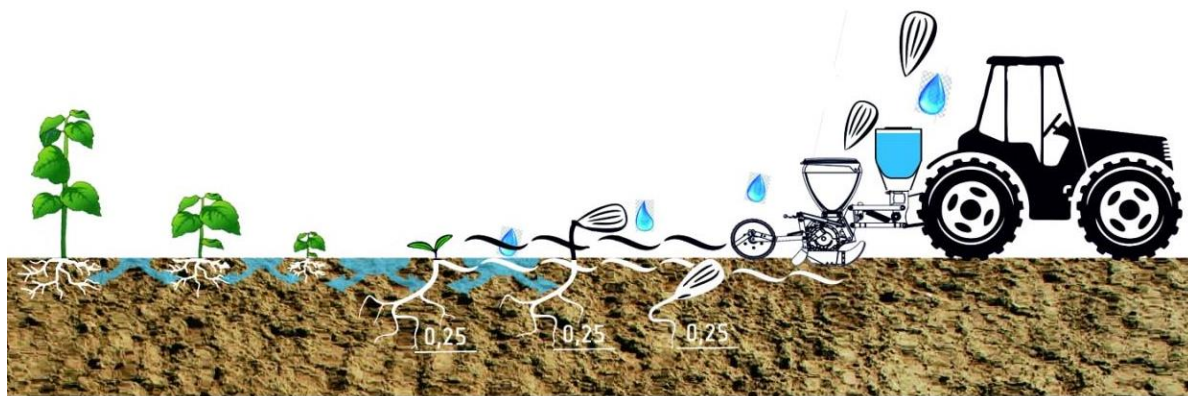


Рисунок 1. Внесення рідких добрив під час посіву [1]

Більше того, якщо гранула розкладається й стає корисною впродовж приблизно п'яти днів, то внесена в рідкому вигляді та сама речовина, наприклад азот, починає працювати вже на другий день. Відповідно, рослина раніше отримує живлення.

Сьогодні рідкі мінеральні добрива на ринку представлені у вигляді безводного аміаку (який можна швидше віднести до газоподібної форми), аміачної води, комплексних добрив (РКД) і КАС (карбамідно-аміачної суміші).

КАС переважно використовують як азотне добриво, оскільки воно містить всі три форми азоту: амідну (NH_2), амонійну (NH_4) та нітратну (NO_3) [5]. І, відповідно, таке добриво має пролонговану дію. При внесенні у ґрунт таких рідких добрив створюється поживний запас для рослини приблизно на місяць, відтак вона може витратити його під час вегетації поступово.

Як показали дослідження, втрати азоту при внесенні КАС не перевищують 10 % від його загальної кількості, в той час як при внесенні гранульованих азотних добрив вони досягають 30–40 %. Крім того, науково доведено, що звичайні азотні добрива мають коефіцієнт корисної дії (ККД) усього 65–85 %, а ефективність рідких добрив значно вища. До того ж, цей вид внесення добрив забезпечує гарний розвиток кореневої системи й ідеально підходить для мульчування та прямої сівби, оскільки добрива досягають кореневої зони й не зв'язуються вільними органічними частками [6].

Багато виробників сільгосптехніки сьогодні йдуть шляхом модернізації існуючих моделей ґрунтообробних та посівних машин

додатковим обладнанням для внесення рідких добрив [7]. Оснащення передбачає встановлення на раму агрегату спеціальних ємностей для робочого розчину. При цьому, до кожного сошника підводяться широкі шланги, які за допомогою насосів подають добрива. Таким чином, внесення рідких добрив відбувається разом з висівом насіння. Деякі виробники готові постачати це обладнання в опції до культиваторів і сівалок. Існують також окремі спецкомплекти для самостійного оснащення агрегатів.

Найбільш відомими виробниками спеціального обладнання та техніки для внесення рідких добрив є бренди: Precision Planting, Raven, Hexagon, JohnDeere, Amazone, Jacto, Fast, Fliegl, Vredo, Hi-Spec, Boguslav [8].

На рисунку 2 зображено схему сучасної системи внесення рідких добрив від компанії Precision Planting [9]. Ця система монтується на сівалку та використовується для внесення стартових рідких добрив в момент посіву різних культур для швидкого розвитку рослини.

Механізатор задає необхідну норму внесення (л/га) на панелі оператора та починає рух [10].

Системний насос 4 качає рідину з бака в колектор 12 через головний витратомір 5. У колекторі рідина рівномірно розподіляється між секціями, проходячи через секційні витратоміри 10 (vApplyHD модуль), клапани 6, та дозуючі шайби 18.

Постійна норма внесення добрив і точність дозування досягаються завдяки управлінню продуктивністю системного насоса 4, яким керує контролер. Контролер керує насосом залежно від швидкості агрегату і витрати рідини через головний витратомір 5.

Секційні витратоміри 10 працюють незалежно і служать для контролю рівномірності внесення добрив. Їх чутливість дозволяє контролювати відхилення навіть у кілька відсотків.

Клапан на виході з секційного витратоміра 6 призначений підтримувати залишковий тиск у системі для виключення витікання рідини з бака під власною вагою, після відключення насоса [9].

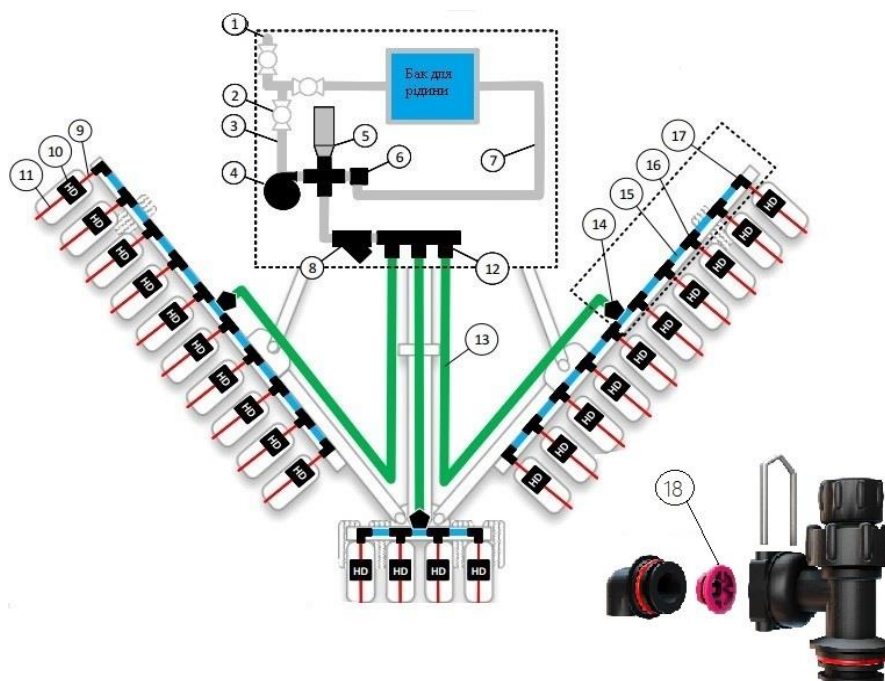


Рисунок 2. Схема сучасної системи внесення рідких добрив від компанії Precision Planting:

- 1 – розподільник; 2 – запірний клапан; 3 – шланг подачі; 4 – системний насос;
5 – головний витратомір; 6 – клапан скидання тиску; 7 – зворотний шланг; 8 – набір фільтрів;
9 – трубка ряду; 10 – vApplyHD модуль; 11 – напірна трубка; 12 – секція колектора;
13 – секційний шланг; 14 – розподільник; 15 – шланг-подовжувач; 16 – розподільник на секцію;
17 – заглушка секції; 18 – дозуюча шайба [9]

Постановка проблеми. Запропоновано конструкцію дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном, з більш точним

позиціонуванням і нормою виливу. Структурну схему його використання в системі виливу зображено на рисунку 3.

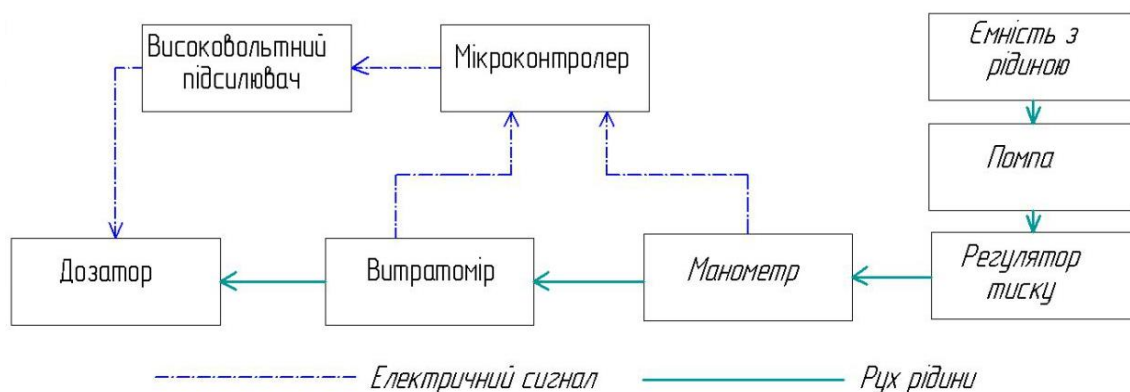


Рисунок 3. Структурна схема системи виливу

Із рисунка 3 видно, що головним елементом системи виливу є дозатор. На рисунку 4 представлено загальний вигляд розробленої

конструкції дозатора, в якій основною складовою є гвинтовий п'єзокерамічний двигун.

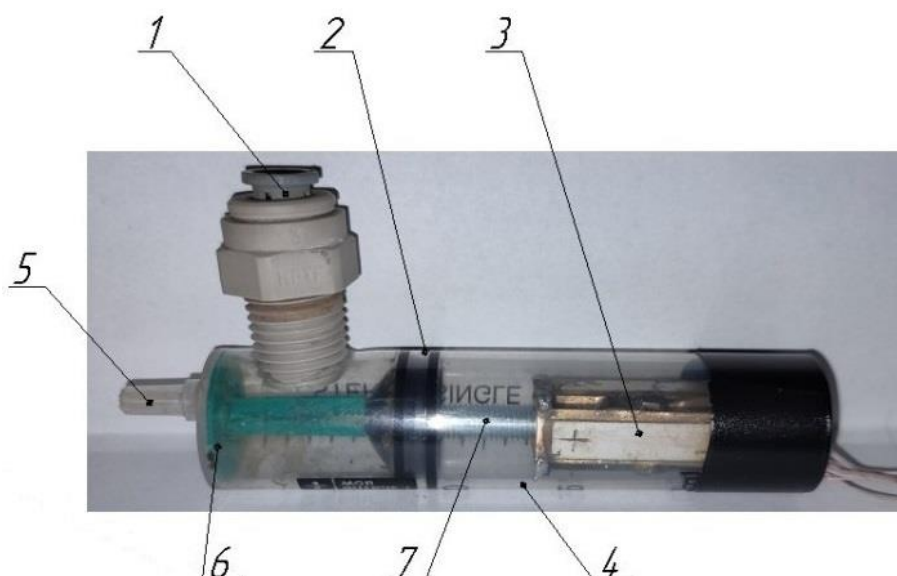


Рисунок 4. Конструкція дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном:

1 – подача рідини; 2 – сальник; 3 – розроблений гвинтовий п'єзокерамічний двигун; 4 – корпус дозатора;
5 – вихід рідини; 6 – змінні шайби дозатора; 7 – вал

За рахунок точного позиціонування гвинтового лінійного п'єзокерамічного двигуна на основі біморфних п'єзоелементів здійснюється точне регулювання та дозування норми виливу, що, в свою чергу, не призводить до перевитрат бюджету та рідких добрив і дає економічний ефект. Дозуюча шайба призначена для створення тиску в магістралі та рівномірного розподілу рідини по секціях.

Змінні шайби дозатора залежно від культури, яка вирощується, дають змогу підбирати потрібну норму виливу рідких добрив. Потрібна норма рідких добрив дасть змогу забезпечити задовільну вегетацію рослини, що, в свою чергу, покращить врожай. Використання розробленої конструкції дозатора з гвинтовим п'єзокерамічним двигуном є ефективним та економічно вигідним. Однією із важливих проблем використання п'єзокерамічних двигунів є узгодження зі схемою керування (драйвером). Таким чином, узгодження п'єзокерамічного двигуна зі схемою керування є актуальним завданням.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення моделі гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна на основі методу електромеханічних аналогій.

Для побудови моделі гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна на основі

методу електромеханічних аналогій необхідно виконати такі задачі: розробити еквівалентну електричну схему (модель) для п'єзокерамічного двигуна на основі біморфних п'єзоелементів (БПЕ); провести моделювання еквівалентної схеми, що відповідає параметрам реальних БПЕ та пружних елементів; визначити амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) біморфних п'єзоелементів двигуна при збудженні БПЕ.

Виклад основного матеріалу. На рисунку 5 зображено конструкцію гвинтового п'єзокерамічного двигуна з використанням біморфних п'єзоелементів [11].

Принцип роботи двигуна полягає в наступному. При подачі змінної двофазної електричної напруги одна з них подається на пару протилежних пластин біморфних п'єзоелементів, а інша з фазою, що зсунута на 90° , – на другу пару протилежних аналогічних біморфних п'єзоелементів. Загальний «мінус» сигналів під'єднаний до латунних пластин. Такий спосіб збудження приводить до виникнення механічних коливань, які передаються металевій гайці. В результаті ходовий вал обертається і лінійно переміщується щодо металевої гайки. Змінюючи зсув фаз напруги, можна змінювати напрямок руху гвинта.

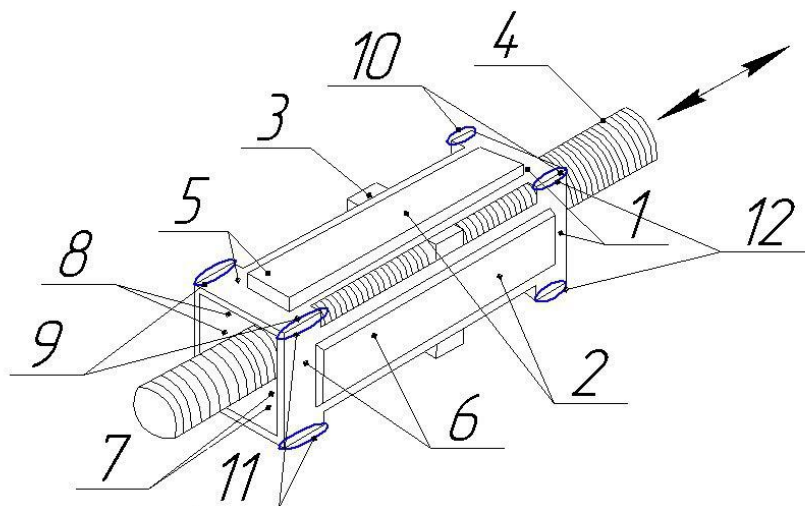


Рисунок 5. Конструкція п'єзоелектричного двигуна з використанням біморфних п'єзоелементів:

1 – латунні пластини; 2 – п'єзоелементи; 3 – чотиригранна металева гайка; 4 – ходовий вал;

5 – біморфний п'єзоелемент 1 (БПЕ 1); 6 – біморфний п'єзоелемент 2 (БПЕ 2);

7 – біморфний п'єзоелемент 3 (БПЕ 3); 8 – біморфний п'єзоелемент 4 (БПЕ 4);

9-10 – згинальні жорсткості пружних пластин; 11-12 – згинальні жорсткості пружних пластин [11]

Для побудови моделі використовують метод електромеханічних аналогій [12-14]. Метод електромеханічних аналогій є зручним засобом дослідження внутрішньої структури механічних систем та елементів. Цей метод дозволяє замінити рівняння руху цієї механічної системи відповідними рівняннями для еквівалентної електричної схеми. Найчастіше

завдання полягає у вивченні деякого еквівалентного коливального контуру.

Еквівалентну електричну схему (модель) п'єзокерамічного двигуна на основі біморфних п'єзоелементів, складену з використанням пакета програм для автоматизованого проєктування електронних схем Proteus, зображено на рисунку 6.

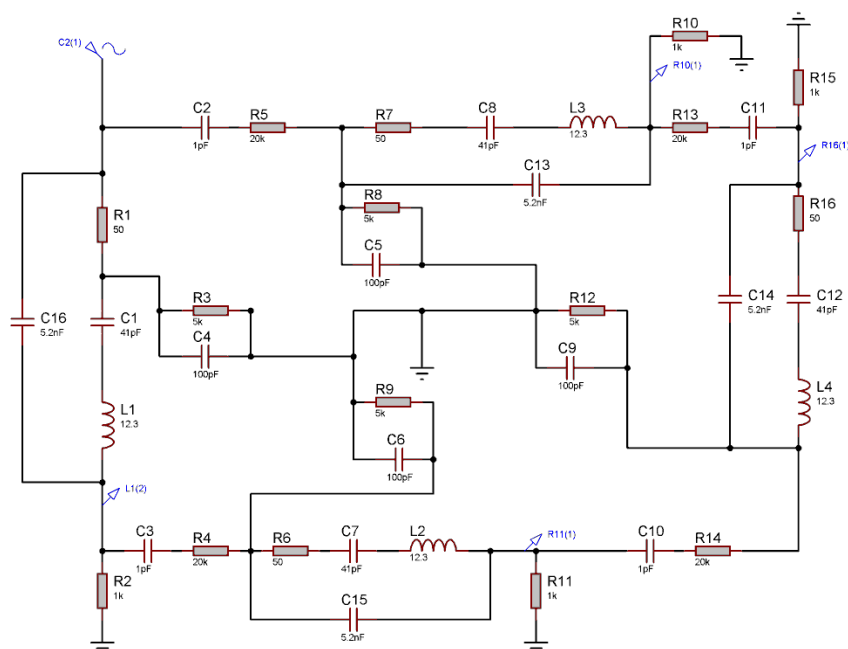


Рисунок 6. Еквівалентна електрична схема гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна побудована на основі методу електромеханічних аналогій

Конструкцію двигуна можна представити як суму послідовних коливальних контурів. Коливальні контури R1-C1-L1-C16, R6-C7-L2-C15, R16-C12-L4-C14, R7-C8-L3-C13 відповідають біморфним п'єзоелементам 1-4 на рисунку 5. Біморфні п'єзоелементи 1-4 пов'язані один з одним пружним зв'язком (латунні пластини 1) із втратами, які представлені елементами R5-C2, R13-C11, R14-C10, R4-C3 та які частково характеризують металеві пластини біморфних п'єзоелементів 1-4. Елементи, які на еквівалентній електричній схемі показані як R3-C4, R8-C5, R12-C9, R9-C6, характеризують пружне з'єднання біморфних п'єзоелементів з гайкою 3, по якій рухається вал 4.

Результати досліджень. Ступінь загасання коливаний пари протилежних біморфних п'єзоелементів визначається за допомогою наведених нижче формул:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)x = A \sin(\omega t), \quad (1)$$

де m – маса двигуна; γ – коефіцієнт дисипації; k_1, k_3 – згинальні жорсткості БПЕ 1 і БПЕ 3 відповідно; k_2, k_4 – згинальні жорсткості пружних пластин 9 та 10; A – сила, прикладена до біморфного п'єзоелемента:

$$A = \frac{U \cdot C}{d_{31}}, \quad (2)$$

(U – прикладена напруга, C – ємність між електродами п'єзоелемента, d_{31} – п'єзомодуль); ω – частота коливання біморфного п'єзоелемента.

$$k_{1,3} = 3 \left[\lambda_B L^3 + (L-l)\Delta \right]^{-1};$$

$$\Delta = \lambda_M - \lambda_B;$$

$$\lambda_M = (E_M J_M)^{-1};$$

$$J_M = \frac{bh_M^3}{12}; \quad (3)$$

$$\lambda_B = \frac{12}{b \left(E_M h_M^3 + E_{II} h_{II}^3 \left(1 + 3 \left(1 + \frac{h_M}{h_{II}} \right)^2 \right) \right)}, \quad (4)$$

де E_M і E_{II} – модулі пружності пластини та п'єзоелемента; h_M і h_{II} – товщини металевої пластини та п'єзоелемента; b – ширина металевої пластини та п'єзоелемента; L, l – довжина металевої пластини та п'єзоелемента.

$$k_{2,4} = \frac{E_{M1} t^3 \cdot h}{4L^3}, \quad (5)$$

де E_{M1} – модуль пружності металевої пластини; t – товщина пластини; h – ширина пластини; L – довжина пластини.

На рисунку 7 зображено амплітудно-частотні характеристики біморфних п'єзоелементів при збудженні одного з БПЕ, отримані за допомогою еквівалентної електричної схеми в пакеті програми Proteus.

Моделювання проводилося при параметрах еквівалентної схеми, які відповідають параметрам реальних БПЕ та пружних елементів.

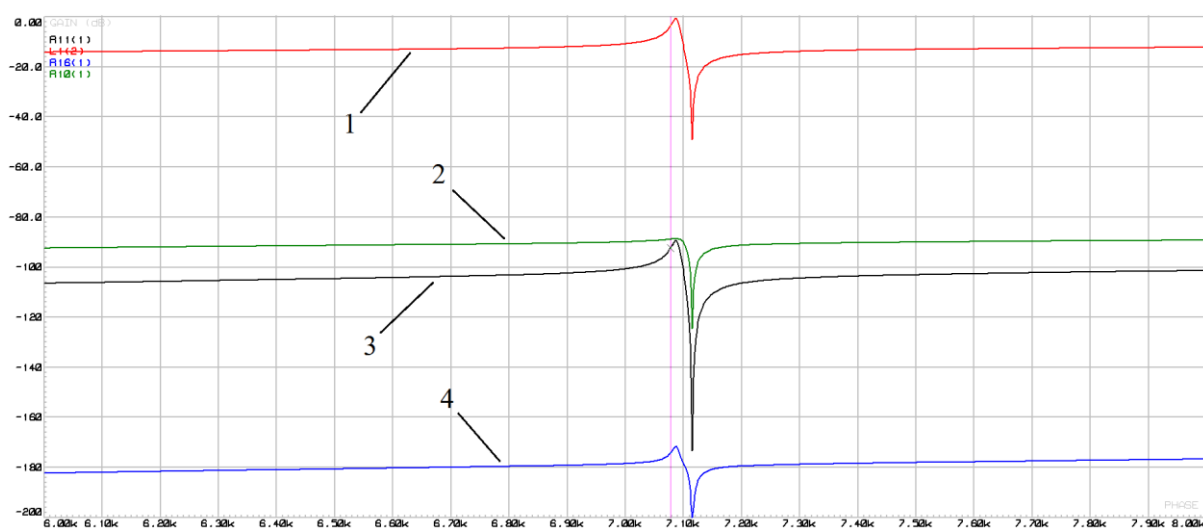


Рисунок 7. Амплітудно-частотні характеристики біморфних п'єзоелементів двигуна при збудженні БПЕ 1: 1) АЧХ БПЕ 4; 2) АЧХ БПЕ 1; 3) АЧХ БПЕ 3; 4) АЧХ БПЕ 2

Обговорення результатів. Як видно з рисунка 7, коливання БПЕ 1 не істотно впливають на інші біморфні п'єзоелементи двигуна (рисунок 5). Також зменшився вплив коливання одного біморфного п'єзоелемента на інші за рахунок зменшення ребер жорсткості [15], що дає змогу всім біморфним п'єзоелементам коливатись одночасно. Отримана резонансна частота з графіка АЧХ (рисунок 7) становить 7110 Гц. Вони практично збігаються з отриманими даними обчислень за допомогою модуля Piezoelectric Effects COMSOL та інструментів Solid Mechanics and Electrostatics [16-18] і становлять 7180 Гц, які наведені в роботі [19]. Отже, експериментальні дослідження підтверджують працездатність еквівалентної схеми заміщення, яка побудована на основі методу електромеханічних аналогій.

За результатами проведеного комп'ютерного моделювання отримано амплітудно-частотні характеристики біморфних п'єзоелементів двигуна при збудженні БПЕ 1, отримана основна резонансна частота становить 7110 Гц.

Окрім цього, з графіка АЧХ також видно, що зменшився вплив коливання одного біморфного п'єзоелемента на інші за рахунок зменшення ребер жорсткості, що дає змогу всім біморфним п'єзоелементам коливатись більш незалежно один від одного.

Отримані дані дозволяють швидше розробити схему керування (драйвера) для гвинтового лінійного п'єзоелектричного двигуна.

Висновки. Проаналізовано альтернативний напрям використання гвинтового п'єзокерамічного двигуна. Виявлено його переваги та недоліки.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні моделі гвинтового п'єзокерамічного двигуна на основі методу електромеханічних аналогій.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

– побудована модель за допомогою методу електромеханічних аналогій дозволяє прискорити узгодження п'єзокерамічного двигуна зі схемою керування, що підвищить ефективність роботи гвинтового п'єзокерамічного двигуна;

– результати досліджень можуть бути використані при проектуванні гвинтових п'єзокерамічних двигунів.

Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на розробку схеми керування п'єзокерамічного двигуна та створення моделей біморфних п'єзоелементів п'єзокерамічного двигуна для отримання більшого обертового моменту.

Список використаних джерел

- [1] "Внесення рідких добрив із посівом". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.agronom.com.ua/vnesennya-ridkyh-dobryv-iz-posivom/>. Дата звернення: Листоп. 04, 2022.
- [2] Б. С. Носко, В. В. Медведєв, та О. П. Непочатов, "Роль добрив у підвищенні ефективності землеробства в посушливих умовах", *Вісник аграрної науки*, № 5, с. 11-15, 2000.
- [3] Г. М. Господаренко, *Розробка та обґрунтування інтегрованої системи удобрення в польовій сівозміні на чорноземі опідзоленому Правобережного Лісостепу України*. Київ, Україна: НАУ, 2001.
- [4] В. В. Гамаюнова, *Ефективність зрошення та вплив добрив на використання води рослинами і підвищення стійкості землеробства зони степу*. Харків, Україна: Стильна типографія, 2018, с. 108-126.
- [5] Є. Дудкіна, "Карбамідно-аміачна суміш (КАС)", *Агроном*, № 1 (лютий), с. 20-22, 2013.
- [6] Н. А. Пасічник, та Н. А. Марчук, "Застосування КАС для підживлення пшениці озимої на лучно-чорноземному карбонатному ґрунті", *Вісник ХНАУ*, № 1, с. 140-143, 2013.
- [7] В. О. Кудря, та І. П. Прокоп'єв, "Технічні засоби для внесення рідких добрив та перспективи їх розвитку", *Механізація та електрифікація сільського господарства: міжвідомч. темат. наук. зб. НААН ННЦ «ІМЕСГ»*, Глеваха, вип. 96, с. 201-208, 2012.
- [8] "Техніка для внесення рідких добрив. Що, як і чим?" [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://traktorist.ua/articles/tehnika-dlya-vnesennya-ridkih-dobriv-shcho-yak-i-chim>. Дата звернення: Листоп. 08, 2022.
- [9] "vApplyHD Plumbing Overview and Recommendations". [Online]. Available: <https://docplayer.net/51852206-Plumbing->

- overview-and-recommendations.html. Accessed on: Nov. 09, 2022.
- [10] "vApplyHD Operator's Guide Gen2 2020 SeedSense Displays". [Online]. Available: https://support.surefireag.com/media/documents/vApply_Operators_Guide_955656_F8hygup.pdf. Accessed on: Nov. 03, 2022.
- [11] С. О. Філімонов, Н. В. Філімонова, та Д. С. Бачеріков, "Використання п'єзоелектричного двигуна в агросфері", на *Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конф. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку*, 2020, с. 15-17.
- [12] Л. А. Островский, *Основы общей теории электроизмерительных устройств*. Ленинград: Энергия, 1971.
- [13] V. M. Sharapov, S. A. Filimonov, Z. V. Sotula, L. G. Kunitskaya, and V. M. Zaika, "Improvement of piezoceramic scanners", in *2013 IEEE 33rd Int. Sci. Conf. Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2013: Conf. Proc.*, 2013, 6552063, pp. 144-146.
- [14] В. М. Шарапов, О. М. Гуржій, та С. А. Філімонов, "Трикоординатний п'єзокерамічний сканер на біморфних п'єзоелементах для зондового наномікроскопа", *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, № 4 (70), с. 13-15, 2007.
- [15] C. Bazilo, S. Filimonov, N. Filimonova, and D. Bacherikov, "Determination of geometric parameters of piezoceramic plates of bimorph screw linear piezo motor for liquid fertilizer dispenser", in *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, Z. Hu, S. Petoukhov, M. Yanovsky and F. He, Eds., vol. 463. Springer, Cham, pp. 84-94, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-03877-8_8.
- [16] L. Wang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019. doi: 10.1063/1.5119328.
- [17] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [18] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Nano-Electron. Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018. doi: 10.21272/jnep.10 (4).04025.
- [19] V. Halchenko, D. Bacherikov, S. Filimonov, and N. Filimonova, "Improvement of a linear screw piezo motor design for use in accurate liquid dosing assembly", in *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos and Y. Tsegelnyk, Eds., vol. 536. Springer, Cham. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_22.

References

- [1] "Application of liquid fertilizers with sowing". [Online]. Available: <https://www.agronom.com.ua/vnesennya-ridkyh-dobryv-iz-posivom/>. Accessed on: Nov.04, 2022 [in Ukrainian].
- [2] B. S. Nosko, V. V. Medvedev, and O. P. Nepochatov, "The role of fertilizers in increasing the efficiency of agriculture in arid conditions", *Visnyk ahrarnoi nauky*, no. 5, pp. 11-15, 2000 [in Ukrainian].
- [3] H. M. Gospodarenko, *Development and substantiation of an integrated system of fertilization in field crop rotation on chernozem asolized in the Right Bank Forest Steppe of Ukraine*. Kyiv, Ukraine: NAU, 2001 [in Ukrainian].
- [4] V. V. Gamayunova, *Irrigation efficiency and the effect of fertilizers on the use of moisture by plants and increasing the sustainability of agriculture in the steppe zone*. Kharkiv, Ukraine: Styl'na typohrafiia, 2018, pp. 108-126 [in Ukrainian].
- [5] Ye. Dudkina, "Urea-ammonia mixture (KAS)", *Ahronom*, no. 1 (February), pp. 20-22, 2013 [in Ukrainian].
- [6] N. A. Pasichnik, and N. A. Marchuk, "Application of KAS for fertilizing winter wheat on meadow-chernozem carbonate

- soil", *Visnyk KhNAU*, no. 1, pp. 140-143, 2013 [in Ukrainian].
- [7] V. O. Kudrya, and I. P. Prokopiev, "Technical means for applying liquid fertilizers and prospects for their development", *Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental thematic sci. coll. of NAAS NSC "IMESG"*, Glevakha, iss. 96, pp. 201-208, 2012 [in Ukrainian].
- [8] "Equipment for applying liquid fertilizers. What, how and with what?" [Online]. Available: <https://traktorist.ua/articles/tehnika-dlya-vnesennya-ridkikh-dobriv-shcho-yak-i-chim>. Accessed on: Nov. 08, 2022 [in Ukrainian].
- [9] "vApplyHD Plumbing Overview and Recommendations". [Online]. Available: <https://docplayer.net/51852206-Plumbing-overview-and-recommendations.html>. Accessed on: Nov. 09, 2022.
- [10] "vApplyHD Operator's Guide Gen2 2020 SeedSense Displays". [Online]. Available: https://support.surefireag.com/media/documents/vApply_Operators_Guide_955656_F8hygup.pdf. Accessed on: Nov. 30, 2022.
- [11] S. O. Filimonov, N. V. Filimonova, and D. S. Bacherikov, "Using a piezoelectric motor in agriculture", in *All-Ukr. Sci. and Pract. Internet Conf. Automation and Computer-Integrated Technologies in Production and Education: State, Achievements, Development Prospects*, 2020, pp. 15-17 [in Ukrainian].
- [12] L. A. Ostrovsky, *Fundamentals of the general theory of electrical measuring devices*. Leningrad, Russia: Energiya, 1971 [in Russian].
- [13] V. M. Sharapov, S. A. Filimonov, Z. V. Sotula, L. G. Kunitskaya, and V. M. Zaika, "Improvement of piezoceramic scanners", in *2013 IEEE 33rd Int. Sci. Conf. Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2013: Conf. Proc.*, 2013, 6552063, pp. 144-146.
- [14] V. M. Sharapov, O. M. Gurzhii, and S. A. Filimonov, "Three-coordinate piezoceramic scanner on bimorphic piezo elements for a probe nanomicroscope", *Tekhnolohiia ta konstruiuvannia v elektronii aparaturi*, no. 4 (70), pp. 13-15, 2007 [in Ukrainian].
- [15] C. Bazilo, S. Filimonov, N. Filimonova, and D. Bacherikov, "Determination of geometric parameters of piezoceramic plates of bimorph screw linear piezo motor for liquid fertilizer dispenser", in *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, Z. Hu, S. Petoukhov, M. Yanovsky and F. He, Eds., vol. 463. Springer, Cham, pp. 84-94, 2022. doi: 10.1007/978-3-031-03877-8_8.
- [16] L. Wang et al., "High accuracy Comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting", *AIP Advances*, vol. 9, 095067, pp. 1-9, 2019. doi: 10.1063/1.5119328.
- [17] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019. doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [18] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Nano-Electron. Phys.*, vol. 10, no. 4, 04025, 2018. doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [19] V. Halchenko, D. Bacherikov, S. Filimonov, and N. Filimonova, "Improvement of a linear screw piezo motor design for use in accurate liquid dosing assembly", in *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos and Y. Tsegelnyk, Eds., vol. 536. Springer, Cham. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_22.

S. O. Filimonov, Ph. D., Associate Professor,
D. S. Bacherikov, Postgraduate
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MODEL OF SCREW LINEAR PIEZOELECTRIC MOTOR

The topic of liquid fertilizers in Ukraine is a trend of the last few years. The application of liquid mineral fertilizers instead of granular ones during sowing is gaining popularity among Ukrainian agricultural producers. This technology is especially relevant, according to experts, in regions with moisture deficiency, and also in those farms where resource-saving agriculture is practiced. Many manufacturers of agricultural machinery today go the way of modernizing existing models of tillage and sowing machines with additional equipment for applying liquid fertilizers. The equipment provides for the installation of special containers for the working solution on the frame of the unit. At the same time, wide hoses, which are supplied with fertilizers using pumps, are connected to each opener. Thus, the application of liquid fertilizers occurs together with the sowing of seeds, at the expense of special dispensers.

In the work, a new design of a dispenser with a piezoceramic motor is proposed and manufactured. In the experimental model, a new technical solution is used to regulate the flow rate.

An equivalent electrical model of a helical linear piezoelectric motor based on the method of electromechanical analogies, which will allow to develop a control scheme (driver) more quickly, has been developed.

Using the developed equivalent electrical model of the helical linear piezoelectric motor, the amplitude-frequency characteristics of bimorphic piezoelements of the motor upon excitation of one bimorphic piezo element have been obtained. The obtained data show that the influence of the oscillation of one bimorphic piezo element on others has decreased due to the reduction of stiffening ribs.

The results of the research can be used in the design of liquid fertilizer dispensers with a piezoceramic motor.

Keywords: automation, instrumentation, agricultural machinery, dispenser, liquid fertilizers, piezoelectric motor, bimorph piezoelement.

СИСТЕМА КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЄКТІВ ГАЛУЗІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Запропоновано систему критеріїв оцінювання ефективності проєктів у галузі інформаційних технологій, що забезпечить можливості врахування організаційної та технологічної складових проєкту, а також сприятиме отриманню своєчасної та актуальної інформації про стан проєкту і впливи навколишнього середовища. Побудовано комплексний інтегральний критерій ефективності, що відображає узагальнену оцінку ефективності ІТ проєкту з метою подальшого вироблення ефективних управлінських рішень для досягнення поставлених цілей. Отримання якісно-кількісних оцінок ефективності ІТ проєкту надалі забезпечить можливість формалізації способу формування бази даних про показники реалізації та критерії оцінювання ефективності ІТ проєкту й інформаційної технології оцінювання ІТ проєкту. Це дає можливість об'єктивної оцінки сильних і слабких сторін ІТ проєкту у режимі «реального часу» та оперативного прийняття управлінських рішень з метою уникнення кризових ситуацій.

Ключові слова: гнучкі методології розробки програмного забезпечення, організаційна, технологічна складові, комплексний інтегральний критерій ефективності.

Вступ. Тенденція інформатизації та цифровізації розвитку всіх галузей сучасного світового суспільства активізує виклики, що вимагають застосування передових інновацій, особливо в сфері інформаційних технологій (ІТ). У зв'язку з цим менеджмент більшості ІТ компаній, що реалізує проєктний підхід, обирає застосування таких методологій, що сприяють забезпеченню контролю якості кінцевого продукту, якості виконання процесів, а також безпосередньо підвищенню ефективності управління в цілому. Тому Agile методологія розробки програмного забезпечення, зокрема Scrum, є невід'ємною складовою ефективною організації процесу розробки програмного забезпечення та інноваційною технологією сучасного менеджменту. Застосування Agile методологій забезпечує можливості гнучкості процесів розробки програмного продукту, адаптації до змін зовнішнього середовища та внутрішнього стану, прийняття адекватних та своєчасних управлінських рішень. При цьому актуальним є постійне оцінювання ефективності реалізації проєктів з метою визначення подальших перспектив стратегічної діяльності.

Згідно з [1-3] в основі Agile software development є короткий цикл, що забезпечує мінімальний приріст програмного продукту,

тобто ітерація. Відповідно до цього процес розробки програмного забезпечення вимагає постійного оцінювання ефективності проєкту, що сприятиме корегуванню вартості з безпосереднім контролем якості, термінів і тривалості процесів. Тому необхідно формувати збалансовані показники оцінювання ефективності проєкту, що відображатимуть стратегічну та оперативну діяльність у комплексній взаємодії в результаті збалансованого задоволення всіх учасників, виділяючи й аналізуючи інноваційні підходи, підходи до трансформації проєкту, рух матеріальних, інформаційних, енергетичних потоків.

Відповідно до методології Scrum реалізація ІТ проєкту характеризується використанням матеріальними, інформаційними, енергетичними потоками, учасниками тощо. В [4] зазначено, що завдання оцінювання ефективності проєкту зводиться до задачі максимізації цільового критерію ефективності $F(\cdot)$. Формально ця задача може бути представлена наступним чином:

$$F(s) \rightarrow \max, s \in S, \quad (1)$$

де S – вектор можливих проєктів.

Для оцінювання ефективності замість критерія максимуму цільової функції доціль-

но використовувати визначене граничне значення критерію ефективності:

$$F(s) \geq D, \quad s \in SD, \quad (2)$$

де D – деяке дійсне число, SD – підмножина множини S .

Як цільові фактори, згідно з якими доцільним є здійснення оцінки ефективності проєктів, більшість авторів пропонує використовувати такі характеристики [5-8]:

- чистий дисконтований дохід (Net Present Value – NPV);
- внутрішню норму дохідності (Internal Rate of Return – IRR);
- індекси дохідності витрат і інвестицій;
- дисконтований термін окупності (Payback Period – PP).

Чистий дисконтований дохід (Net Present Value – NPV) являє собою різницю між сумарною вартістю поточних грошових потоків, дисконтованих відповідно за обраною ставкою відсотка, і величиною початкових інвестицій.

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{(1-r)^n} - K, \quad (3)$$

$$D_i = P_i - Z_i$$

де i – номер періоду, $i = 1, \dots, n$;
 n – тривалість проєкту в періодах;
 D_i – грошовий потік (cash-flow);
 r – ставка дисконтування;
 K – сума початкових інвестицій;
 P_i – економічний результат від реалізації сценарію в період i ;

Z_i – витрати, пов'язані з реалізацією сценарію в період i .

У випадку, якщо проєкт передбачає не одночасні капіталовкладення, а послідовне інвестування протягом низки періодів, то формула отримує наступний вигляд:

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{(1-r)^n} - \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{(1-r)^n}. \quad (4)$$

$$D_i = P_i - Z_i$$

Показник чистого дисконтованого доходу має абсолютний характер. Він показує, яку корисність (у фінансовому вираженні) принесе реалізація певного проєкту. Однак при цьому він не дає жодного уявлення про те, на який обсяг витрат припадає ця корисність і яка ефективність кожної витраченої грошової одиниці.

Внутрішня норма прибутковості (Internal Rate of Return – IRR) являє собою відсоткову ставку (норму дисконту), при якій чистий дисконтований дохід дорівнює нулю. Внутрішня норма прибутковості (ВНД) визначається шляхом вирішення наступного рівняння:

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{(1-IRR)^n} - K = 0. \quad (5)$$

У разі, якщо сценарій передбачає не одноразові капіталовкладення, а послідовне інвестування протягом низки періодів, то формула набуває такого вигляду:

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{(1-IRR)^n} - \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{(1-IRR)^n} = 0. \quad (6)$$

Проєкт вважається ефективним, якщо внутрішня норма дохідності більша за необхідну ставку прибутковості, і неефективним – у протилежному випадку.

Дисконтований термін окупності (Payback Period – PP) дає можливість визначити період часу від початку реалізації проєкту до моменту, починаючи з якого, значення чистого дисконтованого доходу буде позитивним і не змінить знак.

$$PP = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{K_i}{(1-r)^n}}{\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{(1-r)^n}}. \quad (7)$$

Поряд з перерахованими вище, при оцінюванні ефективності проєктів ряд авторів розглядають використання таких показників [9-11]:

- Індекс рентабельності інвестицій (Profitability Index);
- Коефіцієнт ефективності інвестицій;
- Норма прибутковості фінансового менеджменту (Financial Management Rate of Return) та ін.

Наведені показники дозволяють оцінити ефективність проєкту з погляду його фінансової складової, яка визначається запланованими обсягами виробництва і реалізації продукції та прогнозованим рівнем цін, що для ІТ проєкту викликає низку труднощів. Крім того, ці показники не враховують фактори, що виникають в різних умовах, а саме досить часто в умовах невизначеності, коли неможливо оцінити ймовірність потенційних результатів, а також ризиків. Тому для оцінювання ІТ про-

ектів доцільним є формування такої системи критеріїв ефективності, в основі якої є феномен альтернативного вибору критеріїв, коли гнучкість процесів розробки програмного продукту спрямована на зменшення невизначеності, а оцінка ступеня ризику виконується за рахунок використання спеціалізованої методології аналізу варіантів реального інвестування. Ці завдання потребують використання методів оцінювання та аналізу, що передбачають множину прогнозних розрахунків та оцінок на основі критеріїв різного роду та характеру. Формування системи критеріїв оцінювання ефективності ІТ проєктів в умовах Scrum становить сутність наукової новизни цього дослідження, що сприятиме підвищенню ефективності реалізації ІТ проєкту та може бути використана у відповідній системі управління для визначення прогнозованого та поточного стану проєкту.

Метою цього дослідження є формування системи критеріїв оцінювання ефективності ІТ проєкту, враховуючи особливості застосування Scrum, що дасть можливість прийняття ефективних рішень, враховуючи вплив факторів зовнішнього середовища та внутрішній стан на різних етапах реалізації ІТ проєкту.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні **задачі**:

- дослідити критерії оцінювання ефективності ІТ проєктів, що реалізуються в умовах застосування Scrum, враховуючи організаційну та технологічну складові ІТ проєкту;
- розробити систему та порядок розрахунку основних базових критеріїв як організаційної, так і технологічної складові ІТ проєкту;
- побудувати комплексний інтегральний критерій ефективності ІТ проєкту, що сприятиме адекватному оцінюванню ІТ проєкту та виробленню ефективних управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу Ефективність проєктів, що реалізуються в галузі інформаційних технологій та на основі застосування гнучкої методології Scrum [12], формується на основі каркасу процесів, що характеризують технологічну складову, та визначення методів і ролей, що відносяться до організаційної складової. Тому оцінку ефективності ІТ проєкту можна здійснити об'єктивно лише за допомогою комплексу системи показників, що детально й усебічно характеризують як технологічну, так і організаційну складову

проєкту. У визначенні ефективності ІТ проєкту зацікавлені передусім регулярно і повністю задіяні команда розробників (Scrum Team) і керівник (Scrum master), а також власник продукту (Product owner PO) – з одного боку, та представники іншої сторони – Users, Stakeholders, Consulting Experts, що зацікавлені в проєкті [13]. Тому необхідно систематично, детально і в динаміці аналізувати ефективність ІТ проєкту, оскільки підвищення ефективності будь-якого ІТ проєкту впливає на стан та майбутні перспективи розвитку на ринку ІТ компанії в цілому.

Традиційно критерії ефективності ґрунтуються на різниці отриманих результатів і витрат. При цьому одержані результати і витрати вимірюються в грошових одиницях.

При формуванні системи критеріїв оцінювання ефективності ІТ проєкту будемо базуватися на тому, що проєкт є складною організаційно-технологічною системою [14], де в тісному взаємозв'язку є технологічна та організаційна складові, що характеризуються різними критеріями та показниками. Показники кваліфікуються дослідником як елементарні оцінки, що можуть бути виміряні за допомогою різних методів та засобів або оцінені експертно. Критерій – узагальнені показники, що безпосередньо обчислюються. Таким чином, у процесі моделювання критерії виражаються через показники. Тому ефективним у процесі формування системи критеріїв оцінювання ефективності ІТ проєкту буде комбіноване застосування експертних оцінок та евристичних методів, а також математичного моделювання, що підвищить якість отриманих результатів.

Оцінювання ефективності ІТ проєкту в умовах Scrum будемо здійснювати на основі комплексу критеріїв, що, з одного боку, характеризують технологічну складову, а з другого – організаційну. Тобто маємо багатокритеріальну оцінку. В зв'язку з цим фактором доцільним є класифікація і порядок розрахунку основних базових критеріїв як організаційної, так і технологічної складової, та введення комплексного інтегрального критерію ефективності ІТ проєкту.

Реалізація ІТ проєкту здійснюється в умовах Scrum, тому насамперед виділимо критерії технологічної складової, що є важливим для Scrum master, Scrum Team, Product owner, та організаційної складової, що зацікавлять Users, Stakeholders, Consulting Experts.

До критеріїв технологічної складової відносяться такі:

- Product backlog – один із найважливіших критеріїв для проєкту, що реалізується в умовах Scrum. Є одним із артефактів Scrum та являє собою впорядкований перелік задач, що забезпечить отримання бажаного для замовника результату. Особливо вагомим є для Users, Stakeholders, Consulting Experts;

- Sprint backlog є переліком задач, що виконується за один Sprint. Тут важливого значення набуває перелік задач, їх кількість, а також перелік вимог реалізації задач;

- Velocity – це критерій, що характеризує можливості розробників проєктної команди за певний проміжок часу створити дієздатний функціонал. Тобто це – показник, що визначає обсяг процесів, які може реалізувати команда;

- Критерій повної готовності (Definition of Done, DoD) забезпечує можливості встановлення отриманого результату, тобто визначення готовності функціоналу;

- Критерій прийнятності (Acceptance Criteria, AC) являє собою певні умови, яким має відповідати функціонал з точки зору Product owner;

- Burndown Chart характеризує статус задачі, що реалізується, тобто, скільки вже реалізовано і скільки ще залишилося. Важливим є для поточного Sprint;

- Definition of ready є критерієм, що вказує на повну реалізованість програмного продукту.

Критерії організаційної складової розглянемо на основі дослідження найбільш значущого ресурсу ІТ проєкту, тобто трудового ресурсу. До важливих показників ефективності використання трудових ресурсів ІТ проєкту відноситься частка приросту продукту за рахунок підвищення продуктивності праці, що характеризує динаміку приросту продукту та визначатиметься за формулою

$$\Delta P = 100 - \frac{\Delta K}{\Delta P_r} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де ΔP_r – питома вага приросту продукту за рахунок підвищення продуктивності проєктної команди, %, ΔK – приріст чисельності проєктної команди ІТ проєкту, %; ΔP – приріст програмного продукту, %.

Важливий вплив на ефективність ІТ проєкту, що виражається насамперед у показ-

никах продуктивності проєктної команди в умовах Scrum, має ступінь використання трудових ресурсів. Продуктивність проєктної команди в найбільш загальному вигляді кількісно може бути виражена в такий спосіб:

$$P_{pk} = \frac{K_p}{T}, \quad (9)$$

де P_{pk} – продуктивність проєктної команди, K_p – кількість реалізованих процесів, T – кількість витрачених людських ресурсів.

В процесі формування системи критеріїв оцінювання ефективності ІТ проєкту вагомим значення з погляду організаційної складової набувають узагальнюючі показники ефективності ІТ проєкту, такі як темпи зростання приросту продукту, матеріалоємність продукту, загальна рентабельність ІТ проєкту. Узагальнюючим вартісним показником ефективності ІТ проєкту використання матеріальних ресурсів є матеріалоємність продукту, що виражається величиною матеріальних витрат у розрахунку на реалізований проєктом програмний продукт:

$$M_p = \frac{V_{mr}}{V_p}, \quad (10)$$

де M_p – рівень матеріалоємності продукту, грн.; V_{mr} – вартість витрачених матеріальних ресурсів, грн.; V_p – вартість програмного продукту, грн.

Темпи зростання приросту програмного продукту у вартісному вираженні характеризують динаміку версій продукту за визначений період та визначаються за формулою

$$T_{\Delta P} = \frac{O_{\Delta P}}{O_v} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де $T_{\Delta P}$ – темпи зростання приросту програмного продукту, %; $O_{\Delta P}$ – значення приросту програмного продукту у вартісному вираженні за один Sprint; O_v – приріст програмного продукту у вартісному вираженні за один Sprint.

Загальна рентабельність ІТ проєкту визначається за формулою

$$R = \frac{P_b}{F_o + V_{n.o}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

де R – рівень загальної рентабельності ІТ проєкту, %; P_b – сума балансового прибутку,

грн.; F_o – середньорічна вартість основних виробничих фондів, грн; $V_{n.o}$ – середньорічна вартість нормованих оборотних коштів, грн.

При формуванні критеріїв оцінювання ефективності проєктів у галузі інформаційних технологій (ІТ) важливим є врахування бізнес-моделі, за якою реалізується проєкт. Розрізняють дві базові бізнес-моделі ІТ проєкту: ІТ Outsourcing та ІТ Outstaffing [15].

Якщо проєкт реалізується за ІТ Outsourcing-моделлю, то при формуванні системи критеріїв оцінювання ефективності необхідно виділити такі аспекти:

1. Технологічний: на ринку ІТ представлена велика кількість мов програмування, фреймворків, програм тощо. Потрібно підібрати саме ту технологію, яка є максимально адаптивною, легкою в розумінні та має великий попит серед ІТ-фахівців. Це дає можливість реалізувати кінцевий проєкт з мінімальною кількістю недоліків та за найменший проміжок часу.

2. Трудовий: однією з найвищих за витратою грошових ресурсів категорій є витрати на персонал ІТ проєкту. Від компетентності проєктної команди залежить якість кінцевого продукту, а також час, за який цей програмний продукт буде виконано.

3. Вплив іміджу компанії інвестора: реалізація проєкту для відомої компанії та внесення виконаного проєкту у власне портфоліо дає можливість стимулювати надходження нових проєктів і збільшення коридору ціни для їх реалізації.

ІТ Outsourcing-модель передбачає наявність великої кількості висококласних фахівців на ринку, покриття основних технологій, гнучкість управління проєктами, високий рівень комунікації. Тому ІТ проєкт, що реалізується за Outsourcing-моделлю, залежить від таких показників, як заробітна плата розробника за місяць, накладні витрати з річного розрахунку та інші витрати.

У випадку бізнес-моделі ІТ Outstaffing доцільним є врахування таких критеріїв:

1. Часовий критерій, що напряму корелюється з витратами;

2. Критерій людського ресурсу, що визначається компетентністю проєктної команди, від якої залежить якість кінцевого продукту;

3. Ринковий критерій, тобто реалізований проєкт має відповідати вимогам ринку.

4. Критерій регіональних особливостей проєкту, тобто цільовий ринок, на який спрямований проєкт.

5. Критерій науково-технічної перспективності забезпечує можливість модифікувати й адаптувати вже випущений проєкт, покращує його ефективність.

6. Критерій ризику, що має пряму кореляцію з ефективністю проєкту, оскільки зниження ризиковості підвищує успіх проєкту.

Враховуючи, що ІТ проєкт в умовах Scrum складається з організаційної та технологічної складових, тобто має дві підсистеми, то кожна підсистема оцінюється за своїми критеріями. Серед вихідних змінних підсистем є такі, що відображають зв'язки підсистем з навколишнім середовищем та не є змінними взаємодії підсистем. У загальному випадку компоненти векторів X , Y , Z , U мають обмеження у вигляді нерівностей типу:

$$\begin{aligned} X_{\min} &\leq X \leq X_{\max}, \\ X &\leq X_{\text{don}} \quad \text{або} \\ X &\geq X_{\text{don}}. \end{aligned}$$

Тоді комплексний інтегральний критерій ефективності ІТ проєкту, що реалізується на часовому інтервалі $t_1 \leq t \leq t_2$, можна представити у вигляді:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^N \phi_i(y_i(t), x_i(t), u_i(t), z_i(t), t) dt. \quad (13)$$

Для кожної з підсистем критерій ефективності можна представити у вигляді:

$$P = \int_{t_1}^{t_2} (C_y y_i(t) - (C_{\Pi} U_{it}^{(t)} + C_y Y_{\eta i}(t))) dt, \quad (14)$$

де $Y_{\eta i}(t)$ – змінні взаємодії з η -ї підсистеми на i -ту;

C_y, C_{Π} – коефіцієнти вартості, які враховують ціни потоків Y та U .

Таким чином, можна використовувати загальний критерій як адитивну функцію частинних, що дасть можливість повною мірою оцінити ефективність ІТ проєкту.

Результати досліджень Внаслідок проведених досліджень отримано такі теоретичні наукові результати:

- досліджено критерії оцінювання ефективності ІТ проєктів, що реалізуються в умовах застосування Scrum, враховуючи організаційну та технологічну складові ІТ проєкту.

Це забезпечує можливості детальної та всебічної характеристики ІТ проекту як для Scrum master, Scrum Team, Product owner, з одного боку, так і для Users, Stakeholders, Consulting Experts – з другого;

- розроблено систему та порядок розрахунку основних базових критеріїв як організаційної, так і технологічної складової ІТ проекту;

- побудовано комплексний інтегральний критерій ефективності ІТ проекту, що сприятиме адекватному оцінюванню ІТ проекту та виробленню ефективних управлінських рішень.

Обговорення результатів. Для ІТ проекту, що реалізується в умовах застосування гнучкої методології Scrum, в процесі управління важливого значення набуває оцінювання ефективності проекту на основі комплексу критеріїв, оскільки вимагається врахування як технологічної, так і організаційної складової проекту. До того ж, важливим є врахування, саме на основі якої бізнес-моделі реалізується ІТ проект. Тому для отримання адекватних і точних оцінок стану проекту запропоновано систему критеріїв оцінювання ефективності ІТ проекту, що забезпечує взаємозв'язок організаційної та технологічної складових ІТ проекту і є основою для побудови комплексного інтегрального критерію ефективності. Це забезпечить можливість оцінити ІТ проект детально та всебічно з метою подальшого вироблення ефективних управлінських рішень для досягнення поставлених цілей. У такій постановці представлена наукова задача розглянута вперше.

Отримання якісно-кількісних оцінок ефективності ІТ проекту надалі забезпечить можливості формалізації способу формування бази даних про показники реалізації та критерії оцінювання ефективності ІТ проекту й інформаційної технології оцінювання ІТ проекту. Це дає можливість об'єктивної оцінки сильних і слабких сторін ІТ проекту у режимі «реального часу» та оперативного прийняття управлінських рішень з метою уникнення кризових ситуацій.

Висновки. В результаті в цій роботі вперше досліджено критерії оцінювання ефективності ІТ проекту, що реалізується в умовах Scrum, враховуючи технологічну та організаційну складові ІТ проекту, що представлено

як дві підсистеми, які перебувають у взаємозв'язку та взаємозумовленості. Тому визначено, що оцінити реальну ефективність ІТ проекту можна лише на підставі використання певного комплексу критеріїв, враховуючи вплив різних факторів на відповідні показники. З цією метою запропоновано систему критеріїв оцінювання ефективності ІТ проекту, що відображає реальний стан проекту в контексті взаємозв'язку організаційної та технологічної складових. Це забезпечило можливості моніторингу стану ІТ проекту в режимі реального часу і вироблення своєчасних та адекватних управлінських рішень.

Побудовано комплексний інтегральний критерій ефективності ІТ проекту, що сприятиме вибору та прийняттю управлінського рішення в процесі управління ІТ проектом в умовах Scrum. В перспективі подальших досліджень отримана модель може бути застосована при побудові відповідної бази знань як основи інтелектуальної системи управління ІТ проектом. Це забезпечить підвищення ефективності ІТ проекту за рахунок прийняття адекватних управлінських рішень.

Список використаних джерел

- [1] G. I. Smith, A. L. Kolesnik, K. Lavrischeva, and O. Slabospitsky, "Improving the process of drafting families of software systems elements of agile methodologies", *Programming problems*, no. 2-3, pp. 261-270, 2010.
- [2] J. Sutherland, *Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time* (1st ed.), Currency, 2014, p. 256. ISBN 9780385346450.
- [3] H. Kniberg, *Scrum and XP from the Trenches (Enterprise Software Development)*, C4Media, 2007, p. 140.
- [4] Т. О. Прокопенко, та А. П. Ладанюк, *Інформаційні технології управління організаційно-технологічними системами*. Черкаси, Україна: Вертикаль, видавець Кандич С. Г., 2015.
- [5] А. А. Пересада, и Т. В. Майорова, *Проектное финансирование*. Киев, Украина: КНЕУ, 2007.
- [6] A. Nesticò, and G. De Mare, "A multi-criteria analysis model for investment projects in smart cities", *Environments*, vol. 5(4), p. 50, 2018.

- [7] M. V. Belov, and D. A. Novikov, *Methodology of Complex Activity: Foundations of Understanding and Modelling*. Heidelberg, Springer, 2020.
- [8] Т. О. Прокопенко, "Деякі аспекти фінансово-економічної оцінки ефективності проектів та програм", *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, № 1/12(55), с. 28-30, 2012.
- [9] С. В. Питель, "Удосконалення оцінки ефективності інвестицій", *Економічний аналіз: зб. наук. праць / Тернопільський нац. екон. ун-т*, т. 24, № 2, с. 59-64, 2016.
- [10] P. Serrador, and R. Turner, "The relationship between project success and project efficiency", *Project Management Journal*, vol. 46 (1), pp. 30-39, 2015.
- [11] *Руководство по управлению инновационными проектами и программами*: пер. на рус. яз. под ред. С. Д. Бушуева, т. 1, версия 1.2. Київ: Наук. світ, 2009.
- [12] D. Maximini, *The Scrum Culture: Introducing Agile Methods in Organizations. Management for Professionals*. Cham: Springer, 2015, p. 26.
- [13] Т. О. Прокопенко, та О. В. Лавданська, "Інформаційна модель керування проектами галузі інформаційних технологій в умовах гнучкої методології Scrum", *Проблеми управління та інформатики: міжнар. наук.-техн. журн.*, № 2, с. 129-138, 2021.
- [14] T. Prokopenko, O. Lavdanska, Y. Povolotskyi, B. Obodovskyi, and Y. Tarasenko, "Devising an integrated method for evaluating the efficiency of Scrum-based projects in the field of information technology", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5 (3-113), pp. 46-53, 2021.
- [15] M. Andrew, "Software development roles and responsibilities in outsourcing". [Online]. Available: <https://qarea.com/blog/software-development-roles-andresponsibilities-in-outsourcing>
- tems elements of agile methodologies", *Programming problems*, no. 2-3, pp. 261-270, 2010.
- [2] J. Sutherland, *Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time* (1st ed.), Currency, 2014, p. 256. ISBN 9780385346450.
- [3] H. Kniberg, *Scrum and XP from the Trenches (Enterprise Software Development)*, C4Media, 2007, p. 140.
- [4] Т. О. Prokopenko, and A. P. Ladanyuk, *Information Technology Management of Organizational and Technological Systems*. Cherkasy, Ukraine: Vertikal, publisher Kandych S. G., 2015 [in Ukrainian].
- [5] A. A. Peresada, and T. V. Mayorova, *Project Financing*. Kiev, Ukraine: KNEU, 2007 [in Russian].
- [6] A. Nesticò, and G. De Mare, "A multi-criteria analysis model for investment projects in smart cities", *Environments*, vol. 5(4), p. 50, 2018.
- [7] M. V. Belov, and D. A. Novikov, *Methodology of Complex Activity: Foundations of Understanding and Modelling*. Heidelberg, Springer, 2020.
- [8] Т. О. Prokopenko, "Some aspects of the financial and economic evaluation of the effectiveness of projects and programs", *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, no. 1/12 (55), pp. 28-30, 2012 [in Ukrainian].
- [9] S. V. Pytel', "Modernization of assessment for investment efficiency", *Economic analysis: coll. of sci. works / Ternopil National Economic University*, vol. 24, no. 2, pp. 59-64, 2016 [in Ukrainian].
- [10] P. Serrador, and R. Turner, "The relationship between project success and project efficiency", *Project Management Journal*, vol. 46 (1), pp. 30-39, 2015.
- [11] *Guide to the Management of Innovative Projects and Programs*: transl. into Russian in S. D. Bushuev, Ed., vol. 1, version 1.2. Kyiv: Nauk. svit, 2009 [in Russian].
- [12] D. Maximini, *The Scrum Culture: Introducing Agile Methods in Organizations. Management for Professionals*. Cham: Springer, 2015, p. 26.
- [13] Т. О. Prokopenko, and O. V. Lavdanskaya, "Information model of information technology project management in the flexible

References

- [1] G. I. Smith, A. L. Kolesnik, K. Lavrischeva, and O. Slabospitsky, "Improving the process of drafting families of software sys-

- Scrum methodology", *Problemy upravlinnia ta informatyky*: Int. sci. and tech. j., no. 2, pp. 129-138, 2021 [in Ukrainian].
- [14] T. Prokopenko, O. Lavdanska, Y. Povolotskyi, B. Obodovskyi, and Y. Tarasenko, "Devising an integrated method for evaluating the efficiency of Scrum-based projects in the field of information technology", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5 (3-113), pp. 46-53, 2021.
- [15] M. Andrew, "Software development roles and responsibilities in outsourcing". [Online]. Available: <https://qarea.com/blog/software-development-roles-andresponsibilities-in-outsourcing>

T. O. Prokopenko, Dr. Tech. Sc., Professor,
e-mail: t.prokopenko@chdtu.edu.ua

Ya. O. Povolotskyi
e-mail: yapovolotsky@gmail.com
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

A SYSTEM OF CRITERIA FOR EVALUATING THE EFFICIENCY OF PROJECTS IN THE FIELD OF INFORMATION TECHNOLOGIES

The software development process requires constant evaluation of the project's efficiency, which will help to adjust the cost with direct control of quality, terms and duration of processes. Therefore, it is necessary to form balanced indicators for evaluating the efficiency of the project, which will reflect strategic and operational activities in a complex interaction as a result of the balanced satisfaction of all participants. At the same time, it is important to highlight and analyze innovative approaches, approaches to project transformation, the movement of material, information, and energy flows. We will evaluate the efficiency of the IT project under Scrum conditions on the basis of a set of criteria that characterize the technological component on the one hand, and the organizational component on the other. That is, we have a multi-criteria assessment. In connection with this factor, it is expedient to classify and calculate the main basic criteria of both organizational and technological components, and to introduce a complex integral criterion of IT project efficiency. The purpose of this study is to form a system of criteria for evaluating the efficiency of an IT project, taking into account the peculiarities of Scrum application. This will make it possible to make effective decisions, taking into account the influence of external environment factors and the internal state at various stages of the implementation of the IT project. A complex integral efficiency criterion has been built, which reflects a generalized assessment of the IT project's efficiency in order to further develop effective management solutions to achieve the set goals. Obtaining qualitative and quantitative evaluations of IT project efficiency in the future will provide opportunities to formalize the method of forming a database of implementation indicators and criteria for evaluating IT project efficiency and information technology of IT project evaluation. This makes it possible to objectively assess the strengths and weaknesses of the IT project in "real time" mode and make prompt management decisions in order to avoid crisis situations.

Keywords: agile software development methodologies, organizational, technological components, complex integral efficiency criterion.

УДК 621.391:004.94

[0000-0002-2046-481X] **Е. В. Фауре**, *д-р техн. наук, професор*,[0000-0002-8632-1176] **А. Б. Скуцький**,

e-mail: a.b.skutskyi.asp21@chdtu.edu.ua

[0000-0002-1596-4123] **А. О. Лавданський**, *канд. техн. наук, доцент*

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ З НЕРОЗДІЛЬНИМ ФАКТОРІАЛЬНИМ КОДУВАННЯМ ДАНИХ У СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK

Роботу присвячено розробці та дослідженню імітаційної моделі системи передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням даних у середовищі Simulink. Модель у передавачі реалізує формування перестановки, кодування її символів двійковим рівномірним кодом і передавання отриманої послідовності двійковим симетричним каналом зв'язку з незалежними бітовими помилками. Приймач реалізує зворотне перетворення двійкового повідомлення в символічне. У процесі симуляції фіксується кількість правильно прийнятих і пошкоджених помилкою інформаційних повідомлень. Крім того, виконується підрахунок випадків не виявленої приймачем помилки в отриманому повідомленні. Розроблено структуру імітаційної моделі, описано етапи створення та налаштування моделі в середовищі Simulink. Отримана імітаційна модель дозволяє проводити експерименти з дослідження завадостійкості факторіального кодування даних у каналах зв'язку різної якості.

Ключові слова: факторіальний код, перестановка, двійковий симетричний канал, імовірність помилки, моделювання.

Вступ. Розвиток інформаційних і комунікаційних технологій невіддільно впливає на сучасне життя людини. Разом з тим, відповідно до звіту [1] Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України про роботу системи виявлення вразливостей і реагування на кіберінциденти та кібератаки [2] від початку війни тренд на зростання кількості кібератак зберігається. Зокрема, в III кварталі 2022 р. за допомогою засобів Системи виявлення вразливостей і реагування на кіберінциденти та кібератаки опрацьовано 24 млрд подій. Кількість зареєстрованих і опрацьованих кіберінцидентів зросла від 64 до 115. Найпоширенішими методами кібератаки є: збір інформації зловмисником, шкідливий програмний код, втручання, порушення доступності [3]-[5]. Розвиток сучасних комп'ютерів і технологій дозволяє виконувати кібератаки на смартфоні через спеціалізоване програмне забезпечення [6] та апаратну складову. Новітні розробки відеопроцесорів дозволяють виконувати підбір паролів довжиною 8 елементів з літер нижнього та верхнього регістру, спеціальних символів і цифр методом перебору протягом 8 годин [7]. Збільшення довжини паролів накладає на користу-

вача вимоги до збереження такого паролю не просто «в голові», а на носіях або в хмарних сховищах. Такі рішення теж вимагають захисту, шифрування та належного зберігання.

Реалізація захищеного інформаційного обміну є складовою забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності даних в електронних комунікаційних мережах та інформаційних системах [8]. Разом з тим, процес передавання даних з обмеженим доступом каналами зв'язку передбачає одночасний захист інформації від несанкціонованого доступу та модифікації внаслідок природних чи навмисних деструктивних дій.

Підхід на основі використання нероздільного факторіального кодування даних [9]-[11] дозволяє реалізувати інтегрований захист інформації від несанкціонованого доступу та каналних помилок. Нероздільне факторіальне кодування передбачає бієктивне перетворення інформаційного повідомлення або його частини в перестановку [12] чисел $\pi = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{M-1}\}$ заданої довжини M . Закон перетворення учасники інформаційної взаємодії тримають у секреті. Символи перестановки кодують двійковим кодом і переда-

ють каналом зв'язку, не захищеним від підслуховування та помилок. У точці приймання виконують зворотну операцію перетворення перестановки в інформаційне повідомлення. У [10] отримано оцінку достовірності передавання перестановок, зокрема визначено ймовірність невиявленої помилки від довжини інформаційного вектора на вході кодера. Результати дослідження [13] доводять можливість використання нероздільного факторіального кодування даних у каналах з ймовірністю бітової помилки, близькою до 0,5.

Для практичного використання факторіального кодування даних в інформаційних і комунікаційних системах має бути розроблений набір протоколів, які вирішують завдання синхронізації передавача й приймача, встановлення зв'язку, узгодження ключів, контролю достовірності інформації. Такі протоколи дозволять надалі використовувати їх в апаратній складовій систем захищеного передавання даних.

Разом з тим, для мінімізації часу та ресурсів розробника всі рішення в протоколах інформаційного обміну, зокрема на основі нероздільного факторіального кодування даних, першочергово мають бути відпрацьовані на відповідних комп'ютерних моделях, адже

комп'ютерне моделювання в сучасному світі стало одним із невід'ємних факторів у життєвому циклі виробу.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є створення імітаційної моделі системи передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням даних у середовищі Simulink [14] для верифікації теоретичних показників достовірності передавання та подальшого дослідження ефективності застосованих у системі протоколів. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- визначити структуру моделі та реалізувати її в середовищі Simulink;
- визначити перелік експериментів;
- побудувати імітаційну модель за визначеною структурою;
- реалізувати експериментальні дослідження з передавання даних каналами різної якості;
- виконати порівняння отриманих результатів з теоретичними.

Виклад основного матеріалу. Структурна схема імітаційної моделі системи передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням даних має вигляд, наведений на рисунку 1.

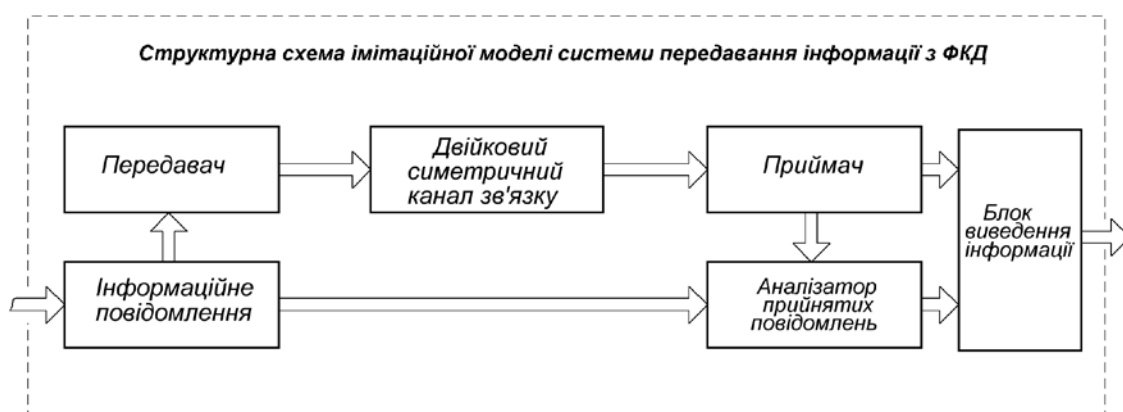


Рисунок 1. Структурна схема імітаційної моделі

Реалізація імітаційної моделі у середовищі Simulink. Розглянемо функціональні складові імітаційної моделі системи передавання перестановки двійковим симетричним каналом з визначеною ймовірністю бітової помилки (рисунк 2).

Перестановка для передавання – повідомлення, біктивно відображене на перестановку. За довжини перестановки M потуж-

ність множини всіх перестановок дорівнює $M!$, а тому передавач може сформувати до $M!$ різних повідомлень.

Двійковий симетричний канал зв'язку (Channel) – канал передавання двійкових даних з однаковою перехідною ймовірністю p_0 .

Передавач (serial transmitter) – виконує послідовне, побітове передавання перестановки в двійковий симетричний канал зв'язку.

Вхідні сигнали: pData – перестановка повідомлення; CLK – сигнал тактування. Вихідні сигнали: sTx – біти інформаційного повідомлення, які надходять до каналу зв'язку;

TxOk – сигнал завершення передавання всіх елементів перестановки в канал зв'язку. Сигнал формується після передавання останнього біту інформаційного повідомлення.

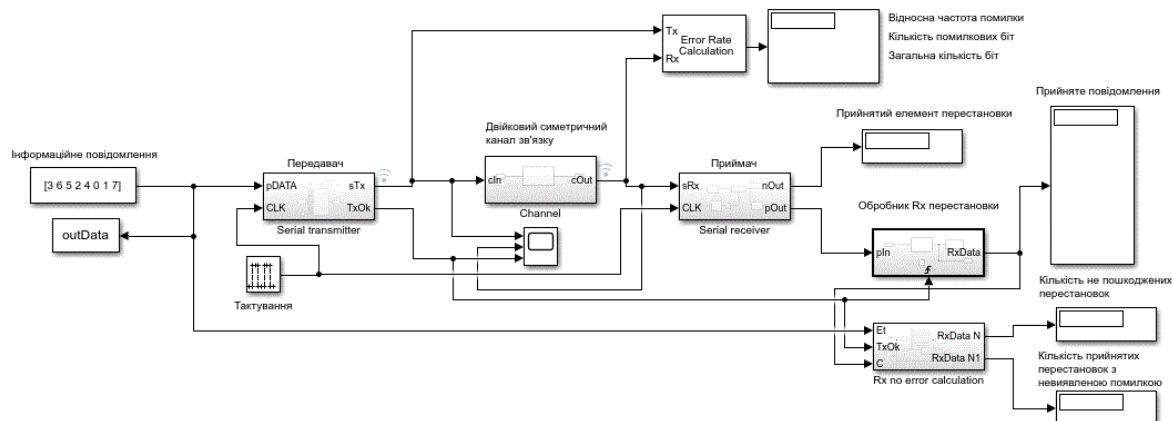


Рисунок 2. Модель системи передавання перестановки каналом зв'язку

Приймач (serial reciever) – виконує послідовне, побітове приймання перестановки з каналу зв'язку. Вхідні сигнали: sRx – перестановка-повідомлення, яка послідовно надходить з каналу зв'язку; CLK – сигнал тактування. Вихідні сигнали: nOut – елемент перестановки, отриманий приймачем; pOut – перестановка, отримана приймачем.

Обробник Rx перестановки – приводить отриману з двійкового симетричного каналу зв'язку перестановку до початкового вигляду. Наприклад, у результаті передавання перестановки (формула (1))

$$\pi = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_{M-1}\}, \quad (1)$$

передавачем у двійковий симетричний канал *приймач* отримує символи перестановки у зворотній послідовності – $\pi = \{\pi_M, \pi_{M-1}, \dots, \pi_0\}$.

Лічильник прийнятих перестановок (Rx no error calculation) – рахує кількість перестановок, що співпадають з відправленими, а також фіксує кількість перестановок з невиявленою помилкою. Вхідні сигнали: Et – еталонне значення переданої перестановки (*перестановка для передавання*); C – отримана приймачем перестановка; TxOk – сигнал завершення передавання всіх елементів перестановки в канал зв'язку. Вихідні сигнали: Rx Data N – кількість непошкоджених перестановок, Rx Data N 1 – кількість перестановок з невиявленою помилкою.

Лічильник неправильно прийнятих бітів (Error Rate Calculation) – рахує кількість помилкових бітів на виході двійкового симетричного каналу зв'язку. Вхідні сигнали: Tx – сигнал з виходу приймача, ідентичний sTx; Rx – сигнал на виході каналу (вході приймача), ідентичний cOut, sRx.

Блок тактування – формує сигнал CLK для функціонування моделі.

Дисплеї відображення даних та осцилограф – слугують для виводу проміжних і остаточних результатів моделювання.

Налаштування імітаційної моделі. Розглянемо головні налаштування імітаційної моделі системи передавання перестановки двійковим симетричним каналом зв'язку за довжини перестановки $M = 8$. Для рівномірного кодування символів перестановки кодова комбінація кожного символу містить три біти.

Налаштування моделі містяться в меню MODELING → Model setting (рисунок 3).

Основні налаштування (рисунок 3):

- simulation (stop time) – кінцевий час для зупинки симуляції, значення обраховується за формулою

$$\text{Stop time} = \left(\frac{1}{f_{\text{brx}}} \cdot M \cdot l_r \right) \cdot N + \frac{1}{f_{\text{brx}}}, \quad (2)$$

де f_{brx} – частота передавання (у роботі прийнято $f_{\text{brx}} = 10^3 \text{ Гц}$);

M – довжина перестановки (у роботі прийнято $M = 8$);

l_r – кількість бітів для кодування одного елемента перестановки, $\lceil \log_2 M \rceil = 3$;

N – кількість тестових передавань перестановки;

$\frac{1}{f_{\text{dtx}}}$ – час для оцінки отримання даних;

- solver selection (type: fixed-step) – фіксований крок симуляції;

- solver selection (solver: discrete) – дискретний обробник моделі;

- fundamental sample time – мінімальний проміжок часу в режимі симуляції. Для передавання з частотою f_{dtx} цей параметр має бути в два рази вищий – $2 \cdot f_{\text{dtx}}$.

Приклад налаштування блоку тактування зображено нижче (рисунок 4).

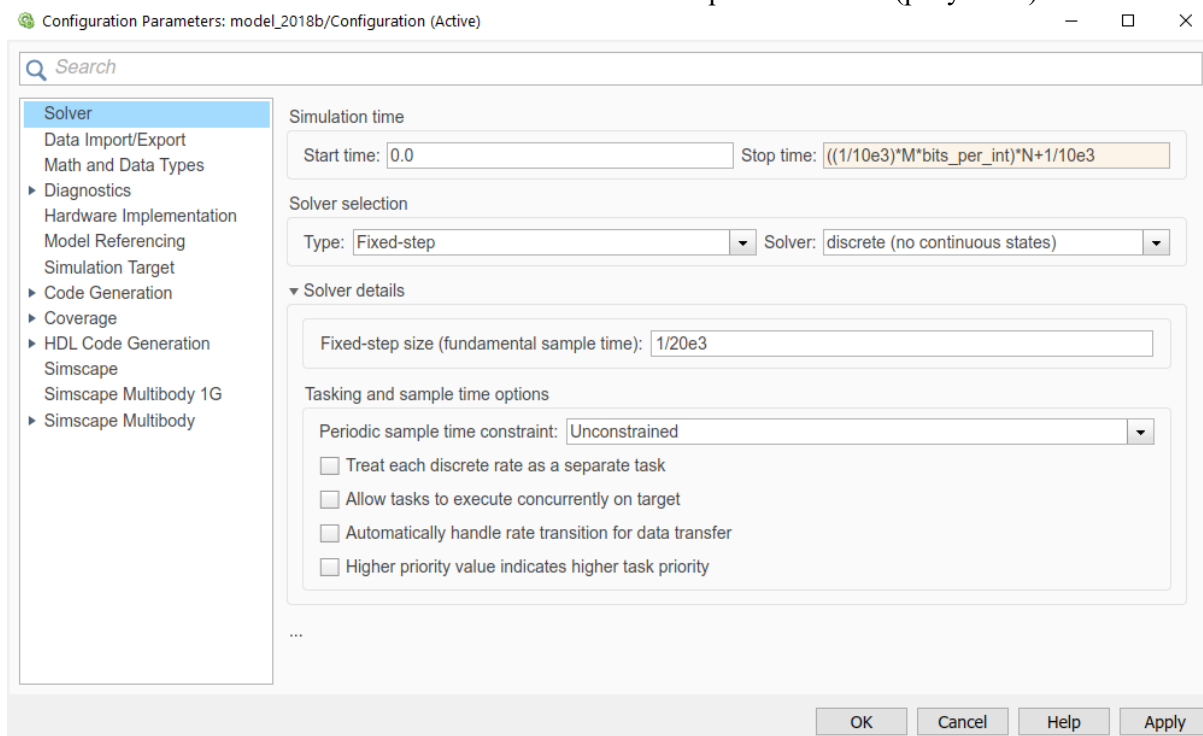


Рисунок 3. Параметри симуляції моделі

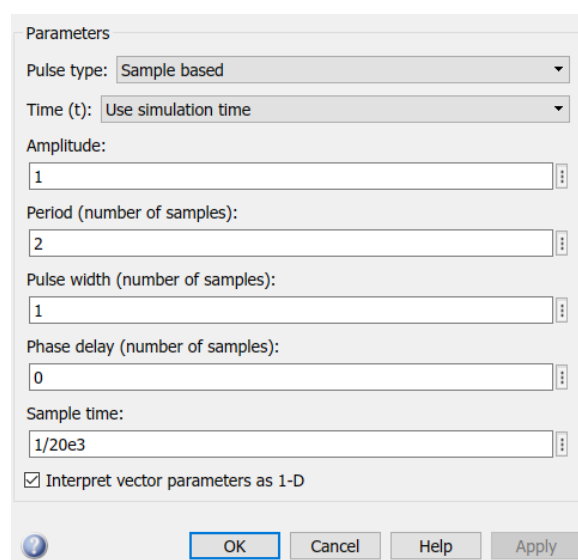


Рисунок 4. Налаштування блоку тактування

Підсистеми імітаційної моделі. Передавач (*serial transmitter*) виконує послідовне, побітове передавання даних. Передавач містить (рисунк 5): блок перетворення даних (integer to bit converter), лічильник тактування

(counter), мультиплексор, блок перетворення даних (boolean), блок формування затримки сигналу (delay), блок відображення (display), блок порівняння (compare to constant), вхідні та вихідні порти.

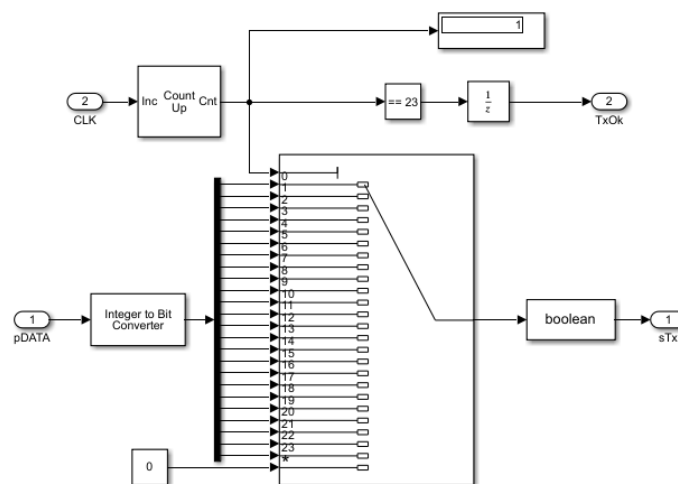


Рисунок 5. Передавач (serial transmitter)

Підсистема отримує сигнал тактування ззовні через порт CLK на лічильник (налаштування лічильника представлено на рисунку 6). На вхідний порт pDATA надходить перестановка для передавання. За визначених

M і l_r кількість біт n , відповідно, тактових імпульсів для передавання однієї перестановки становить

$$n = M \cdot l_r = 8 \cdot 3 = 24. \quad (3)$$

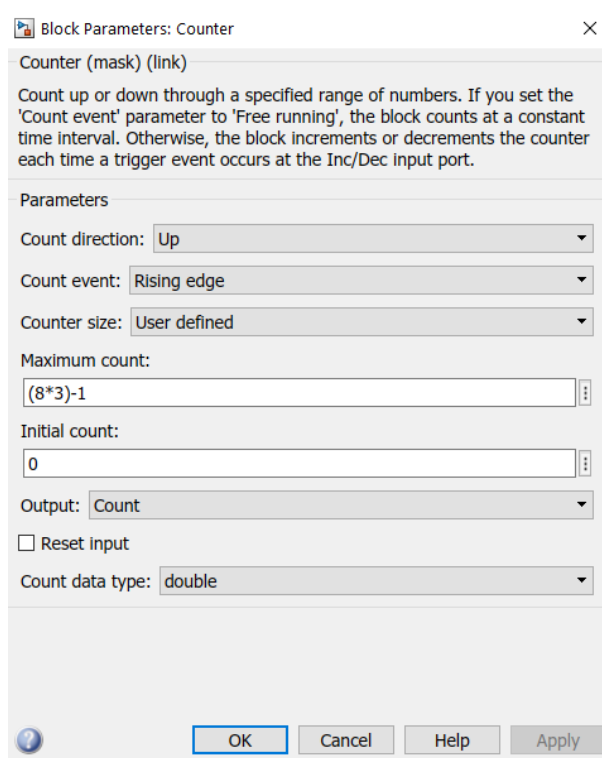


Рисунок 6. Налаштування блоку лічильника

Перестановка надходить на блок перетворювача *integer to bit*, де кожний елемент перестановки перетворюється в двійковий

вигляд із заданою довжиною кодової комбінації l_r (рисунок 7).

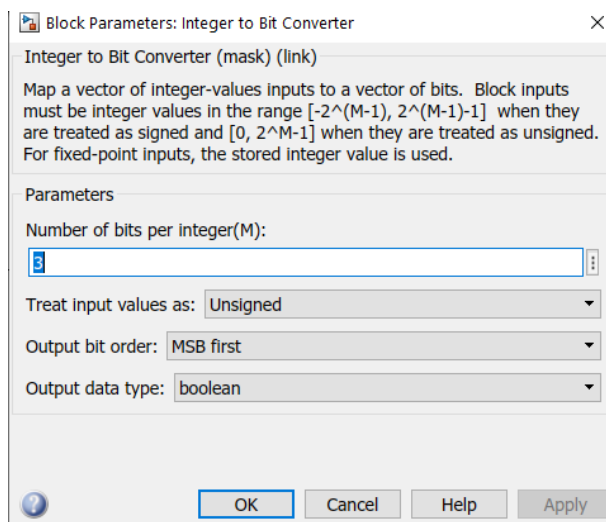


Рисунок 7. Налаштування блоку *integer to bit*

Послідовність біт перестановки надходить через шину до мультиплексора на 24 входи. Вихід лічильника з'єднано з адресним входом мультиплексора. Залежно від кількості обрахованих імпульсів лічильником кожен із входів мультиплексора з'єднується з його виходом. Сигнал даних з мультиплексора побітово передається на вихідний порт *sTx* під дією сигналу тактування. Вихідний сигнал *TxOk* формується після передавання останнього, 24-го (для $l_r = 3$, див. формулу (2)) біту на вихідний порт *sTx*.

Приймач (*serial reciever*) отримує бітову послідовність, передану каналом зв'язку, декодує її та формує вихідне інформаційне повідомлення. Приймач містить (рисунок 8): n -бітовий запам'ятовувальний пристрій (*serial-in parallel-out bits*), детектор елемента перестановки, підсистему перетворення двійкового представлення в десяткове (*convert to int*), блок формування перестановки (рисунок 9), порти вхідних і вихідних даних.

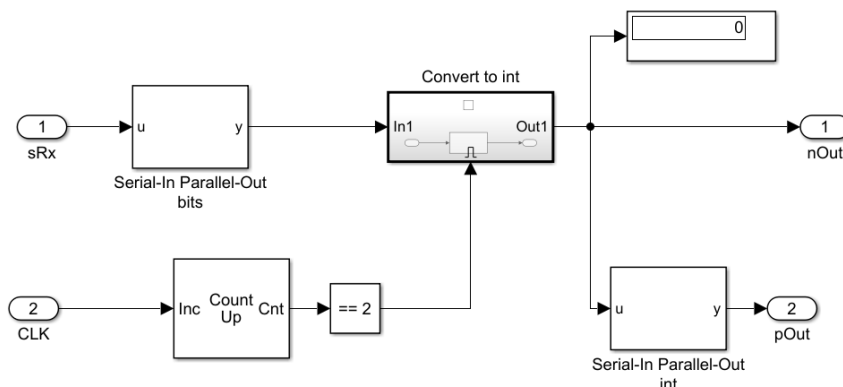


Рисунок 8. Приймач (*serial reciever*)

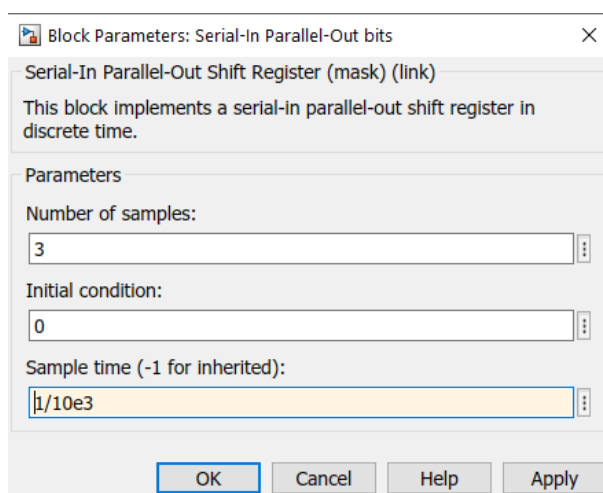


Рисунок 9. Налаштування блоку формування перестановки

Сигнал тактування CLK та дані sRx потрапляють на n -бітовий запам'ятовувальний пристрій. Сигнал тактування CLK також надходить до детектора елемента перестановки – лічильника. Лічильник обраховує кількість бітів, що надійшла через вхідний порт sRx, і

формує сигнал дозволу перетворення даних з двійкового в десяткове представлення для підсистеми *convert to int* (рисунок 10). Налаштування блоку *bit to integer converter* представлено на рисунку 11.

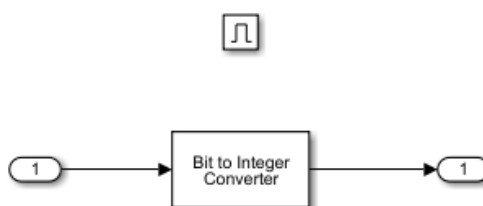


Рисунок 10. Підсистема перетворення даних з двійкового в десяткове представлення

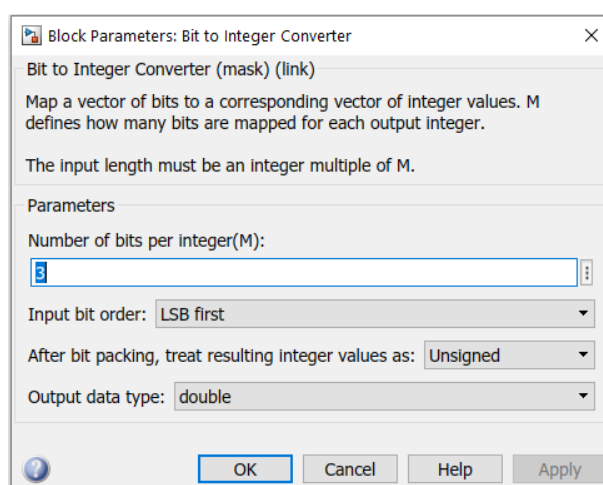


Рисунок 11. Налаштування підсистеми перетворення даних з двійкового в десяткове представлення

Обробник Rx перестановки впорядковує прийняті елементи перестановки. Отримана підсистемою перестановка приводиться до початкового вигляду за формулою (1), алгоритм упорядкування реалізовано окремою

функцією MATLAB з вхідними даними u та вихідними y . Підсистема також виконує запис до зовнішнього файлу прийнятих перестановок. Підсистема є тригерною, тобто спрацьовує за сигналом TxOk.

Обробник Rx перестановки містить (рис. сунок 12): функцію впорядкування елементів перестановки (pResort), блок збереження да-

них до зовнішнього файлу inData, вхідні та вихідні порти.

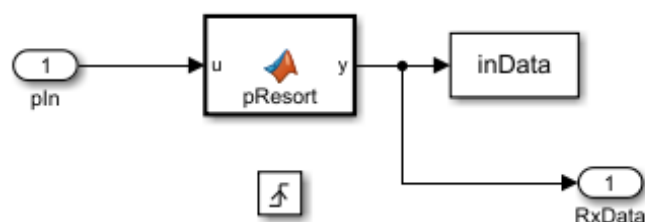


Рисунок 12. Обробник Rx перестановки

Лічильник прийнятих перестановок (*Rx no error calculation*) порівнює відправлену перестановку з отриманою, веде підрахунок кількості перестановок, які ідентичні вхідному інформаційному повідомленню, окремо фіксує отримані перестановки з невиявленою помилкою, які є перестановками, проте не

ідентичні відправленому інформаційному повідомленню.

Лічильник містить (рис. сунок 13): блок порівняння, аналізатор елементів перестановок, лічильник перестановок, не пошкоджених помилкою, підсистему фіксації невиявлених пошкоджених перестановок (рис. сунок 14), вхідні та вихідні порти.

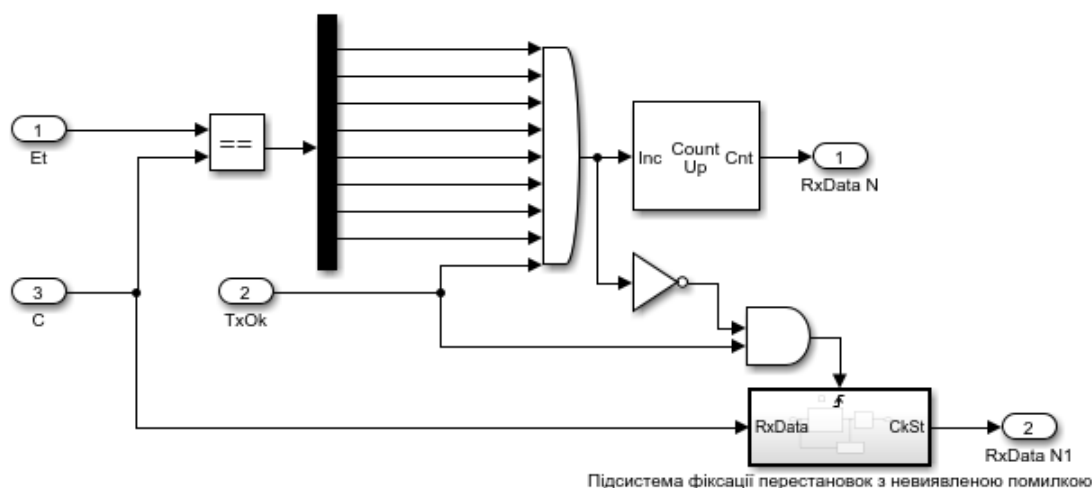


Рисунок 13. Лічильник прийнятих перестановок (*Rx no error calculation*)

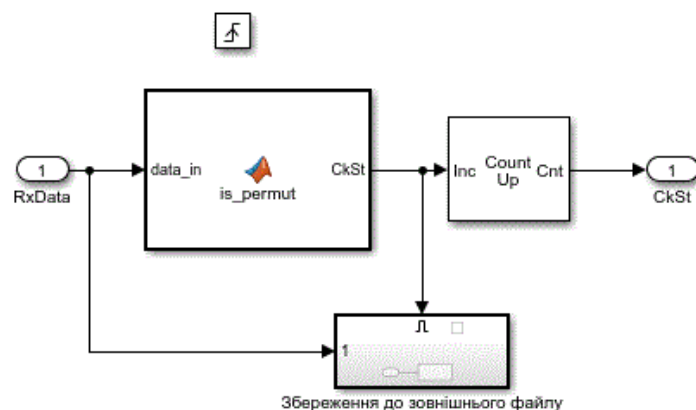


Рисунок 14. Підсистема фіксації перестановок з невиявленою помилкою

На вхід підсистеми *Rx no error calculation* надходять дві перестановки: перестановка для передавання (порт Et) та перестановка на виході двійкового симетричного каналу (порт C). Ці перестановки потрапляють до блоку порівняння, в якому кожний елемент перестановки оброблюється за заданою умовою

$$C \& Et = [C_M, C_{M-1}, \dots, C_1] \& [Et_M, Et_{M-1}, \dots, Et_1] \& [TxOk] = \\ = \left[(C_M) \& (Et_M), (C_{M-1}) \& (Et_{M-1}), \dots \right] \& (TxOk). \quad (4)$$

де $C \& Et$ – логічний сигнал, що потрапляє на лічильник перестановок, не пошко-

джених помилкою. Сигнал формується за умови співпадання всіх елементів перестановки, отриманих приймачем, з початковими елементами вхідної перестановки;

C_M – перестановка на виході двійкового симетричного каналу зв'язку;

Et – перестановка для передавання.

У результаті аналізу заданої блоком порівняння умови (елементи повинні співпадати) формуються логічні сигнали: логічна «1», якщо елементи задовольняють умову, логічний «0», якщо елементи не задовольняють умову. Приклад функціонування блоку порівняння за формулою (4) наведено на рисунку 15.

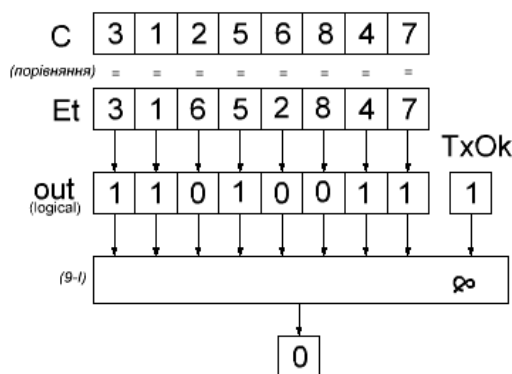


Рисунок 15. Приклад формування сигналу підрахунку кількості перестановок без каналної помилки

Опис алгоритму підрахунку перестановок, не пошкоджених помилкою. До аналізатора елементів перестановок (логічний елемент AND на 9 входів) надходить отриманий вектор логічних значень (рисунк 15, *out*). У результаті виконання логічної умови (формула (4)) та наявності сигналу передавання останнього біту поточної перестановки через порт TxOk формується сигнал лічильника про те, що перестановку з M елементів передано правильно. За умови неспівпадіння хоча б одного елемента перестановки сигнал не формується. Кількість отриманих сигналів після аналізатора елементів перестановок фіксується лічильником, а результат підрахунку виводиться на дисплей через вихідний порт RxData N1.

Підсистема фіксації перестановок з невиявленою помилкою. Склад підсистеми (рисунк 14): функція *is_permut*, лічильник

перестановок з невиявленою помилкою, підсистема збереження зафіксованих перестановок до зовнішнього файлу, вхідні/вихідні порти. Функція *is_permut* виконує роль аналізатора даних, отриманих з входу RxData. Функція повертає логічну одиницю, якщо вхідна послідовність є перестановкою. Кількість сформованих сигналів фіксується лічильником, значення лічильника надходить на вихідний порт RxData N1.

Підсистема фіксації перестановок з невиявленою помилкою отримує сигнал на виконання від підсистеми *Rx no error calculation* за таких умов:

- отримана перестановка через вхідний порт C не співпадає з відправленою перестановкою (вхідний порт Et);
- відбулося передавання останнього біту в канал зв'язку (сигнал TxOk).

Двійковий симетричний канал зв'язку (Channel) містить (рисунок 16): блок binary symmetric channel (BSC), вхідні та вихідні порти.

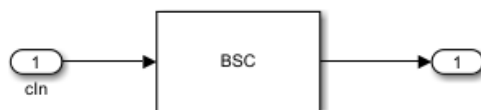


Рисунок 16. Двійковий симетричний канал зв'язку (Channel)

До головних налаштувань блоку BSC входять (рисунок 17): імовірність помилки (Error probability) від 0 до 1; початкове «зерно» (*initial seed*) використовується для генерації псевдовипадковості.

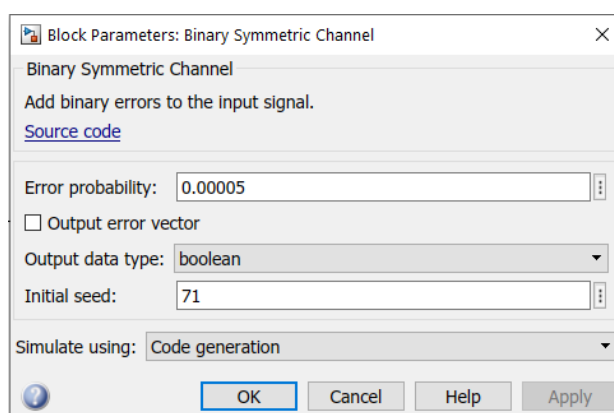


Рисунок 17. Налаштування binary symmetric channel

Результати досліджень. За створеною імітаційною моделлю системи передавання перестановок двійковим симетричним каналом за довжини перестановки $M=8$ і рівномірного кодування її символів проведемо симуляцію передавання $N=10000$ перестановок для каналів з різними ймовірностями бітових помилок: $p_0 = 0.05$ (експеримент № 1), $p_0 = 0.1$ (експеримент № 2), $p_0 = 0.15$ (експеримент № 3). Виконаємо аналіз отриманих результатів за допомогою інструменту Data Inspection.

Опис і результати експерименту № 1. Імовірність бітової помилки $p_0 = 0.05$, *initial seed* – 666, вхідна перестановка $\pi = [3, 6, 5, 2, 4, 0, 1, 7]$.

Кількість перестановок, отриманих без пошкодження помилкою, дорівнює

$N_{noerr}(0.05) = 2929$. Кількість перестановок з невиявленою помилкою становила $N_{ud}(0.05) = 110$. Кількість перестановок, пошкоджених помилкою та перетворених у неперестановку, дорівнює $N_{det}(0.05) = 6961$ (рисунок 18).

Дослідимо проілюстровані на рисунку 18 дані. Верхній графік демонструє сигнали на вході та на виході каналу зв'язку. Вісь абсцис позначає час симуляції. Відмінності в сигналах на вході та на виході каналу зв'язку зафіксовано на нижньому графіку. Відхилення приймає значення з множини $\{-1; 1\}$. Значення «-1» означає наявність логічного нуля в отриманих даних замість логічної одиниці, «1» – наявність логічної одиниці в отриманих даних, де повинен бути логічний нуль.

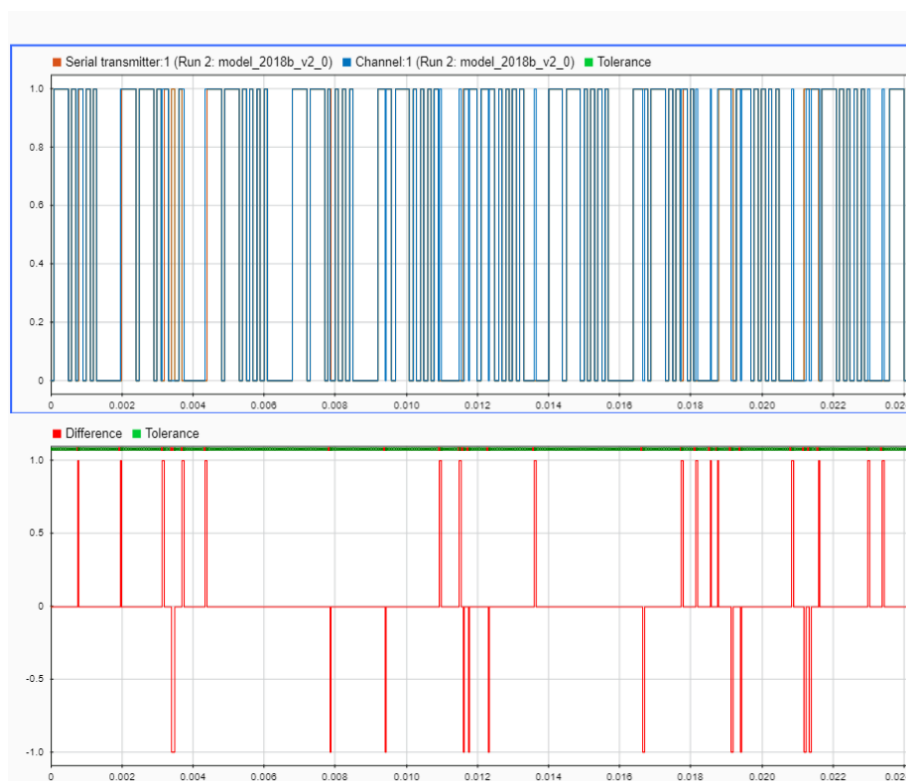


Рисунок 18. Графік Data Inspection за ймовірності бітової помилки $p_0 = 0.05$ (наведено перші 10 блоків інформаційного повідомлення)

Рисунок 19 демонструє відомості про статистичні показники передавання під час симуляції. У результаті проведення експерименту № 1 маємо: відносна частота появи бітової помилки $w(0.05) = 0.0491$, кількість помилкових бітів – $1.179 \cdot 10^4$, загальна кількість переданих і прийнятих бітів – $2.4 \cdot 10^5$.

Абсолютне відхилення значення відносної частоти появи бітової помилки від заданої в параметрах (рисунок 19) p_0 з ймовірністю $\gamma = 0.95$ не повинно виходити за межі:

$$|w(p_0) - p_0| \leq \varepsilon = 1.96 \sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{N}}. \quad (5)$$

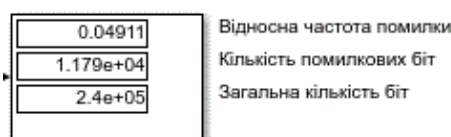


Рисунок 19. Результати передавання бітів каналом зв'язку

Інакше кажучи, відносна частота появи бітової помилки з ймовірністю $\gamma = 0.95$ повинна потрапляти у відрізок

$$p_0 - 1.96 \sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{N}} \leq w(p_0) \leq p_0 + 1.96 \sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{N}}. \quad (6)$$

Для $p_0 = 0.05$ вираз (формула (6)) набуває вигляду: $0.0457 \leq w(0.05) \leq 0.0543$, а значення відносної частоти $w(0.05) = 0.0498$

потрапляє в цей відрізок. Відносна частота перестановок з виявленою помилкою в експерименті № 1 становила $W_{det}(0.05) = N_{det}(0.05)/N = 0.6961$. Відносна частота перестановок з невиявленою помилкою – $W_{ud}(0.05) = N_{ud}(0.05)/N = 0.0110$.

Опис і результати експерименту № 2. Ймовірність бітової помилки $p_0 = 0.1$, *initial seed* – 53, вхідна перестановка

$\pi = [3, 6, 5, 2, 4, 0, 1, 7]$. Кількість перестановок, отриманих без пошкодження помилкою, дорівнює $N_{\text{погр}}(0.1) = 768$. Кількість перестановок з невиявленою помилкою становила $N_{\text{уд}}(0.1) = 139$. Кількість перестановок, пошкоджених помилкою та перетворених у неперестановку, дорівнює $N_{\text{дет}}(0.1) = 9093$, (рисунок 20).

Для $p_0 = 0.1$ вираз (формула (6)) набуває вигляду: $0.0941 \leq w(0.1) \leq 0.1059$, а значення відносної частоти $w(0.1) = 0.1006$ потрапляє в цей відрізок. Відносна частота перестановок з виявленою помилкою в експерименті № 2 становила $W_{\text{дет}}(0.1) = N_{\text{дет}}(0.1)/N = 0.9093$. Відносна частота перестановок з невиявленою помилкою – $W_{\text{уд}}(0.1) = N_{\text{уд}}(0.1)/N = 0.0139$ (рисунок 21).

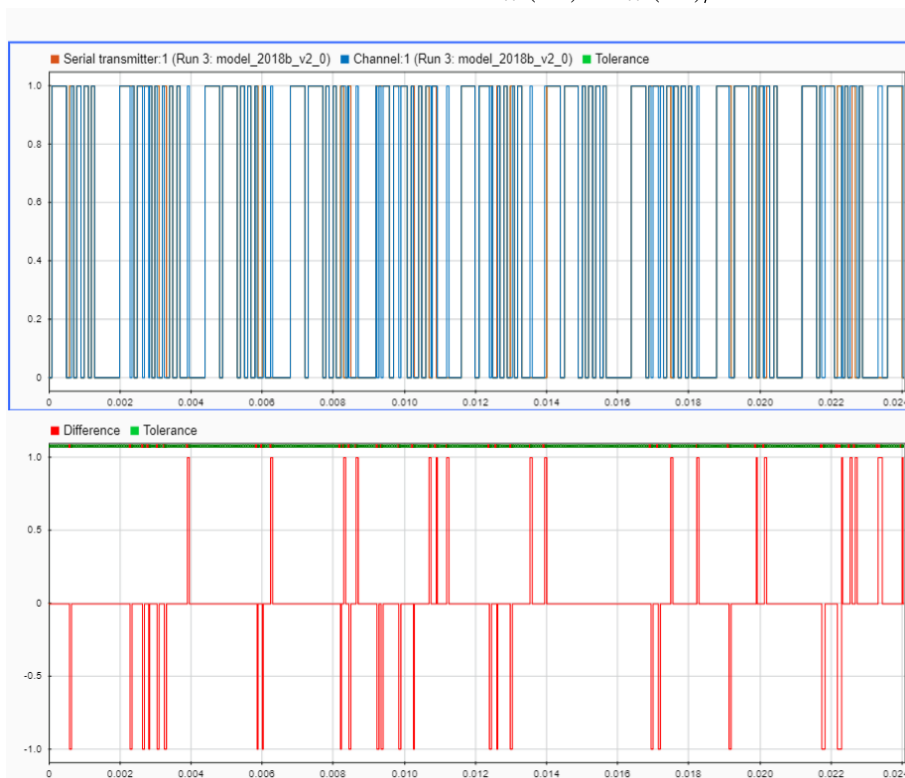


Рисунок 20. Графік Data Inspection за ймовірності бітової помилки $p_0 = 0.1$ (наведено перші 10 блоків інформаційного повідомлення)

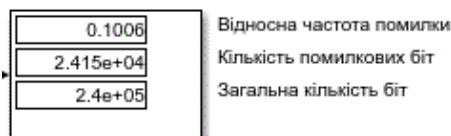


Рисунок 21. Результати передавання бітів каналом зв'язку

Опис і результати експерименту № 3. Ймовірність бітової помилки $p_0 = 0.15$, *initial seed* – 74, вхідна перестановка $\pi = [3, 6, 5, 2, 4, 0, 1, 7]$. Кількість перестановок, отриманих без пошкодження помилкою, дорівнює $N_{\text{погр}}(0.15) = 215$. Кількість перестановок з невиявленою помилкою становила $N_{\text{уд}}(0.15) = 94$. Кількість перестановок, пош-

коджених помилкою та перетворених у неперестановку, дорівнює $N_{\text{дет}}(0.15) = 9691$, (рисунок 22).

Для $p_0 = 0.15$ вираз (формула (6)) набуває вигляду: $0.1430 \leq w(0.15) \leq 0.1570$, а значення відносної частоти $w(0.15) = 0.1499$ потрапляє в цей відрізок. Відносна частота перестановок з виявленою помилкою в експерименті № 3 становила

$W_{det}(0.15) = N_{det}(0.15)/N = 0.9691$. Відносно кою – $W_{ud}(0.15) = N_{ud}(0.15)/N = 0.0094$ (рисун- частота перестановок з невиявленою помил- нок 23).

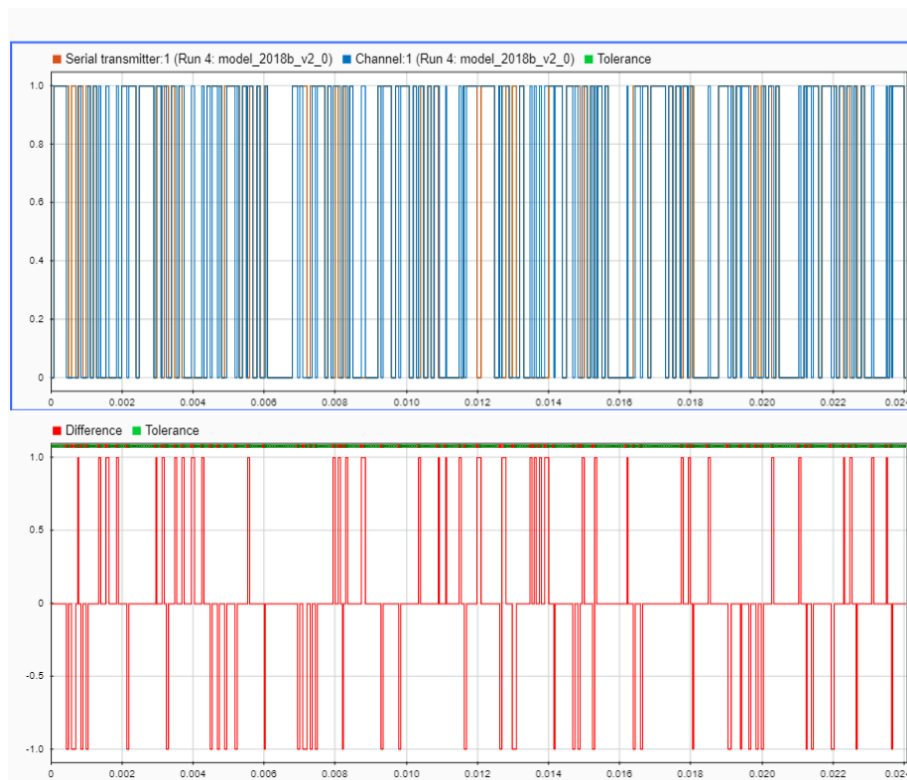


Рисунок 22. Графік Data Inspection за ймовірності бітової помилки $p_0 = 0.15$ (наведено перші 10 блоків інформаційного повідомлення)

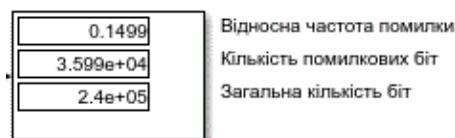


Рисунок 23. Результати передавання бітів каналом зв'язку

Обговорення результатів. Побудована імітаційна модель дозволила дослідити вплив каналної помилки на інформаційні повідомлення. У результаті проведення трьох експериментів отримано такі результати відносної частоти пошкодження перестановки та перетворення її в неперестановку (виявлення помилки в отриманій перестановці): експеримент № 1 – $W_{det}(0.05) = 0.6961$ за $p_0 = 0.05$, експеримент № 2 – $W_{det}(0.1) = 0.9093$ за $p_0 = 0.1$, експеримент № 3 – $W_{det}(0.15) = 0.9691$ за $p_0 = 0.15$.

Відносна частота не виявленої в отриманій перестановці помилки дорівнює: $W_{ud}(0.05) = 0.0110$, $W_{ud}(0.1) = 0.0139$, $W_{ud}(0.15) = 0.0094$.

Відносна частота отримання перестановки без помилок дорівнює: $W_{noerr}(0.05) = 0.2929$, $W_{noerr}(0.1) = 0.0768$, $W_{noerr}(0.15) = 0.0215$.

Імовірність отримання перестановки без помилок дорівнює

$$Q(p_0) = (1 - p_0)^{24}. \quad (7)$$

Для $p_0 \in \{0.05, 0.1, 0.15\}$ ця ймовірність набуває значень $Q(0.05) = 0.2920$, $Q(0.1) = 0.0798$, $Q(0.15) = 0.0202$.

Абсолютне відхилення значення відносної частоти отримання перестановки без помилок від теоретично визначеної ймовірності (7) з імовірністю $\gamma = 0.95$ не повинно виходити за межі:

$$|W_{noerr}(p_0) - Q(p_0)| \leq E = 1.96 \sqrt{\frac{Q(p_0)(1-Q(p_0))}{N}}. \quad (8)$$

Інакше кажучи, відносна частота отримання перестановки без помилок з ймовірністю $\gamma = 0.95$ повинна потрапляти у відрізок

$$\begin{cases} W_{noerr}(p_0) \geq Q(p_0) - 1.96 \sqrt{\frac{Q(p_0)(1-Q(p_0))}{N}}, \\ W_{noerr}(p_0) \leq Q(p_0) + 1.96 \sqrt{\frac{Q(p_0)(1-Q(p_0))}{N}}. \end{cases} \quad (9)$$

Для $p_0 \in \{0.05, 0.1, 0.15\}$ вираз (формула (9)) отримує вигляд:

$$0.2831 \leq W_{noerr}(0.05) \leq 0.3009,$$

$$0.0745 \leq W_{noerr}(0.1) \leq 0.0851,$$

$0.0175 \leq W_{noerr}(0.15) \leq 0.0230$. Як видно, отримані експериментальні показники лежать у визначених межах.

Довірчий інтервал для ймовірності невиявленої помилки в перестановці за відомою відносною частотою $W_{ud}(p_0)$ з надійністю $\gamma = 0.95$

$$\begin{cases} P_{ud}(p_0) \geq W_{ud}(p_0) - 1.96 \sqrt{\frac{W_{ud}(p_0)(1-W_{ud}(p_0))}{N}}, \\ P_{ud}(p_0) \leq W_{ud}(p_0) + 1.96 \sqrt{\frac{W_{ud}(p_0)(1-W_{ud}(p_0))}{N}}. \end{cases} \quad (10)$$

Таким чином, для $p_0 \in \{0.05, 0.1, 0.15\}$ і $\gamma = 0.95$ маємо:

$$0.0090 \leq P_{ud}(0.05) \leq 0.0130,$$

$$0.0116 \leq P_{ud}(0.1) \leq 0.0162,$$

$$0.0075 \leq P_{ud}(0.15) \leq 0.0113.$$

Зауважимо, що наявність невиявлених помилок в отриманих повідомленнях може призводити до аварійних ситуацій (стоп програми, некоректне розпізнавання даних) на стороні приймача. За високої ймовірності бітової помилки в каналі зв'язку отримані оцінки ймовірності невиявленої помилки факторіальним кодом з відновленням даних за перестановкою можуть не задовольняти поставленим вимогам і тому вимагати додаткових методів підвищення достовірності.

Висновки. У роботі розроблено структуру та створено модель системи передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням даних, яка за рахунок реалізації процедур біктивного перетворення інформа-

ційного повідомлення в перестановку дозволяє дослідити вплив помилки в каналі зв'язку на достовірність отриманої інформації.

Результати експериментальних досліджень передавання інформаційного повідомлення двійковим симетричним каналом зв'язку з заданими ймовірностями бітової помилки $p_0 \in \{0.05, 0.1, 0.15\}$ свідчать про їх відповідність теоретичним показникам, що свідчить про адекватність побудованої моделі. Визначено довірчий інтервал для ймовірності невиявленої помилки в залежності від p_0 .

Розроблена імітаційна модель системи передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням даних дозволяє досліджувати та відпрацьовувати надалі методи підвищення достовірності та завадостійкості інформації.

Предметом подальших досліджень є розширення запропонованої моделі системи передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням даних до моделі захищеного інформаційного обміну з використанням трьохетапного криптографічного протоколу на основі перестановок [15].

Список використаних джерел

- [1] *Звіт про роботу системи виявлення вразливостей і реагування на кіберінциденти та кібератаки*, Оперативний центр реагування на кіберінциденти державного центру кіберзахисту державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України, 2022(Q3), 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://scpc.gov.ua/api/docs/4eeb6a10-b7aa-4396-8b04-e0e4b7fca1ba/4eeb6a10-b7aa-4396-8b04-e0e4b7fca1ba.pdf>
- [2] *Постанова Кабінету Міністрів України № 1295, груд. 23, 2020, Деякі питання забезпечення функціонування системи виявлення вразливостей і реагування на кіберінциденти та кібератаки*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1295-2020-%D0%BF#Text>
- [3] "Статистика кібератак за чотири місяці війни". *Держспецзв'язку*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/news/derzhspeczvyazku-statistika-kiberatak-za-chotiri-misyaci-vijni>.

- [4] "Кібератаки групи UAC-0118 – дослідження CERT-UA", *Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cip.gov.ua/ua/news/kiberataki-grupi-uac-0118-doslidzhennya-cert-ua>
- [5] "Які російські та проросійські хакери атакують Україну", *Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cip.gov.ua/ua/news/yaki-rosiiski-ta-prorosiiski-khakeri-atakuyut-ukrayinu>
- [6] "Kali Linux". [Online]. Available: <https://www.kali.org/>
- [7] "Are your passwords in the green?" [Online]. Available: <https://www.hivesystems.io/blog/are-your-passwords-in-the-green>
- [8] *Наказ Адміністрації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України № 601, черв. 2021, Методичні рекомендації щодо підвищення рівня кіберзахисту критичної інформаційної інфраструктури*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cip.gov.ua/ua/news/nakaz-ad-2021-10-06-601>
- [9] Э. В. Фауре, "Факториальное кодирование с исправлением ошибок", *Радиоелектроніка, інформатика, управління*, № 3, с. 130-138, 2017. doi: 10.15588/1607-3274-2017-3-15.
- [10] Э. В. Фауре, "Факториальное кодирование с восстановлением данных", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 33-39, 2016.
- [11] J. Al-Azzeh, B. Ayyoub, E. Faure, V. Shvydkyi, O. Kharin, and A. Lavdanskyy, "Telecommunication systems with multiple access based on data factorial coding", *International Journal on Communications Antenna and Propagation*, vol. 10, no. 2, pp. 102-113, 2020. doi: 10.15866/irecap.v10i2.17216.
- [12] M. Bóna, *Combinatorics of Permutations*. CRC Press, 2022.
- [13] E. Faure, A. Shcherba, B. Stupka, I. Voronenko, and A. Baikenov, "A method for reliable permutation transmission in short-packet communication systems", in *Information Technology for Education, Science and Technics. Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, (in press), 2022.
- [14] D. K. Chaturvedi, *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB® and Simulink®*. CRC press, 2017.
- [15] A. Shcherba, E. Faure, and O. Lavdanska, "Three-pass cryptographic protocol based on permutations", in *2020 IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 2020, pp. 281-284. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349343.

References

- [1] *Report on the work of the system for detecting vulnerabilities and responding to cyber incidents and cyber attacks*, Operational center for responding to cyber incidents of the state cyber protection center of the state service of special communications and information protection of Ukraine, 2022(Q3), 2022. [Online]. Available: <https://scpc.gov.ua/api/docs/4eeb6a10-b7aa-4396-8b04-e0e4b7fca1ba/4eeb6a10-b7aa-4396-8b04-e0e4b7fca1ba.pdf> [in Ukrainian].
- [2] *Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 1295, Dec. 23, 2020, Some issues of ensuring the functioning of the system for detecting vulnerabilities and responding to cyber incidents and cyber attacks*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1295-2020-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
- [3] "Statistics of cyber attacks for four months of war", *Derzhspetsviazku*. [Online]. Available: <https://www.kmu.gov.ua/news/derzhspetsviazku-statistika-kiberatak-za-chotirimisyaci-vijni> [in Ukrainian].
- [4] "Cyber attacks of the UAC-0118 group - CERT-UA research", *Derzhavna sluzhba spetsialnoho zviazku ta zakhystu informatsii Ukrainy*. [Online]. Available: <https://cip.gov.ua/ua/news/kiberataki-grupi-uac-0118-doslidzhennya-cert-ua> [in Ukrainian].
- [5] "What Russian and pro-Russian hackers are attacking Ukraine", *Derzhavna sluzhba spetsialnoho zviazku ta zakhystu informatsii Ukrainy*. [Online]. Available: <https://cip.gov.ua/ua/news/yaki-rosiiski-ta-prorosiiski-khakeri-atakuyut-ukrayinu> [in Ukrainian].
- [6] "Kali Linux". [Online]. Available: <https://www.kali.org/>

- [7] "Are your passwords in the green?" [Online]. Available: <https://www.hivesystems.io/blog/are-your-passwords-in-the-green>
- [8] *Order of the Administration of the State Service for Special Communications and Information Protection of Ukraine no. 601, June 2021, Methodological recommendations for increasing the level of cyber protection of critical information infrastructure*. [Online]. Available: <https://cip.gov.ua/ua/news/nakaz-ad-2021-10-06-601> [in Ukrainian].
- [9] E. V. Faure, "Factorial coding with error correction", *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, no. 3, pp. 130-138, 2017. doi: 10.15588/1607-3274-2017-3-15 [in Russian].
- [10] E. V. Faure, "Factorial coding with data recovery", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 2, pp. 33-39, 2016 [in Russian].
- [11] J. Al-Aazzeh, B. Ayyoub, E. Faure, V. Shvydkyi, O. Kharin, and A. Lavdanskyyi, "Telecommunication systems with multiple access based on data factorial coding", *International Journal on Communications Antenna and Propagation*, vol. 10, no. 2, pp. 102-113, 2020. doi: 10.15866/irecap.v10i2.17216.
- [12] M. Bóna, *Combinatorics of Permutations*. CRC Press, 2022.
- [13] E. Faure, A. Shcherba, B. Stupka, I. Voronenko, and A. Baikenov, "A method for reliable permutation transmission in short-packet communication systems", in *Information Technology for Education, Science and Technics. Lecture Notes in Computational Science and Engineering*, (in press), 2022.
- [14] D. K. Chaturvedi, *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB® and Simulink®*. CRC press, 2017.
- [15] A. Shcherba, E. Faure, and O. Lavdanska, "Three-pass cryptographic protocol based on permutations", in *2020 IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 2020, pp. 281-284. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349343.

E. V. Faure, Dr. Sc., Professor,
A. B. Skutskyi,
e-mail: a.b.skutskyi.asp21@chdtu.edu.ua
A. O. Lavdanskyyi, Ph. D., Associate Professor,
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

SIMULATION MODEL FOR INFORMATION TRANSMISSION SYSTEM WITH NON-SEPARABLE DATA FACTORIAL CODING IN SIMULINK ENVIRONMENT

The work is devoted to the development and research of a simulation model, which includes the information transmission system with non-separable factorial coding of data in Simulink environment. The approach is based on the use of non-separable factorial coding of data that allows the implementation of integrated information security against unauthorized access and channel errors. Non-separable factorial coding involves the bijective transformation of an information message or its part into a permutation. The list of protocols must be developed. These protocols are aimed at solving the tasks of synchronizing transmitter and receiver, establishing communication, agreeing keys, and monitoring the information reliability for practical use of data factorial coding in information and communication systems. In order to minimize the developer's time and resources, all solutions in information exchange protocols, based on non-separable data factorial coding, should be simulated on appropriate computer models. The developed simulation model includes the transmitter that realizes the permutation formation, coding symbols with a binary uniform code, and transmission of the received sequence through a binary symmetric communication channel with independent bit errors. The receiver implements reverse conversion from a binary message into a symbolic one. In the process of simula-

tion, the quantity of information messages correctly received and damaged by an error are recorded. In addition, cases of undetected errors on the received side are counted. The structure of the simulation model has been developed, and the functional purpose of each subsystem has been determined. The stages for model construction and configuration in Simulink environment are described in details. The built simulation model allows to investigate the influence of channel error on information messages. The results of experimental studies of information message transmission through a binary symmetric communication channel with given bit error probabilities testify to their correspondence to theoretical estimates and to the adequacy of the constructed model. The obtained simulation model will make it possible to conduct experiments to study data factorial coding in communication channels of different quality. In addition, the developed model is the basis for constructing a model of secure information exchange through a three-pass cryptographic protocol based on permutations.

Keywords: factorial code, permutation, binary symmetric channel, error probability, simulation.

[0000-0002-4720-0267] **О. О. Ситник**¹, д-р техн. наук, професор,
[0000-0003-1329-635X] **В. Б. Кисельов**¹, канд. техн. наук, доцент,
[0000-0002-2755-3890] **Г. О. Кисельова**¹, ст. викладач,
e-mail: annakys.777@gmail.com

[0000-0003-2128-2388] **В. І. Костюченко**², канд. техн. наук, доцент
e-mail: vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua

¹Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

²Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНІКИ

Стаття присвячена побудові математичної моделі надійності пристроїв комп'ютерної техніки. Математична модель побудована шляхом використання рівняння дифузії ймовірностей, яке відповідає стохастичному процесу і являє собою двопараметричну функцію, оцінки параметрів якої мають досить прості аналітичні вирази, що задовольняє вимогам інженерної практики. Комп'ютерна техніка знаходить широке застосування як різні пристрої (персональні комп'ютери, комп'ютери, ноутбуки, мейнфрейми, кластери, сервери, робочі станції). Їх основне призначення полягає в забезпеченні для користувача постійного доступу до інформації, яка зберігається на їх носіях, та можливості безперервної обробки цієї інформації, що зумовлює необхідність постійної підтримки подібних систем у працездатному стані. Таким чином, комп'ютерна техніка належить до систем, які вимагають високого ступеня (рівня) надійності. Враховуючи, що рівень надійності будь-якої техніки в процесі її експлуатації постійно знижується, що зумовлено процесами старіння та зношування, визначення та прогнозування надійності є актуальним науково-технічним завданням. Одними з найбільш поширених методів визначення та прогнозування стану об'єкта в будь-який момент часу є ймовірно-фізичні методи, які базуються на застосуванні ймовірнісних моделей для обробки статистичної інформації, отриманої в процесі експлуатації, або випробування реальних фізичних об'єктів. Незалежно від типу комп'ютерної техніки, до її складу входять електронні, електричні та електромеханічні елементи, зі збереженням їх функціональних властивостей на весь період застосування. Відповідно до сучасних поглядів на роботу електронних, електричних та електромеханічних елементів комплексним фактором, що характеризує технічний стан елемента, є якісне проходження електричного сигналу через контактні з'єднання, яке визначається величиною контактної опору. Отримана математична модель щільності розподілу є двопараметричною функцією, параметри якої мають фізичну інтерпретацію у вигляді швидкості зміни контактної опору та середньоквадратичного відхилення швидкості.

Ключові слова: ймовірно-фізичний метод, двопараметрична функція, визначальний параметр, контактний опір, рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова.

Вступ. Останнім часом під поняттям комп'ютерної техніки розуміють комплекс, що описує весь спектр застосовуваних комп'ютерних систем – від персональних комп'ютерів до периферійного й офісного обладнання, яке працює спільно з комп'ютерами і забезпечує деяку додаткову функціональність (друк або сканування документів, доступ до мережі, захист від збоїв живлення тощо). Особливості роботи комп'ютерної техніки зумовлені дією цілого комплексу різних факторів, одні з яких пов'язані з конструкцією, технологією, виго-

товленням, застосованими матеріалами, а інші є наслідком умов експлуатації. Процеси, які супроводжують і визначають надійність комп'ютерної техніки, надзвичайно складні, мають випадковий характер і ще недостатньо вивчені. Нині немає загальноприйнятої теорії зношування і старіння елементів комп'ютерної техніки, на підставі якої можна було б вирішувати завдання надійності останньої.

Багато дослідників вважають, що пошук шляхів створення якісних та високонадійних компонентів комп'ютерної техніки вимагає

вирішення питань, пов'язаних з вивченням природи і закономірностей виникнення відмов [1-5].

Роботу компонентів комп'ютерної техніки супроводжує цілий комплекс складних механо-фізико-хімічних і електричних процесів. Диференціація цих ще недостатньо вивчених нині процесів, корельованих і некорельованих, що відбуваються одночасно і послідовно, є складною науковою проблемою. Для розуміння найважливіших фізичних процесів, що в результаті призводять до відмови, низкою вчених зроблено вже багато. Зокрема, вплив різних факторів на характеристики електричних контактів з новими даними про передачу електричного струму на мікро- і нанорівнях розглянуто в роботі Міленко Брауновича, Миколи Мишкіна, Валерія Кончіца [19] та Пола Слейда [20]. Вивченню теорії нелінійних рівнянь Фоккера-Планка, які використовуються в ймовірно-фізичному методі прогнозування надійності, присвячені роботи Володимира Богачова, Миколи Крилова, Майкла Рокнера, Станіслава Шапошникова [3] та Френка Даніеля [15].

Істотний внесок у розвиток методів розрахунку кількісних показників надійності компонентів електронної техніки зробили вітчизняні вчені В. П. Стрельников і А. В. Федухин [1, 2], [4-9]. Із зарубіжних вчених, відомих своїми роботами в області теорії надійності, необхідно відзначити таких, як: Дейв Саурабх, Абхішек Рагхуванші [13], Даніель Сорін [14], Джітендра Кумар, Вікас Шінде та Мукта Калра [16], Мостафа Абд-Ель-Барр [17], Марвін Раусанд, Арнліот Хойланд [18] та Мартін Шуман [21].

Мета та задачі дослідження. Об'єктом дослідження є пристрої комп'ютерної техніки та їх елементи.

Метою дослідження є комплексне рішення задачі дослідження надійності комп'ютерної техніки та її елементів, що включає: розробку математичної моделі надійності, яка дозволяє оцінити і прогнозувати показники надійності при скорочених у часі випробуваннях; вибір визначального параметра, що має найкращі прогнозувальні властивості.

Пристрої комп'ютерної техніки переважно складаються з електронних та електро-механічних компонентів: друкованих плат з електронними та електричними елементами (транзисторами, діодами, мікросхемами, резисторами, конденсаторами і т. ін.), електричних та електромеханічних з'єднань (роз'ємних та

нероз'ємних) між компонентами; електромеханічних приводів. Основною причиною виходу з ладу таких пристроїв є порушення контакту всередині елементів або між елементами, яке може бути визначено в часі як зміна контактного опору.

У низці робіт [19, 20] відзначається, що зміна контактного опору в процесі експлуатації має три характерні ділянки. Перша ділянка, що характеризується порівняно збільшеним розкидом та інтенсивністю зміни динамічного контактного опору ($R_{\kappa 0}$), відповідає припрацюванню. Далі настає режим з усталеною середньою швидкістю зміни $R_{\kappa 0}$ і стабільнішим його значенням і, нарешті, при подальшій експлуатації настає етап, коли швидкість збільшення $R_{\kappa 0}$ значно зростає і швидко настає повне порушення контакту. Таким чином, процес зміни якості контактування проходить, як правило, за класичною схемою загальних процесів зношування, старіння, розрегулювання.

З огляду на викладені вище міркування про деякі механо-фізико-хімічні аспекти досліджуваного процесу, можна припустити, що його кінетика для досить загального випадку може бути описана стохастичним диференціальним рівнянням першого порядку такого вигляду [3, 15]:

$$d\varepsilon(t) = A(t)dt + B(t)d\eta(t), \quad (1)$$

де ε – деякий визначальний параметр, що характеризує якість контактування (рівень шуму або відносний час перевищення заданого рівня шуму, або будь-який інший параметр);

$A(t)$, $B(t)$ – деякі детерміновані функції, що характеризують зміну відповідно середнього значення і дисперсії визначального параметра;

$\eta(t)$ – випадкова складова.

Різноманіття статистично підсумованих флуктуацій, зазначених вище тільки частково, некорельованих і слабокорельованих, які формують у підсумку процес $\eta(t)$, дає підставу вважати останній нормально розподіленим з математичним очікуванням, рівним нулю, і дисперсією, пропорційною часу. Враховуючи останнє припущення, рівняння (1) являє собою стохастичне диференціальне рівняння (типу рівняння Іто) [15], яке описує випадковий марківський процес дифузійного типу.

Нижче ми будемо розглядати і будувати математичну модель для усталеного режиму,

при якому середня швидкість зміни визначального параметра є сталою величиною $A(t) = a$. Беручи до уваги постійність коефіцієнта варіації, наприклад такого параметра, як $R_{\text{зд}}$, можна припустити, що і середньоквадратичне відхилення швидкості зміни визначального параметра також є сталою величиною, тобто $B(t) = b$, а отже, модель досліджуваного процесу в цьому випадку можна записати в такому вигляді:

$$d\varepsilon(t) = adt + bd\eta(t). \quad (2)$$

Тобто процес зміни якості контактування в усталеному режимі роботи пропонується описувати стохастичним диференціальним рівнянням Іто з постійними коефіцієнтами зносу (a) і дифузії (b).

Завдання визначення аналітичних виразів для характеристик надійності вирішується повністю, якщо відома перехідна імовірність випадкового процесу поведінки визначального параметра і задані його граничні значення. Щільність імовірності перебування визначального параметра в заданій області збігається зі щільністю імовірності напрацювання на відмову. Імовірність же досягнення меж має відомий зв'язок з імовірністю переходу процесу з одного стану в інший. Перехідна щільність, що описує динаміку визначального параметра, може бути визначена безпосередньо з рішення рівняння динаміки (2), проте є сенс застосувати інший, більш раціональний спосіб, використовуючи рівняння дифузії імовірностей, відповідне стохастичному процесу (2).

Відомо, що перехідна щільність дифузійного марківського процесу є рішенням рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова [3, 15], яке в цьому випадку буде мати такий вигляд:

$$\frac{\partial \omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)}{\partial \tau} - \frac{b^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)}{\partial \varepsilon^2} + a \cdot \frac{\partial \omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)}{\partial \varepsilon} = 0. \quad (3)$$

Щільність імовірності розподілу часу виходу процесу із заданої області пов'язана зі щільністю умовної перехідної імовірності процесу в такий спосіб [3]:

$$g(t) = \left[-\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{\varepsilon_{\text{кр}}^-}^{\varepsilon_{\text{кр}}^+} \omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau) d\varepsilon \right]_{\tau=t}. \quad (4)$$

В останньому рівнянні позначено: $\omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)$ – щільність імовірності переходу з початкового стану (ε_0, t) в поточний стан (ε, τ) ; $\varepsilon_{\text{кр}}^-$, $\varepsilon_{\text{кр}}^+$ – відповідно нижня і верхня межі області можливих значень визначального параметра.

Щільність імовірностей розподілу напрацювання для загального випадку можна записати тоді в такому вигляді [2]:

$$f(t) = \int_0^{\infty} g(t) \cdot \varphi(T-t) dt, \quad (5)$$

де $\varphi(T-t)$ – щільність імовірності розподілу початкового часу, відповідного ε_0 (наприклад, щільність імовірності розподілу часу припрацювання).

Таким чином, визначення закону розподілу напрацювання на відмову зводиться до вирішення рівнянь (3), (4), (5).

Вид виразу для закону розподілу напрацювання на відмову визначається передусім вирішенням рівняння дифузії імовірності (3), що являє собою параболічне диференціальне рівняння в частинних похідних. Рішення цього рівняння насамперед залежить від крайових умов, що впливають із фізичних обмежень досліджуваного процесу.

Початкові умови в найзагальнішому випадку можуть бути задані у вигляді рівності щільності перехідної імовірності деякому довільному розподілу початкової ординати:

$$\omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau) \Big|_{\tau=t} = \omega_0(\varepsilon). \quad (6)$$

Функція $\omega_0(\varepsilon)$, виходячи із суті шуканої функції як щільності імовірності, повинна задовольняти умові нормування, тобто при $\tau = t$ інтеграл $\int \omega_0(\varepsilon) d\varepsilon = 1$ для області інтегрування, що містить точку ε_0 , і дорівнює нулю в іншому випадку.

Коли початкове значення ординати процесу задано (наприклад, зміна визначального параметра починається з будь-якої детермінованої величини), розподіл початкової ординати $\omega_0(\varepsilon)$ вироджується в дельта-функцію:

$$\omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau) \Big|_{\tau=t} = \delta(\varepsilon - \varepsilon_0). \quad (7)$$

Нижче при вирішенні рівняння дифузії імовірностей (3) як початкові умови прийма-

ється (7). Більш загальні початкові умови виду (6) не викликають принципових труднощів при знаходженні рішень.

Щодо визначення області зміни ординат досліджуваного процесу, то тут є сенс розглянути дві схеми постановки граничних умов, кожна з яких призводить до певного виразу для функції розподілу напрацювання на відмову.

Модель надійності, що впливає з рішення рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова. Як перший більш загальний випадок постановки граничних умов, відповідних досліджуваному процесу, можна прийняти наступне:

$$\left. \frac{\partial \omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_{кр}^-} = 0, \quad (8)$$

$$\omega(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)|_{\varepsilon=\varepsilon_{кр}^+} = 0, \quad (9)$$

Аналітичний вираз граничної умови (8) фізично означає наявність відбиваючого екрана в точці $\varepsilon = \varepsilon_{кр}^-$, тобто, коли реалізації процесу досягають лівої межі, вони відбиваються від неї як від дзеркального екрана і продовжують брати участь у процесі. При цьому через присутність таких реалізацій маса потоку імовірності переходу наче зсувається вліво, тим самим зменшується імовірність досягнення правих критичних значень.

Необхідність умови типу (9), тобто присутність поглинаючого екрана на правій межі, обумовлено тим, що, з огляду на немонотонний випадковий характер окремих реалізацій процесу, останні можуть після перетину критичного рівня повертатися назад в допустиму зону і далі брати участь у процесі. При наявності ж поглинаючої межі реалізації, вперше досягши її, наче прилипають до неї і далі в процесі не беруть участь. Фізична дія правої поглинаючої межі зводиться до деформування розподілу перехідної імовірності таким чином, що зменшується розсіювання, а середнє значення зміщується вліво.

Перейдемо до вирішення рівняння (3) для крайових умов (6), (8), (9).

Ввівши нову залежну змінну

$$\omega = \omega^* \cdot e^{\frac{a}{b^2}(\varepsilon - \varepsilon_0) - \frac{a^2 \cdot t}{2 \cdot b^2}}, \quad (10)$$

отримуємо для ω^* диференціальне рівняння

$$\frac{\partial \omega^*}{\partial t} = \frac{b^2}{2} \cdot \frac{\partial \omega^*}{\partial \varepsilon^2}. \quad (11)$$

Крайові умови при цьому набувають вигляду

$$\omega^*(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)|_{\tau=t} = \omega_0^*(\varepsilon); \quad (12)$$

$$\left[\frac{\partial \omega^*(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)}{\partial \varepsilon} + \frac{a}{b^2} \cdot \omega^*(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau) \right]_{\varepsilon=\varepsilon_{кр}^-} = 0; \quad (13)$$

$$\omega^*(\varepsilon_0, t; \varepsilon, \tau)|_{\varepsilon=\varepsilon_{кр}^+} = 0. \quad (14)$$

Функція $\omega^*(\varepsilon)$ задовольняє зазначеним умовам для $\omega_0^*(\varepsilon)$.

Для рішення рівняння (3) з крайовими умовами (7), (8), (9) з метою спрощення введемо нормування за визначальним параметром $\xi = \varepsilon / \varepsilon_{кр}^+$ і прийнемо: $\xi_{кр}^- = 0$, $\xi_{кр}^+ = 1$, $t = 0$.

Конструюємо розв'язок рівняння (11), намагаючись задовольнити граничній умові при $\xi = 0$, шляхом відповідного вибору продовження початкової функції за межі границі у від'ємну область.

$$\omega^* = \frac{1}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \times \int_0^\infty \left\{ \omega_0^*(\alpha) \cdot \left[e^{-\frac{(\alpha - \xi)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - e^{-\frac{(\alpha - \xi + 2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] + \omega_0^*(-\alpha) \cdot \left[e^{-\frac{(\alpha + \xi)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - e^{-\frac{(\alpha + \xi + 2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] \right\} d\alpha. \quad (15)$$

Тут α – введений параметр інтегрування з розмірністю і областю існування, яка збігається з ξ .

Перший доданок у квадратних дужках в підінтегральному виразі є частинним рішенням рівняння (11) для будь-якого α і умов (12), (14), в чому можна переконатися простою підстановкою.

Для того щоб скласти умову для виконання (13), обчислимо $(\partial \omega^* / \partial \xi)_{\xi=0}$ і $(\omega^*)_{\xi=0}$, диференціюючи і підставляючи відповідні значення в (15):

$$(\omega^*)_{\xi=0} = \frac{1}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \times \int_0^\infty \left[\omega_0^*(\alpha) - \omega_0^*(-\alpha) \right] \cdot \left[e^{-\frac{\alpha^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - e^{-\frac{(\alpha+2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] d\alpha;$$

$$\left(\frac{\partial \omega^*}{\partial \xi}\right)_{\xi=0} = \frac{1}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \times$$

$$\int_0^\infty \left\{ \left[\omega_0^*(\alpha) - \omega_0^*(-\alpha) \right] \cdot \frac{\alpha}{2 \cdot b^2 \cdot \tau} \cdot e^{-\frac{\alpha^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - \right.$$

$$\left. - \left[\omega_0^*(\alpha) - \omega_0^*(-\alpha) \right] \cdot \frac{\alpha + 2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau} \cdot e^{-\frac{(\alpha+2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right\} d\alpha.$$

Робимо заміну $z(\alpha) = \omega_0^*(\alpha) - \omega_0^*(-\alpha)$ і, інтегруючи по частинах, отримуємо:

$$\left(\frac{\partial \omega^*}{\partial \xi}\right)_{\xi=0} = \frac{1}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \times$$

$$\times \left\{ -z(\alpha) \cdot e^{-\frac{\alpha+2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \Big|_0^\infty + \int_0^\infty e^{-\frac{\alpha^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} z' d\alpha + \right.$$

$$\left. + z(\alpha) \cdot e^{-\frac{\alpha+2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \Big|_0^\infty - \int_0^\infty e^{-\frac{\alpha+2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} z' d\alpha \right\}.$$

Беручи до уваги те, що в нулі початкові функції збігаються, можна остаточно записати:

$$\left(\frac{\partial \omega^*}{\partial \xi}\right)_{\xi=0} = \frac{1}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \times$$

$$\times \int_0^\infty \left[\frac{d\omega_0^*(\alpha)}{d\alpha} - \frac{d\omega_0^*(-\alpha)}{d\alpha} \right] \cdot \left[e^{-\frac{\alpha^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - e^{-\frac{(\alpha+2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] d\alpha.$$

Враховуючи обчислені значення, умова (13) у розгорнутому вигляді набуває вигляду

$$\frac{1}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \times$$

$$\times \int_0^\infty \left[\frac{d\omega_0^*(\alpha)}{d\alpha} - \frac{d\omega_0^*(-\alpha)}{d\alpha} + \frac{a}{b^2} \cdot \omega_0^*(\alpha) + \right.$$

$$\left. + \frac{a}{b^2} \cdot \omega_0^*(-\alpha) \right] \cdot \left[e^{-\frac{\alpha^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - e^{-\frac{(\alpha+2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] d\alpha = 0.$$

Останній інтеграл для всіх значень τ обертається в нуль за умови:

$$\frac{d\omega_0^*(\alpha)}{d\alpha} - \frac{d\omega_0^*(-\alpha)}{d\alpha} +$$

$$+ \frac{a}{b^2} \cdot \omega_0^*(\alpha) + \frac{a}{b^2} \cdot \omega_0^*(-\alpha) = 0.$$

Знайдемо вираз для продовження початкової функції у від'ємну область, вирішуючи останнє рівняння:

$$\frac{d\omega_0^*(-\alpha)}{d\alpha} - \frac{a}{b^2} \cdot \omega_0^*(-\alpha) = \frac{d\omega_0^*(\alpha)}{d\alpha} + \frac{a}{b^2} \cdot \omega_0^*(\alpha).$$

В результаті інтегрування цього диференціального рівняння маємо:

$$\omega_0^*(-\alpha) = \omega_0^*(\alpha) + \frac{2 \cdot \alpha \cdot e^{-\frac{a}{b^2} \alpha}}{b^2} \cdot \int_0^\infty \omega_0^*(\alpha) \cdot e^{-\frac{a}{b^2} \alpha} d\alpha.$$

Підставляючи знайдене значення $\omega_0^*(-\alpha)$, отримаємо рішення рівняння (11), що задовольняє умовам (12), (13), (14) у наступному вигляді:

$$\omega^*(0, 0; \xi, \tau) = \frac{1}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot \int_0^\infty \left\{ \omega_0^*(\alpha) \times \right.$$

$$\left[e^{-\frac{(\alpha-\xi)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - e^{-\frac{(\alpha-\xi+2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] + \omega_0^*(\alpha) \cdot \left[e^{-\frac{(\alpha+\xi)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - \right.$$

$$\left. - e^{-\frac{(\alpha+\xi+2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] + \frac{2 \cdot a \cdot e^{-\frac{a}{b^2} \alpha}}{b^2} \cdot \left[e^{-\frac{(\alpha+\xi)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - \right.$$

$$\left. e^{-\frac{(\alpha+\xi+2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] \cdot \int_0^\alpha \omega_0^*(\alpha) \cdot e^{-\frac{a}{b^2} \alpha} d\alpha \Big\} d\alpha.$$

Конкретизуючи початковий розподіл, вважаємо, наприклад, що процес починається з деякої детермінованої величини $\xi = 0$. Тоді ω_0 перетворюється в дельта-функцію. Після деяких перетворень, враховуючи співвідношення (10), отримуємо такий вираз для щільності перехідної імовірності, що відповідає рішенням (3) і крайовим умовам (7), (8), (9):

$$\omega(0, 0; \xi, \tau) = \frac{2}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot \left[e^{-\frac{(\xi-\alpha\tau)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - \right.$$

$$\left. - e^{-\frac{(\xi-2-\alpha\tau)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau} + \frac{2 \cdot a}{b^2}} \right] + \frac{2 \cdot a}{b^2} \cdot \Phi\left(\frac{a \cdot \tau - \xi}{b \cdot \sqrt{\tau}}\right) -$$

$$- \frac{2 \cdot a}{b^2} \cdot e^{\frac{2 \cdot a}{b^2} \cdot (\xi-1)} \cdot \Phi\left(\frac{2 \cdot \tau + \xi - 2}{b \cdot \sqrt{\tau}}\right).$$

$$\text{Тут } \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^z e^{-\frac{u^2}{2}} du.$$

Якщо прийняті початкові нульові умови і нормований визначальний параметр, то вираз для щільності розподілу імовірностей напруцювання на відмову, враховуючи (4) і (5), можна переписати в такому вигляді:

$$f(T) = \left(- \int_{-\infty}^T \frac{\omega(0, 0; \xi, \tau)}{\partial \tau} d\xi \right)_{\tau=T}. \quad (17)$$

Обчислимо підінтегральний вираз (17).

Диференціюючи (16), маємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial \tau} = & \frac{\xi^2 - \alpha^2 \cdot \tau^2 - b^2 \cdot \tau}{b^3 \cdot \tau^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{(\xi - \alpha \cdot \tau)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - \\ & - \frac{(\xi - 2)^2 - \alpha^2 \cdot \tau^2 - b^2 \cdot \tau}{b^3 \cdot \tau^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{(\xi - \alpha \cdot \tau - 2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau} + \frac{2 \cdot a}{b^2}} + \\ & + \frac{\alpha \cdot (a \cdot \tau + \xi)}{b^3 \cdot \tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{(\alpha \cdot \tau - \xi)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - \\ & - \frac{\alpha \cdot (a \cdot \tau - \xi + 2)}{b^3 \cdot \tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{(\xi - \alpha \cdot \tau - 2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau} + \frac{2 \cdot a}{b^2}}. \end{aligned}$$

Зробивши деякі перетворення, можна записати останній вираз коротше:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial \tau} = & \frac{\xi^2 + \alpha \cdot \tau \cdot \xi - b^2 \cdot \tau}{b^3 \cdot \tau^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{(\xi - \alpha \cdot \tau)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - \\ & - \frac{(\xi - 2)^2 - (\xi + 2) \cdot \alpha \cdot \tau - b^2 \cdot \tau}{b^3 \cdot \tau^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{(\xi - \alpha \cdot \tau - 2)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau} + \frac{2 \cdot a}{b^2}}. \end{aligned}$$

Тепер проінтегруємо (17), підставивши отриманий вираз:

$$\begin{aligned} f(\tau) = & \int_{-\infty}^{\xi} \left[\frac{(\xi - 2)^2 - (\xi - 2) \cdot \alpha \cdot \tau - b^2 \cdot \tau}{b^3 \cdot \tau^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \times \right. \\ & \times e^{-\frac{(\xi - 2 - \alpha \cdot \tau)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau} + \frac{2 \cdot a}{b^2}} - \left. \frac{\xi^2 + \xi \cdot \alpha \cdot \tau - b^2 \cdot \tau}{b^3 \cdot \tau^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \tau}} \cdot e^{-\frac{(\xi - \alpha \cdot \tau)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} \right] d\xi. \end{aligned}$$

Зробимо заміни змінних:

$$z = \frac{(\xi - 2 - \alpha \cdot \tau)}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}}, \quad u = \frac{(\xi - \alpha \cdot \tau)}{b^2 \cdot \tau}.$$

Після деяких перетворень маємо:

$$\begin{aligned} f(\tau) = & \frac{1}{b^2 \cdot \tau^2 \cdot \sqrt{\pi}} \times \\ & \times \left\{ \int_{-\infty}^{\frac{1+\alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}} \left(2 \cdot b^2 \cdot z^2 + a \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau} \cdot z \right) \cdot \tau \cdot e^{-z^2} dz - \right. \\ & - \int_{-\infty}^{\frac{1-\alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}} \left(2 \cdot b^2 \cdot \tau \cdot u^2 + 3 \cdot a \cdot b \cdot \tau \cdot \sqrt{2 \cdot \tau} \cdot u + \right. \\ & \left. \left. + 2 \cdot a^2 \cdot \tau^2 - b^2 \cdot \tau \right) \cdot e^{-u^2} du \right\}. \end{aligned}$$

В результаті інтегрування отримуємо:

$$\begin{aligned} f(\tau) = & \frac{1}{b^2 \cdot \tau^2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \left\{ \left[-b^2 \cdot \tau \cdot \left(z \cdot e^{-z^2} \right) \right]_{-\infty}^{\frac{1+\alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}} + \right. \\ & + b^2 \cdot \tau \cdot \int_{-\infty}^{\frac{1+\alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}} e^{-z^2} dz - \frac{a \cdot b \cdot \tau \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}{2} \cdot e^{-z^2} - \\ & - b^2 \cdot \tau \cdot \int_{-\infty}^{\frac{1+\alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}} e^{-z^2} dz - \left[b^2 \cdot \tau \cdot \left(-u \cdot e^{-u^2} \right) \right]_{-\infty}^{\frac{1-\alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}} - \\ & - b^2 \cdot \tau \cdot \int_{-\infty}^{\frac{1-\alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}} e^{-u^2} du + \frac{3 \cdot a \cdot b \cdot \tau \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}{2} \cdot e^{-u^2} + \\ & \left. + \left(2 \cdot a^2 \cdot \tau^2 - b^2 \cdot \tau \right) \cdot \int_{-\infty}^{\frac{1-\alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{2 \cdot \tau}}} e^{-u^2} du \right\}. \end{aligned}$$

Провівши зворотну заміну, після деяких перетворень отримуємо вираз шуканої функції:

$$\begin{aligned} f(\tau) = & \frac{2 \cdot (1 + \alpha \cdot \tau)}{b \cdot \tau \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{(1 - \alpha \cdot \tau)^2}{2 \cdot b^2 \cdot \tau}} - \\ & - \frac{2 \cdot a^2}{b^2} \cdot \Phi \left(\frac{1 - \alpha \cdot \tau}{b \cdot \sqrt{\tau}} \right). \end{aligned}$$

Оскільки шукана функція являє собою щільність розподілу імовірностей, вона повинна задовольняти відомому нормуванню $\int_0^{+\infty} f(\tau) d\tau = 1$.

Здійснюючи відповідне нормування і перейшовши до параметра випробувань N (кількість циклів напрацювання), отримаємо вираз для щільності імовірності напрацювання на відмову остаточно в такому вигляді:

$$\begin{aligned} f(N) = & \frac{1 + a \cdot N}{2 \cdot b \cdot N \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}} \cdot e^{-\frac{(1 - a \cdot N)^2}{2 \cdot b^2 \cdot N}} - \\ & - \frac{a^2}{2 \cdot b^2} \cdot \Phi \left(\frac{1 - a \cdot N}{b \cdot \sqrt{N}} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Обговорення результатів. Отриманий математичний вираз для щільності розподілу часу до першої відмови є так званим дифузійним розподілом двопараметричної функції з конкретною фізичною інтерпретацією своїх параметрів, один з яких являє собою нормовану середню швидкість зміни визначального параметра, який характеризує якість контактування, а другий – середньоквадратичне відхилення.

Дифузійний розподіл має досить прості аналітичні вирази для оцінок своїх параметрів, а також для всіх основних показників надійності.

Дифузійний розподіл стійкий до операції згортки. Тому він може бути використаний для опису відмов при нелінійній зміні середнього значення визначального параметра. При цьому неоднорідний процес квантується на однорідні ділянки і час виходу за граничний рівень виходить в результаті згортки проміжків часу напрацювання на лінеаризованих ділянках, що містять стислий опис отриманих найважливіших наукових і практичних результатів.

Висновки. В результаті дослідження отримано математичну модель на основі стохастичного рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова та встановлено зв'язок ймовірності відмови і фізичного параметра (R_{kd}), що викликає відмову, внаслідок чого параметри ймовірнісного розподілу відмов мають певний фізичний сенс і конкретну фізичну інтерпретацію. Таким чином, отримано ймовірнісно-фізичну модель, що має перевагу перед строго ймовірнісними моделями надійності в тому, що її параметри можуть бути оцінені на підставі як статистики відмов, так і аналізу фізичних процесів деградації. Отримана математична модель може бути застосована для оцінки надійності як комп'ютерної техніки, так і інших електронних та електромеханічних пристроїв, які характеризуються наявністю контактного опору.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в отриманні математичної моделі здатної ефективно вирішувати необхідні для інженерної практики завдання оцінки надійності, зокрема розрахунок надійності технічних систем, що розширює можливості при вирішенні традиційних конструкторських і технологічних завдань по створенню високоякісних виробів і правильній їх експлуатації.

Практичне значення. Запропонована математична модель дозволяє вирішувати завдання оцінки надійності комп'ютерної техніки.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачається дослідження впливу запропонованої математичної моделі на точність оцінки надійності комп'ютерної техніки порівняно з традиційними ймовірнісними методами.

Список використаних джерел

- [1] А. В. Федухин, "К вопросу о прогнозировании остаточного ресурса изделий электронной техники", *Мат. машины и системы*, № 1, с. 149-156, 2020.
- [2] А. В. Федухин, и Н. В. Сеспедес-Гарсия, "К вопросу о статистическом моделировании надежности", *Мат. машины и системы*, № 1, с. 156-163, 2006.
- [3] V. Bogachev, N. Krylov, M. Rockner, and S. Shaposhnikov, *Fokker-Planck-Kolmogorov equations: Mathematical surveys and monographs*, vol. 207. USA: American Mathematical Society Providence, Rhode Island, 2015.
- [4] В. П. Стрельников, и А. В. Федухин, *Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем*. Киев, Украина: Логос, 2002.
- [5] В. П. Стрельников, А. Н. Волощук, и Н. Г. Вороная, "Исследование методов контроля средних показателей безотказности вычислительной техники", *Мат. машины и системы*, № 3, с. 180-185, 2005.
- [6] В. П. Стрельников, и К. А. Антипенко, "О методических погрешностях прогнозирования ресурса высоконадежных изделий электронной техники", *Мат. машины и системы*, № 3, с. 164-167, 2004.
- [7] В. П. Стрельников, и О. Б. Кравченко, "Планирование испытаний средств вычислительной техники на безотказность при DN-распределении наработки систем", *Мат. машины и системы*, № 1, с. 105-107, 1998.
- [8] В. П. Стрельников, "Оценка ресурса изделий электронной техники", *Мат. машины и системы*, № 2, с. 186-195, 2004.
- [9] В. П. Стрельников, "Прогнозирование надежности электронных систем при отсутствии отказов с использованием дополнительной априорной информации", *Мат. машины и системы*, № 3-4, с. 226-231, 2003.
- [10] В. Ф. Гришко, и С. В. Жульжик, "Оптимизация комплектования компьютерных систем по критериям надежности", *Информационные технологии и компьютерная техника: наук. праці ВНТУ*, № 2, с. 1-2, 2009.
- [11] ДСТУ 2992-95. *Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності*. Київ: Вид-во Держстандарту України, 1995.

- [12] ДСТУ 8647:2016. *Надійність техніки. Оцінювання і прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відомов.* Київ: Вид-во Держстандарту України, 2017.
- [13] D. Sourabh, and A. Raghuvanshi, "Fault tolerance techniques in distributed system computer", *IJEIR*, vol. 1, iss. 2, pp. 24-130, 2012. ISSN: 2277 – 5668.
- [14] D. J. Sorin, *Fault Tolerant Computer Architecture*. Morgan & Claypool, 2009.
- [15] T. D. Frank, *Nonlinear Fokker–Planck Equations: Fundamentals and Applications*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2005.
- [16] Jitendra Kumar, Vikas Shinde, and Mukta Kalra, "Availability and reliability analysis of computer systems", *Int. Journal of Control Theory and Applications*, vol. 10, pp. 267-275, 2017.
- [17] M. Abd-El-Barr, *Design and Analysis of Reliable and Fault-Tolerant Computer Systems*. London: Imperial College Press, 2007.
- [18] M. Rausand, and A. Hoyland, *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, 2-nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [19] M. Braunovic, V. V. Konchits, and N. K. Myshkin, *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*. New York: CRC Press, 2007.
- [20] Paul G. Slade, *Electrical Contacts: Principles and Applications*, 2-nd ed. CRC Press, 2013, Technology & Engineering.
- [21] M. L. Shooman, *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis and Design*. New York: John Wiley and Sons, 2002.
- [22] H. Wang, and Y. Wang, "Designing fault tolerance strategy by iterative redundancy for component-based distributed computing systems", *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, article ID 197423, 11 p.
- Matematychni mashyny i systemy*, no. 1, pp. 149-156, 2020 [in Russian].
- [2] A. V. Feduhin, and N. V. Sespedes-Garsiya, "On the issue of statistical modeling of reliability", *Matematychni mashyny i systemy*, no. 1, pp. 156–163, 2006 [in Russian].
- [3] V. Bogachev, N. Krylov, M. Rockner, and S. Shaposhnikov, *Fokker–Planck–Kolmogorov equations: Mathematical surveys and monographs*, vol. 207. USA: American Mathematical Society Providence, Rhode Island, 2015.
- [4] V. P. Strel'nikov, and A. V. Feduhin, *Assessment and Prediction of the Reliability of Electronic Components and Systems*. Kiev, Ukraine: Logos, 2002 [in Russian].
- [5] V. P. Strel'nikov, A. N. Voloshchuk, and N. G. Voronaya, "Study of methods for monitoring the average indicators of non-failure operation of computer equipment", *Matematychni mashyny i systemy*, no. 3, pp. 180-185, 2005 [in Russian].
- [6] V. P. Strel'nikov, and K. A. Antipenko, "On methodological errors in predicting the resource of highly reliable electronic products", *Matematychni mashyny i systemy*, no. 3, pp. 164-167, 2004 [in Russian].
- [7] V. P. Strel'nikov, and O. B. Kravchenko, "Planning of testing of computer facilities for fail-safety with DN-distribution of operating time of systems", *Matematychni mashyny i systemy*, no. 1, pp. 105-107, 1998 [in Russian].
- [8] V. P. Strel'nikov, "Assessment of the resource of electronic products", *Matematychni mashyny i systemy*, no 2, pp. 186-195, 2004 [in Russian].
- [9] V. P. Strel'nikov, "Forecasting the reliability of electronic systems in the absence of failures using additional a priori information", *Matematychni mashyny i systemy*, no. 3-4, pp. 226-231, 2003 [in Russian].
- [10] V. F. Grishko, and S. V. Zhul'zhik, "Optimization of acquisition of computer systems according to reliability criteria", *Informatsiini tekhnologii i kompiuterna tekhnika: sci. papers of VNTU*, no. 2, pp. 1-2, 2009 [in Russian].

References

- [1] A. V. Feduhin, " On the issue of predicting the residual life of electronic products",

- [11] DSTU 2992-95. *Products of electronic equipment. Reliability calculation methods*. Kyiv: Vyd-vo Derzhstandartu Ukrainy, 1995 [in Ukrainian].
- [12] DSTU 8647:2016. *Reliability of equipment. Evaluation and prediction of reliability based on the results of tests and/or operation in conditions of a small number of failures*. Kyiv: Vyd-vo Derzhstandartu Ukrainy, 2017 [in Ukrainian].
- [13] D. Sourabh, and A. Raghuvanshi, "Fault tolerance techniques in distributed system computer", *IJEIR*, vol. 1, iss. 2, pp. 24-130, 2012. ISSN: 2277 – 5668.
- [14] D. J. Sorin, *Fault Tolerant Computer Architecture*. Morgan & Claypool, 2009.
- [15] T. D. Frank, *Nonlinear Fokker–Planck Equations: Fundamentals and Applications*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2005.
- [16] Jitendra Kumar, Vikas Shinde, and Mukta Kalra, "Availability and reliability analysis of computer systems", *Int. Journal of Control Theory and Applications*, vol. 10, pp. 267-275, 2017.
- [17] M. Abd-El-Barr, *Design and Analysis of Reliable and Fault-Tolerant Computer Systems*. London: Imperial College Press, 2007.
- [18] M. Rausand, and A. Hoyland, *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, 2-nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [19] M. Braunovic, V. V. Konchits, and N. K. Myshkin, *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*. New York: CRC Press, 2007.
- [20] Paul G. Slade, *Electrical Contacts: Principles and Applications*, 2-nd ed. CRC Press, 2013, Technology & Engineering.
- [21] M. L. Shooman, *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis and Design*. New York: John Wiley and Sons, 2002.
- [22] H. Wang, and Y. Wang, "Designing fault tolerance strategy by iterative redundancy for component-based distributed computing systems", *Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, article ID 197423, 11 p.

O. O. Sytnyk¹, Dr. Tech. Sc., Professor,

V. B. Kyselov¹, Ph. D., Associate Professor,

H. O. Kyselova¹, Senior Lecturer,

e-mail: annakys.777@gmail.com

V. I. Kostiuchenko², Ph. D., Associate Professor

e-mail: vitalii.kostiuchenko@nuos.edu.ua

¹Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Heroes of Ukraine ave., 9, Mykolaiv, 54025, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF COMPUTER EQUIPMENT RELIABILITY

The article is devoted to the construction of a mathematical model of reliability of computer equipment devices. The mathematical model is constructed by using the probability diffusion equation, which corresponds to a stochastic process and is a two-parameter function, whose parameter estimates have fairly simple analytical expressions that meet the requirements of international practice. Computer technology is widely used as various devices (personal computers, computers, laptops, mainframes, clusters, servers, workstations). Their main purpose is to provide the user with stable access to information stored on their media and the possibility of continuous processing of this information, which makes it necessary to constantly maintain such systems in a working state. Thus, computer equipment refers to systems that require a high degree (level) of reliability. Given that the level

of reliability of any equipment during its operation is constantly decreasing, which is due to the processes of aging and wear, the determination and prediction of reliability is an urgent scientific and technical task. One of the most common methods for determining and predicting the state of an object at any given time are probabilistic-physical methods, which are based on the use of probabilistic models for processing statistical information obtained during operation, or testing real physical objects. Regardless of the type of computer equipment, it includes electronic, electrical and electromechanical elements that preserve their functional properties for the entire period of use. According to modern views on the operation of electronic, electrical and electromechanical elements, a complex factor that characterizes the technical condition of the element is the qualitative passage of an electrical signal through contact connections, which is determined by the value of the contact resistance. The obtained mathematical model of the distribution density is a two-parameter function, the parameters of which have a physical interpretation in the form of the rate of change of contact resistance and the root mean square deviation of the velocity.

Keywords: *probabilistic-physical method, two-parameter function, defining parameter, contact resistance, Fokker-Planck-Kolmogorov equation.*

[0000-0002-8557-3443] **Г. М. Дресва¹**, аспірантка,
e-mail: gannadreeva@gmail.com

[0000-0001-6951-2002] **О. М. Дресв¹**, канд. техн. наук, доцент,

[0000-0001-8791-0063] **Є. В. Мелешко¹**, д-р техн. наук, професор,

[0000-0003-2007-9943] **І. В. Миронець²**, канд. техн. наук, доцент

¹Центральноукраїнський національний технічний університет
просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна

²Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ПРОГРАМНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ З СИМУЛЯЦІЄЮ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ЛАНЦЮГА МАРКОВА

У роботі представлено розроблену програмну імітаційну модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова для тестування алгоритмів маршрутизації. Для генерації структури комп'ютерної мережі розроблено метод на основі теорії складних мереж. Для симуляції мережевого трафіку розроблено метод генерації мультифрактальної бінарної послідовності з використанням ланцюга Маркова.

Комп'ютерна мережа у розробленій моделі представлена повнозв'язним неорієнтованим зв'язаним графом, в якому вузлами є маршрутизатори, а ребрами – мережеві зв'язки між ними. Вага ребер – величина, обернена до пропускної спроможності каналу зв'язку. Вузли містять черги, в яких розміщуються прийняті пакети перед визначенням маршруту їх відправлення та відправкою на наступний вузол. Час у моделі представлений дискретними ітераціями. Маршрутизація здійснюється на основі тих алгоритмів, які необхідно протестувати на моделі.

Для симуляції мережевого трафіку у розробленій програмній імітаційній моделі запропоновано метод генерації бінарної мультифрактальної послідовності на основі ланцюгів Маркова зі стохастичним автоматом, який дозволив керувати фрактальною розмірністю бінарного ряду на різних масштабах.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, програмна імітаційна модель, мережевий трафік, фрактальна розмірність, показник Херста, мультифрактальність.

Вступ. У цій роботі створено програмну імітаційну модель комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж, фрактального аналізу та марківських процесів. Ця програмна імітаційна модель дозволяє генерувати структуру комп'ютерної мережі та симулювати рух трафіку між мережевими пристроями з метою тестування алгоритмів маршрутизації.

У розробленій програмній імітаційній моделі використання алгоритмів з теорії складних мереж дозволило генерувати структуру комп'ютерних мереж різного розміру, які відповідають реальним мережам за своїми властивостями. Складні мережі – це стохастичні мережі з нетривіальною топологією, що відрізняються від класичних стохастичних мереж наявністю невеликої кількості вузлів з великою кількістю зв'язків [1, 2]. Більшість реальних мереж є складними, наприклад, комп'ютерні,

транспортні, екологічні, соціальні мережі тощо. У складних мереж є такі основні властивості [1-4]: безмасштабність, невеликий діаметр мережі, високий коефіцієнт кластеризації та високий коефіцієнт транзитивності, гігантська зв'язна компонента, наявні ієрархічні зв'язки та складні кластерні утворення (кліки, клани тощо), асортативність (виникнення зв'язків між вершинами зі схожими властивостями). Для симуляції руху мережевого трафіку по згенерованих мережах було використано теорію фрактального аналізу та ланцюги Маркова. В результаті дослідження методів симуляції мережевого трафіку виділено такі відомі методи [5-7]: на основі пуассонівського процесу; на основі фрактального броунівського руху; на основі фрактального гаусівського шуму з використанням дискретного вейвлет-перетворення, на основі фрактального руху

Леві, авторегресійні моделі, нейромережеві моделі. Використання ж ланцюгів Маркова дозволяє створювати вкрай прості, порівняно з попередніми перерахованими методами, моделі генерування дискретного трафіку з широким діапазоном властивостей.

Мета та задачі дослідження. Метою цієї роботи є розробка та дослідження програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі з мультифрактальним трафіком для тестування алгоритмів маршрутизації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити метод генерації трафіку з мультифрактальними властивостями;

- розробити метод програмного моделювання комп'ютерної мережі для дослідження методів генерації і маршрутизації трафіку;

- провести експериментальне дослідження запропонованого методу генерації трафіку на програмній імітаційній моделі.

У попередніх роботах авторами було запропоновано та досліджено генератор фракталоподібного бінарного трафіку на основі ланцюгів Маркова [8-9] та метод генерації структури комп'ютерної мережі [10]. У цій

роботі пропонується вдосконалена версія генератора трафіку для програмної моделі, яка дозволяє надати йому мультифрактальних властивостей, що точніше відповідає властивостям реального трафіку у комп'ютерних мережах.

Виклад основного матеріалу.

Комп'ютерна мережа у розробленій моделі представлена повнозв'язним неорієнтованим зваженим графом, в якому вузлами є маршрутизатори, а ребрами – мережеві зв'язки між ними. Вага ребер – величина, обернена до пропускної спроможності каналу зв'язку. Вузли містять черги, де розміщуються прийняті пакети перед визначенням маршруту їх відправлення та обробкою. Час у моделі представлений дискретними ітераціями. Маршрутизація здійснюється на основі алгоритму, який і необхідно протестувати на моделі. Симулюється поширення мультифрактального трафіку.

Етапи роботи розробленої програмної імітаційної моделі:

Етап 1. Генерація структури комп'ютерної мережі на основі моделі Барабаши-Альберт, призначеної для генерації складних мереж [11]. Приклади згенерованих мереж наведено на рисунку 1.

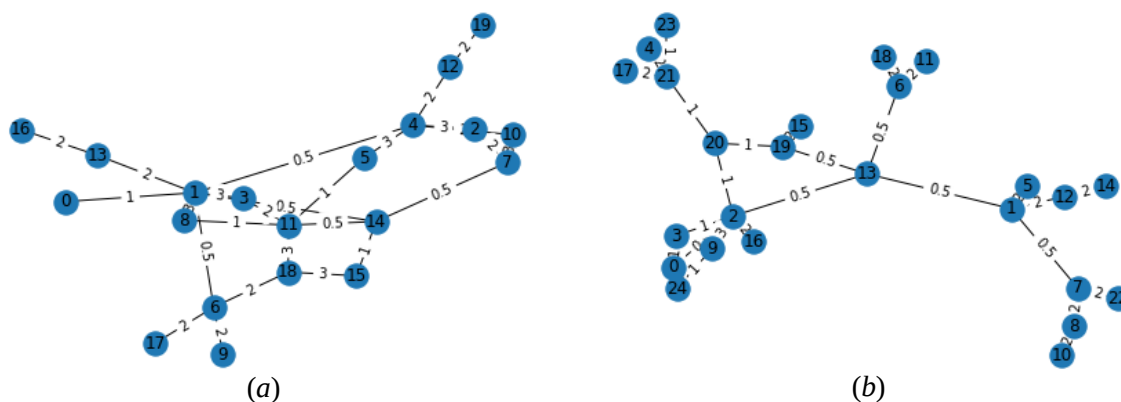


Рисунок 1. Приклади структур комп'ютерних мереж, згенеровані у розробленій програмній імітаційній моделі

Етап 2. Перевірка, чи отриманий граф мережі є повнозв'язним. Якщо згенерований граф не повнозв'язний – додавання ребер між відокремленими частинами графу.

Етап 3. Присвоєння ребрам ваги, що залежить від того, які вершини вони з'єднують – чим більше зв'язків у вузлів, які з'єднує ребро, тим менша вага цього ребра (і відповідно тим більша пропускна спроможність відповідного каналу зв'язку).

Етап 4. Генерація пакетів трафіку. На кожний вузол з деякою ймовірністю відправляється випадкова кількість пакетів з випадковими адресатами. Пристрій, що отримав пакети, ставить їх у свою внутрішню чергу. Трафік генерується з мультифрактальними властивостями.

Етап 5. Тестування алгоритмів маршрутизації. Обирається алгоритм маршрутизації для тестування. Пакети трафіку, що стоять у чергах у вузлах мережі, обслуговуються за до-

помогою обраного алгоритму маршрутизації. Моделюється рух пакетів по мережі. Якщо деякому пакету не вистачило місця у черзі деякого вузла, пакет втрачається. У моделі підраховуються всі отримані та втрачені пакети.

Етап 6. Завершення роботи моделі. Відбувається після досягнення заданої кількості ітерацій (наприклад, 1000 ітерацій) або, якщо модель працює у спрощеному режимі роботи (з однократною генерацією трафіку), то умовою зупинки також може бути стан, коли всі черги порожні і всі пакети розіслано. Для симуляції мережевого трафіку у розробленій програмній імітаційній моделі запропоновано метод генерації бінарної фракталоподібної послідовності. У попередніх роботах [8-9] авторами було запропоновано та досліджено генератор фракталоподібного бінарного трафіку на основі ланцюгів Маркова. У цій роботі пропонується вдосконалена версія генератора трафіку, яка дозволяє надати йому мультифрактальних властивостей, що точніше відповідає властивостям реального трафіку у комп'ютерних мережах.

У цій роботі додано механізм до генератора бінарного трафіку на основі стохастичного автомата G , який дозволив керувати фрактальною розмірністю бінарного ряду на різних масштабах. Це значно розширить коло застосовності генератора.

В результаті попереднього дослідження було використано генератор трафіку G (рисунок 2), який містить два стани «1», «0» та ймовірності залишити стан незмінним $p(\langle 0 \rangle \rightarrow \langle 0 \rangle) = p_0$ та $p(\langle 1 \rangle \rightarrow \langle 1 \rangle) = p_1$. Генератор видає значення поточного стану дискретно по події відсутності або здійсненню зміни стану.

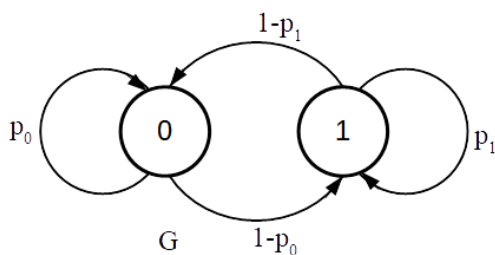


Рисунок 2. Генератор фракталоподібної бінарної послідовності

Для такого генератора інтенсивність трафіку можна визначити за формулою [8]

$$\lambda = \frac{1-p_0}{2-(p_0+p_1)}. \quad (1)$$

Зазначимо, що при $p_0=p_1$ генерування трафіку проходить з інтенсивністю 0.5, але при зміні ймовірностей залишити наступне значення без змін змінюється його фрактальна розмірність.

Також у статті [8] авторами проведено теоретичне оцінювання фрактальної розмірності утворюваного бінарного трафіку, який залежить не лише від ймовірностей параметрів генерування, але й від розміру піддіапазону, тобто масштабування у часі. Для абстрагування від розміру піддіапазону було знайдено межу, коли довжина піддіапазону прямувала до одиниці.

В більшості випадків обрання методу генерування трафіку має ґрунтуватися на властивостях трафіку, отриманого експериментально з комп'ютерної мережі, де буде впроваджено алгоритми маршрутизації трафіком.

Загалом трафік у реальних комп'ютерних мережах має мультифрактальні властивості, зокрема, про це свідчать дослідження [12, 13].

Мультифрактальність часового ряду та методи керування мультифрактальними особливостями. Як показано в [14] (рисунок 3), зміна фрактальної розмірності з масштабуванням у часі реальних даних трафіку є актуальною досить тривалий час, про це свідчить наявність публікацій на тему розробки ефективного мультифрактального генератора трафіку [12, 13]. При цьому на реальних даних фрактальна розмірність може як зростати, так і спадати зі збільшенням часового масштабу.

Для перевірки фрактальних властивостей розробленого в [8] генератора трафіку було проведено оцінювання показника Херста під час імітаційного експерименту. Імітаційний експеримент полягав у проведенні R/S аналізу на генерованій бінарній послідовності. Одну з реалізацій методу R/S аналізу описано в [15], і через його низьку точність вимірювання проводиться 200 разів на різних реалізаціях послідовності.

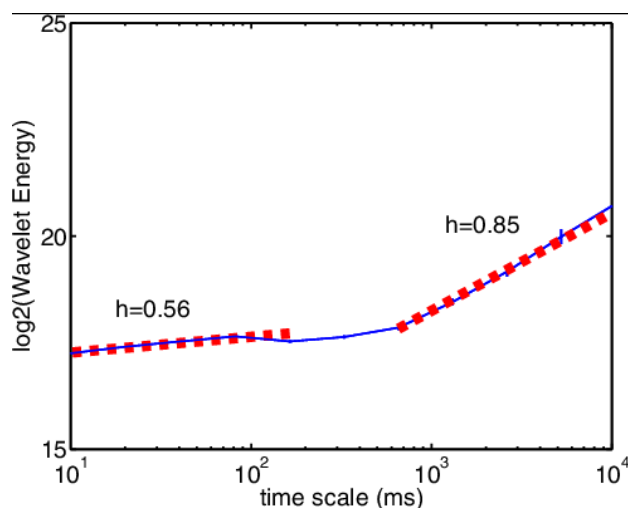
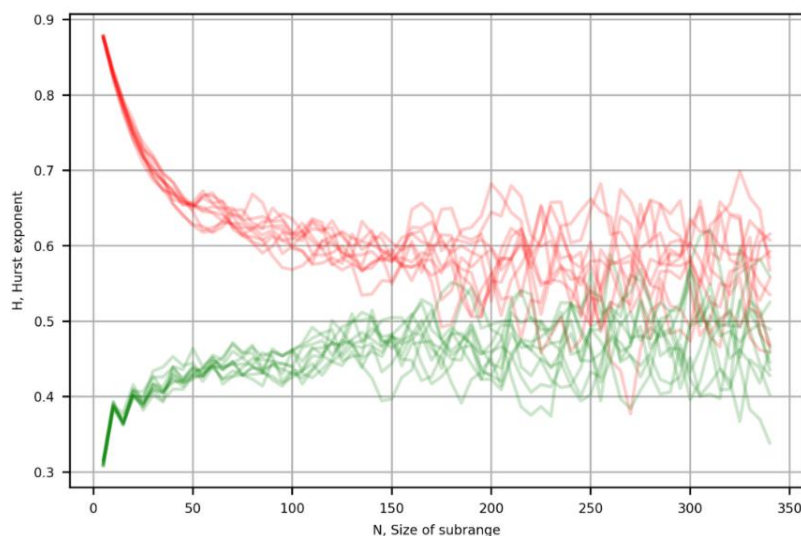


Рисунок 3. Зміна показника Херста від масштабу в часі [12]

З метою розкриття залежності показника Херста від довжини часткових (кумулятивних) сум при R/S аналізованні побудовано графік залежності показника Херста від довжини цих сум (рисунок 4). Графік на рисунку 4 містить два пучки кривих, де кожна крива відповідає одному експериментальному

визначенню показника Херста з вказаним масштабуванням. Верхній пучок кривих відповідає експерименту вимірювання показника Херста при параметрах генератора G $p_0=p_1=0.9$, а нижній пучок кривих побудовано при $p_0=p_1=0.1$. Є очевидним збігання пучків до $H=0.5$.

Рисунок 4. Залежність показника Херста від довжини інтервалу N при R/S аналізі

Практичні реалізації мультифрактального трафіку комп'ютерної мережі можуть різнитися на різних масштабах, тому за мету цієї роботи поставлено додавання механізму до генератора бінарного трафіку на основі стохастичного автомата G , який дозволив би керувати фрактальною розмірністю бінарного ряду на різних масштабах. Це значно розширить відпо-

відність генерованих даних до реального трафіку мережі та коло застосовності генератора.

З метою регулювання фрактальної розмірності генерованого трафіку автори пропонують на базі генератора G використовувати наступну каскадну модель генератора бінарного трафіку (рисунок 5):

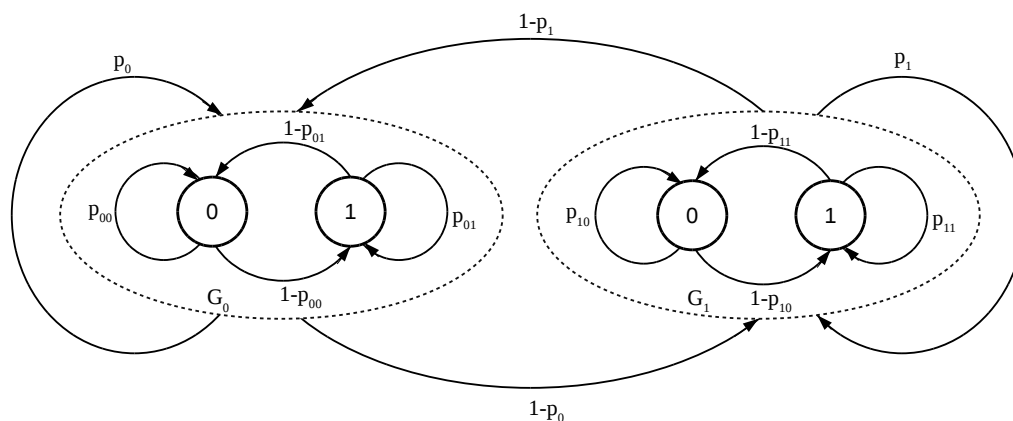


Рисунок 5. Генератор мультифрактальної бінарної послідовності

Запропонований генератор є каскадним, містить зовнішній генератор G , який агрегує в собі генератори G_0 та G_1 . Завдяки цьому властивості генератора задаються такими величинами: p_{00}, p_{01} – ймовірності залишити наступне значення незмінним для генератора G_0 ; p_{10}, p_{11} – ймовірності залишити наступне значення незмінним для генератора G_1 ; p_0, p_1 – ймовірності залишити наступну серію з d значень для того самого генератора G_i , що i в попередній серії.

Відповідно до утворення кумулятивних сум генератори G_0 та G_1 повинні розрізнятися в досить тривалому часовому проміжку,

що при однаковій інтенсивності генерованого трафіку за граничною теоремою не є можливим. Тому генератори налаштовують на генерування послідовностей з однаковою фрактальною розмірністю, але з різною інтенсивністю трафіку. За балансування загальної інтенсивності трафіку на великому масштабі відповідає зовнішній генератор G , який у наведеному прикладі є симетричним і завдяки цьому усереднює потоки з генераторів G_0 та G_1 .

З метою візуально оцінити утворені ряди на рисунку 6 показано бінарний ряд, який агреговано по 25 відліків.

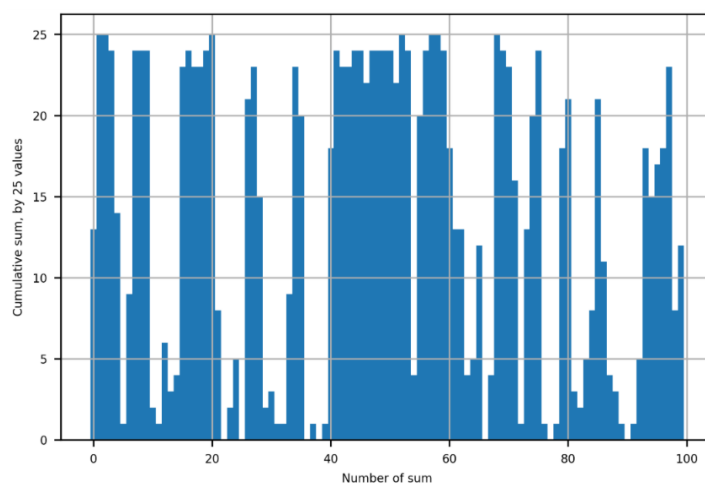


Рисунок 6. Приклад генерованого каскадним генератором трафіку, який має персистентність на більш широкому часовому масштабі

Результат є характерним для пульсуючого трафіку високої інтенсивності $\tau=0.5$. Цей ряд отримано з такими параметрами генерування:

$$d=10; p_0=0.9; p_1=0.9; p_{00}=0.95; p_{01}=0.15; p_{10}=0.15; p_{11}=0.95. \quad (2)$$

Наступна діаграма побудована аналогічно, але при таких параметрах:

$$d=10; p_0=0.05; p_1=0.05; p_{00}=0.95; p_{01}=0.15; p_{10}=0.15; p_{11}=0.95. \quad (3)$$

Потрібно наголосити, що зміни відбулися лише для модулятора трафіку G (рисунок 7).

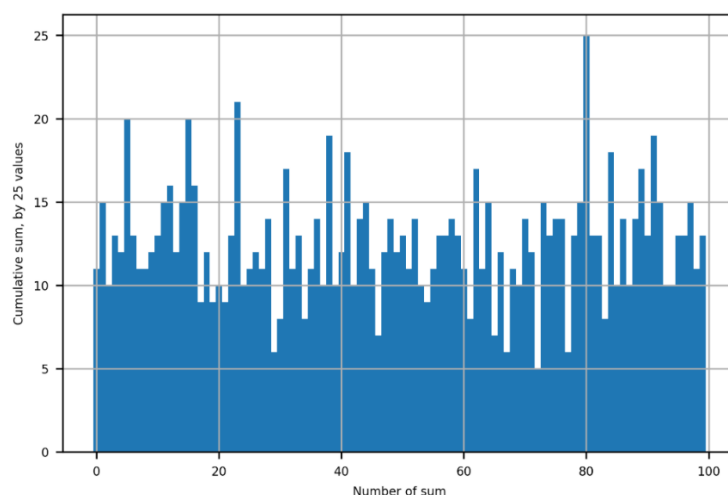


Рисунок 7. Приклад генерованого каскадним генератором трафіку, який є персистентним та антиперсистентним на різному часовому масштабі

Крива залежності показника Херста $H(p)$ від ймовірності зміни наступного значення p показана на графіку рисунка 8. Графік містить три пучки кривих, які відповідають налаштуванням генератора (2), (3), які були вже наведені, і (4):

$$d=10; p_0=0.00; p_1=1.00; p_{00}=0.90; p_{01}=0.90; p_{10}=0.90; p_{11}=0.90. \quad (4)$$

Це означає, що модулятор переключається на роботу лише генератора G_1 з параметрами $p_{10}=0.90$; $p_{11}=0.90$ і це відповідає роботі генератора G без корегування фрактальної розмірності на більших часових ділянках. На рисунку 8 це показано зеленим, середнім пучком кривих.

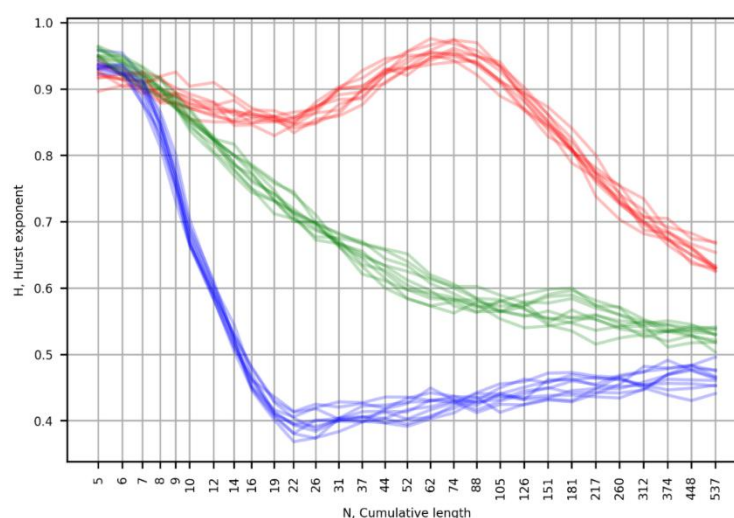


Рисунок 8. Приклади залежності показника Херста від масштабу в часі для реалізацій каскадним генератором (верхній та нижній пучок кривих) та стандартним генератором (середній пучок кривих)

Результати досліджень. У роботі розроблено програмну імітаційну модель комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова для тестування алгоритмів маршрутизації. Для генерації структури комп'ютерної мережі розроблено метод на основі теорії складних мереж. Для симуляції мережевого трафіку

розроблено метод генерації мультифрактальної бінарної послідовності з використанням ланцюга Маркова. Експериментально підтверджено відповідність практичних результатів до теоретичних, хоча при виведенні аналітичних залежностей було використано нестандартну метрику вираження міри покриття.

Обговорення результатів. В результаті числового експерименту встановлено факт можливості регулювання показника Херста на заданому часовому масштабуванні. Отримані часові ряди за допомогою каскадного генератора бінарної послідовності мають мультифрактальні властивості. Тобто каскадний генератор має більше можливостей щодо підгонки до реальних прикладів бінарного трафіку. Використання каскадного генератора є можливим лише при можливості його легкого налаштування, що фактично означає можливість отримати коефіцієнти $d, p_0, p_1, p_{00}, p_{01}, p_{10}, p_{11}$ з прикладу реального трафіку.

Висновки. У цій статті в межах створення програмної імітаційної моделі комп'ютерної мережі з симуляцією мультифрактального трафіку на основі ланцюга Маркова вирішено такі задачі:

- розроблено метод генерації трафіку з мультифрактальними властивостями у вигляді бінарного часового ряду на рівні «пакет є» – «пакета немає»;

- розроблено метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в такому:

1. Удосконалено метод генерації мережевого трафіку на основі ланцюга Маркова, який відрізняється від відомих тим, що використовує каскадну модель генератора бінарної числової послідовності на рівні «пакет є» – «пакета немає» і дозволяє генерувати трафік з мультифрактальними властивостями з можливістю їх регулювання.

2. Розроблено метод програмного імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на основі теорії складних мереж та удосконаленого методу генерації мережевого мультифрактального трафіку, що дозволяє тестувати алгоритми та протоколи маршрутизації.

Практичне значення. Розроблено алгоритми генерації структури комп'ютерної мережі й алгоритми генерації мультифрактального мережевого трафіку, що дають можливість здійснювати програмне імітаційне моделювання комп'ютерних мереж і тестувати алгоритми та протоколи маршрутизації.

Перспективи подальших досліджень. Запропонований каскадний генератор вимагає подальшого теоретичного дослідження для аналітичного вираження коефіцієнтів $d, p_0, p_1, p_{00}, p_{01}, p_{10}, p_{11}$ через бажані фрактальні харак-

теристики та інтенсивність потоку. Тому у подальших наукових дослідженнях планується дослідити це питання.

Список використаних джерел

- [1] A.-L. Barabási, *Network Science*. Cambridge University Press, 2018. [Online]. Available: <http://networksciencebook.com/>
- [2] В. В. Пасічник, та Н. М. Іванущак, "Дослідження та моделювання складних мереж", *Східно-Європейський журнал передових технологій*, вип. 2, № 3 (44), с. 43-48, 2010.
- [3] V. A. Traag, *Algorithms and Dynamical Models for Communities and Reputation in Social Networks*. Springer International Publishing, 2014, p. 229. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06391-1>
- [4] D. J. Watts, and S. H. Strogatz, "Collective dynamics of "small-world" networks", *Nature*, vol. 393 (6684), pp. 440-442, 1998. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/30918>
- [5] S. Robert, and J. Y. Le Boudec, "New models for pseudo self-similar traffic", *Performance Evaluation*, vol. 30 (1-2). pp. 57-68, 1997.
- [6] G. Horn, A. Kvalbein, J. Blomskøld, and E. Nilsen, "An empirical comparison of generators for self-similar simulated traffic", *Performance Evaluation*, vol. 64 (2), pp. 162-190, 2007.
- [7] T. Sobh, K. Elleithy, and A. Mahmood, Eds., *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking*. Springer, 2010, pp. 41-46.
- [8] H. M. Drieieva, O. A. Smirnov, O. M. Drieiev, and T. V. Smirnova, "A fractal analysis of a Markov chain based self-similar traffic generator", *Central Ukrainian Scientific Bulletin, Engineering sciences*, vol. 2 (33), pp. 161-172, 2019.
- [9] H. Drieieva, O. Drieiev, Ye. Meleshko, M. Yakymenko, and V. Mikhav, "A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method", *CEUR-WS*, vol. 3171, pp. 1694-1707, Gliwice, Poland, 2022. [Online]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>

- [10] Є. Мелешко, Г. Дресва, та В. Міхав, "Програмна імітаційна модель комп'ютерної мережі для тестування алгоритмів маршрутизації трафіку", на міжнар. наук.-техн. конф. "Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (AKIT-2022)". Кропивницький: Ексклюзив-Систем, 2022, с. 26-27.
- [11] A.-L. Barabási, and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks", *Science*, vol. 286, no. 5439, pp. 509-512, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- [12] G. Millán, and G. Lefranc, "A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks", *Information Technology and Quantitative Management (ITQM2013). Procedia Computer Science*, 17, pp. 420-425, 2013.
- [13] E. Areström, and N. Carlsson, "Early online classification of encrypted traffic streams using multi-fractal features", in *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2019, pp. 84-89. doi: 10.1109/INFOCOMW.2019.8845127.
- [14] V. J. Ribeiro, Z.-L. Zhang, S. Moon, and C. Diot, "Small-time scaling behavior of Internet backbone traffic", *Computer Networks*, vol. 48, pp. 315-334, 2005. doi: 10.1016/j.comnet.2004.11.012
- [15] "Hurst exponent evaluation and R/S-analysis in Python", *GitHub - Mottl/hurst*. [Online]. Available: <https://github.com/Mottl/hurst>
- [4] D. J. Watts, and S. H. Strogatz, "Collective dynamics of "small-world" networks", *Nature*, vol. 393 (6684), pp. 440-442, 1998. [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/30918>
- [5] S. Robert, and J. Y. Le Boudec, "New models for pseudo self-similar traffic", *Performance Evaluation*, vol. 30 (1-2). pp. 57-68, 1997.
- [6] G. Horn, A. Kvalbein, J. Blomsköld, and E. Nilsen, "An empirical comparison of generators for self-similar simulated traffic", *Performance Evaluation*, vol. 64 (2), pp. 162-190, 2007.
- [7] T. Sobh, K. Elleithy, and A. Mahmood, Eds., *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking*. Springer, 2010, pp. 41-46.
- [8] H. M. Drieieva, O. A. Smirnov, O. M. Drieiev, and T. V. Smirnova, "A fractal analysis of a Markov chain based self-similar traffic generator", *Central Ukrainian Scientific Bulletin, Engineering sciences*, vol. 2 (33), pp. 161-172, 2019.
- [9] H. Drieieva, O. Drieiev, Ye. Meleshko, M. Yakymenko, and V. Mikhav, "A method of determining the fractal dimension of network traffic by its probabilistic properties and experimental research of the quality of this method", *CEUR-WS*, vol. 3171, pp. 1694-1707, Gliwice, Poland, 2022. [Online]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-3171/paper120.pdf>
- [10] Ye. Meleshko, H. Drieieva, та V. Mikhav, "Software simulation model of a computer network for testing traffic routing algorithms", in *Int. Sci. and Tech. Conf. Automation, Computer-Integrated Technologies and Problems of Energy Efficiency in Industry and Agriculture (AKIT-2022)*. Kropyvnytskyi: Eksklyuzyv-System, 2022, pp. 26-27 [in Ukrainian].

References

- [1] A.-L. Barabási, *Network Science*. Cambridge University Press, 2018. [Online]. Available: <http://networksciencebook.com/>
- [2] V. V. Pasichnyk, and N. M. Ivanushchak, "Research and modeling of complex networks", *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, iss. 2, no. 3 (44), pp. 43-48, 2010 [in Ukrainian].
- [3] V. A. Traag, *Algorithms and Dynamical Models for Communities and Reputation in Social Networks*. Springer International Publishing, 2014, p. 229. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06391-1>
- [11] A.-L. Barabási, and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks", *Science*, vol. 286, no. 5439, pp. 509-512, 1999. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- [12] G. Millán, and G. Lefranc, "A fast multifractal model for self-similar traffic flows in high-speed computer networks", *Information Technology and Quantitative Management (ITQM2013). Procedia Computer Science*, 17, pp. 420-425, 2013.

- [13] E. Areström, and N. Carlsson, "Early online classification of encrypted traffic streams using multi-fractal features", in *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2019, pp. 84-89.
doi: 10.1109/INFOCOMW.2019.8845127.
- [14] V. J. Ribeiro, Z.-L. Zhang, S. Moon, and C. Diot, "Small-time scaling behavior of Internet backbone traffic", *Computer Networks*, vol. 48, pp. 315-334, 2005.
doi: 10.1016/j.comnet.2004.11.012
- [15] "Hurst exponent evaluation and R/S-analysis in Python", *GitHub - Mottl/hurst*. [Online]. Available: <https://github.com/Mottl/hurst>

H. M. Drieieva¹, *Postgraduate Student*,
e-mail: gannadreeva@gmail.com

O. M. Drieiev¹, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*,

Ye. V. Meleshko¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor*,

I. V. Myronets², *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*

¹Central Ukrainian National Technical University
Universitetskiy ave., 8, Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine

²Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

SOFTWARE SIMULATION MODEL OF COMPUTER NETWORK WITH MULTIFRACTAL TRAFFIC SIMULATION BASED ON MARKOV CHAIN

In the work, a software simulation model of a computer network with multifractal traffic simulation based on the Markov chain for testing routing algorithms is developed. A method based on the theory of complex networks has been developed to generate the structure of a computer network. To simulate network traffic, a method of generating a multifractal binary sequence using the Markov chain has been developed.

A computer network in a developed model is represented by a fully connected undirected weighted graph, in which nodes are routers, and edges are network connections between them. The weight of the edges is the inverse of the bandwidth of the communication channel. Nodes contain queues in which received packets are placed before determining the route of their dispatch and sending them to the next node. Time in the model is represented by discrete iterations. Routing is carried out on the basis of those algorithms, which must be tested on the model.

To simulate network traffic, in the developed software simulation model, a method of generating a binary multifractal sequence based on Markov chains with a stochastic automaton, which makes possible to control the fractal dimension of the binary series on different scales, is proposed. As a result of a numerical experiment, the fact of the possibility of adjusting the Hurst index on a given time scale has been established. It is shown that the obtained time series using the cascading generator of the binary sequence have multifractal properties. That is, the cascading generator has more possibilities for adaptation to real examples of binary traffic.

The scientific novelty of the conducted research is as follows: 1. The method of network traffic generation based on the Markov chain has been improved, which differs from the known ones in that it uses a cascade model of the generator of a binary numerical sequence at the "packet present" - "packet absent" level and allows to generate a traffic with multifractal properties with the possibility of their adjustment. 2. A method of software simulation modeling of a computer network based on the theory of complex networks and an improved method of generating network multifractal traffic, which allows to test routing algorithms and protocols, has been developed.

Keywords: computer networks, software simulation model, network traffic, fractal dimension, Hurst exponent, multifractality.

[0000-0001-9329-0577] **О. М. Хоменко¹**, канд. хім. наук, доцент,
e-mail: o.khomenko@chdtu.edu.ua

[0000-0001-8764-6952] **Л. М. Кравченко¹**,

[0000-0001-9055-1188] **Л. І. Жицька¹**, канд. біол. наук, доцент,

e-mail: zhytska_lyudmila@ukr.net

[0000-0002-6608-277X] **Ю. Г. Бондаренко²**, канд. мед. наук, доцент

e-mail: ck-oblses@ukr.net

¹Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

²Державна установа «Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб

Міністерства охорони здоров'я України»

вул. Волкова, 3, м. Черкаси, 18005, Україна

ЕКОЛОГО-ГІГІЄНІЧНА ОЦІНКА НАДХОДЖЕННЯ НІТРАТІВ В ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ З ПИТНОЮ ВОДОЮ

В роботі піднімається питання відповідності води з джерел централізованого та децентралізованого водопостачання в Україні і Черкаській області вимогам ДСанПіНу 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною», Закону України «Про питну воду та питне водопостачання», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя». Висвітлено результати дослідження вмісту нітратів у централізованих водогонах та приватних свердловинах і колодязях населених пунктів Черкаського району. Встановлено, що у воді централізованих джерел водопостачання середня концентрація нітратів становила 24 мг/дм³, що не перевищує гранично-допустимий норматив. Однак у 2,8 % досліджених проб води джерел централізованого водопостачання спостерігалось незначне перевищення нормативних значень, а у воді окремих джерел воно становило 110 мг/дм³ (м. Умань, м. Тальне та ін.). Визначена середня концентрація нітратів у воді децентралізованих джерел водопостачання становила 44 мг/дм³, що в межах гранично-допустимого рівня, але у 18 % досліджених проб має місце відхилення від допустимої добової дози (ДДД – 50 мг/дм³) в 1,5–4,0 рази, і в окремих джерелах контролю (шахтні та трубні колодязі), становить 235 мг/дм³ і навіть 900 мг/дм³, що надзвичайно небезпечно для здоров'я населення, особливо для немовлят, добова норма для яких становить 2,5 мг/кг/добу. Вивчено питання дії нітратних сполук на організм людини, які у високих дозах швидко окиснюють гемоглобін крові в метгемоглобін, викликаючи циркуляторну та тканинну гіпоксію, блокують ферментні системи клітин організму, що призводить до порушення окиснювального фосфорилування і нітратної метгемоглобінемії. Визначено можливі джерела надходження токсикантів у питну воду, розроблено рекомендації щодо її використання.

Ключові слова: питна вода, нітрати, децентралізовані джерела, водопостачання, еколого-гігієнічна оцінка, токсичний вплив.

Вступ. Нітрати (солі нітратної кислоти HNO₃) є поширеними в природі речовинами. В природних умовах нітрати утворюються в результаті екзогенних процесів та внаслідок розкладу органічних решток. Вони містяться в ґрунті, воді та входять до хімічного складу рослин, є продуктами обміну в організмах людини та тварин. Таке значне поширення нітратів у навколишньому середовищі неминує обумовлює постійний контакт населення з ними. Ще порівняно недавно населення знавало впливу нітратів лише у виняткових

випадках, зокрема при використанні води, що формується в геологічних структурах, які є багатими на селітру. Проте останнім часом помітно зростає навантаження нітратами на організм людини. Нітрати повністю надходять в організм людини перорально у складі питної води та продуктів харчування. Тому вивчення забрудненості води і харчових продуктів нітратами та чинниками, що впливають на ступінь цього забруднення, є досить актуальним.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Нітрати постійно надходять до організму лю-

дини і при незначних концентраціях не завдають шкоди стану здоров'я. Здебільшого вони потрапляють до організму людини з продуктами харчування та питною водою. Проте перевищення нітратних навантажень на організм людини може негативно вплинути на стан здоров'я.

З метою контролю вмісту нітратів у питній воді були встановлені їх гранично-допустимі концентрації (ГДК), що становлять не більше 50 мг/дм³ відповідно до вимог державних санітарних правил і норм. У країнах Європейського Союзу ця норма становить не більше 45 мг/дм³. Це те значення концентрації нітратів у питній воді, яке при постійному споживанні не призведе до негативних змін в організмі людини. Допустима добова доза нітратів для дорослої людини встановлена на рівні 5 мг/кг/добу, а для дітей раннього віку – відповідно 2,5 мг/кг/добу.

До основних джерел забруднення води нітратами відносять органічні речовини, кислотні дощі, стічні води та надмірне використання добрив [1, 2].

В результаті розкладу органічних речовин відбувається їх трансформація в мінеральні речовини, зокрема азотовмісні сполуки. Трансформація азотовмісних сполук у нітрати відбувається в процесі амоніфікації, внаслідок якої мінералізація органічних азотовмісних речовин призводить до утворення аміаку, який окиснюється до нітратів і нітритів (нітрифікація). Надалі утворені нітрати частково відновлюються завдяки денітрифікуючим бактеріям до вільного азоту, який виділяється в атмосферу, а решта нітратів залишається у ґрунті, звідки може надходити в ґрунтові води та вимиватися в поверхневі води.

Головним джерелом забруднення води нітратами в Україні залишається сільське господарство, зокрема недотримання технологій внесення добрив в орні землі, що призводить до їх накопичення [3, 4].

Особливістю сільської місцевості України є використання колодязів як джерела питної води, що поповнюються завдяки підземним водам. Ці підземні води можуть містити в своєму складі значну кількість нітратів, що надходять з полів. Ще одним джерелом надходження нітратного азоту до колодязів є тваринницькі господарства, відходи яких, зокрема гній і послід, становлять підвищену екологічну небезпеку для прилягаючих територій.

Слід відзначити, що майже на половині території України рівень нітратів у воді колодязів є підвищеним, а в деяких районах Прикарпаття спостерігаються перевищення концентрації нітратів у колодязній воді від 55 мг/дм³ до 100 мг/дм³. Ці показники в Черкаській області досягають від 180 мг/дм³ до 5600 мг/дм³. Такий підвищений рівень вмісту нітратів у воді є токсичним не лише для дітей, а й для дорослої людини [5, 6].

На рисунку 1 наведено карту наявності нітратів у колодязній воді на території України.

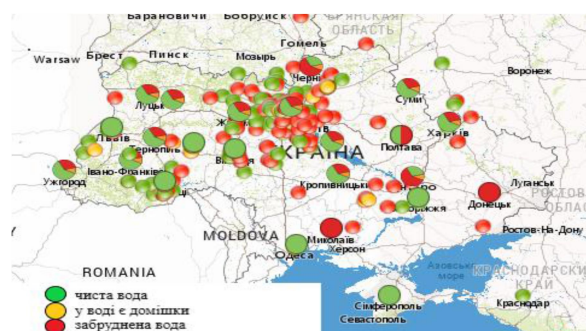


Рисунок 1. Наявність нітратів у колодязній воді на території України [16]

Перевищення ГДК по нітратах також характерно для водопровідної води, що насамперед обумовлено скидом забруднених стічних вод через недосконалість та застарілість очисних споруд і технологій очищення.

Як видно з рисунка 2, перевищення вмісту нітратів у водопровідній воді спостерігаються в Київській, Харківській, Кіровоградській, Херсонській, Черкаській, Чернігівській, Хмельницькій і Чернівецькій областях.

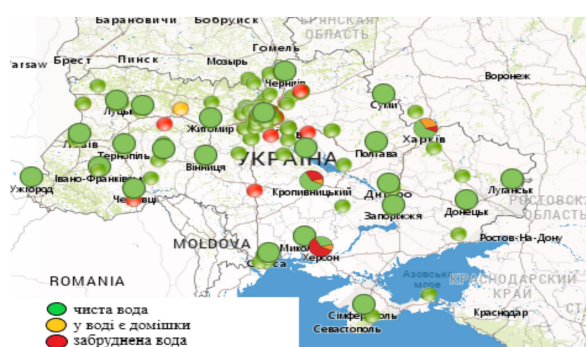


Рисунок 2. Наявність нітратів у водопровідній воді на території України [16]

Значну наявність нітратів встановлено в артезіанських свердловинах, більше половини яких характеризуються перевищенням допустимої концентрації нітратів. Причому найбільший відсоток вмісту нітратів у воді

свердловин спостерігається в Київській області (рисунок 3).

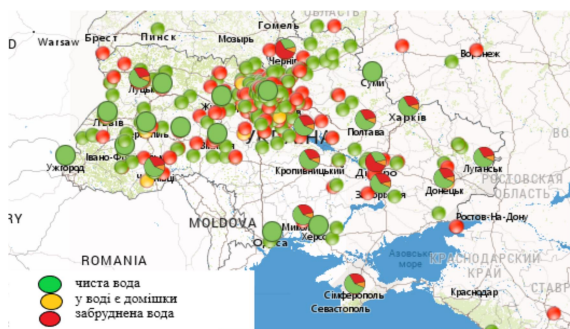


Рисунок 3. Наявність нітратів в артезіанських свердловинах на території України [16]

З аналізу рисунків 1–3 можна зробити висновок, що в Черкаській області найбільше нітратів надходить в організм людини з колодязною водою.

Аналіз джерел постачання питної води показав, що основні джерела водопостачання в області – це Кременчуцьке водосховище, річки Гнилий Тікич, Рось, Тясмин та підземні водозабори. У 2021 р. згідно з даними звітності за формою 2-ТП (водгосп) загальний водозабір становив 155,7 млн. м³, що на 7,8 % менше, ніж у 2020 р. [6–7]. Динаміку забору свіжої води зображено на рисунку 4.

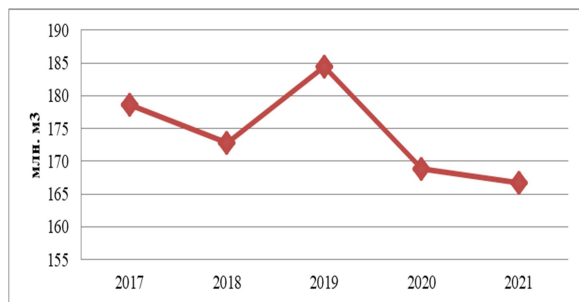


Рисунок 4. Забір свіжої води, млн. м³

Такі зміни обсягів забору води в 2021 р. можна пояснити зменшенням водозабору з поверхневих джерел, а саме на 14,1 млн. м³, порівнюючи з 2020 р. Слід відзначити, що в 2021 р. збільшився водозабір саме з підземних джерел на 1,0 млн. м³ проти 2020 р. Загальне використання води у 2021 р. становило 115,4 млн. м³, зокрема на виробничі потреби – 63 %, питні та санітарно-гігієнічні потреби – 21 % та на потреби зрошення – 16 % (рисунок 5).

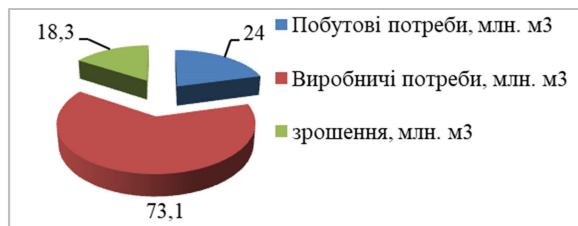


Рисунок 5. Структура використання водних ресурсів Черкаської області, млн. м³

Джерелом водопостачання міста Черкаси є річка Дніпро. Для того щоб річкову воду перетворити на питну з відповідністю її чинним нормативам, необхідно виконати повний технологічний цикл очищення з використанням таких реагентів, як коагулянти, флокулянти, хлор та аміак (рисунок 6).

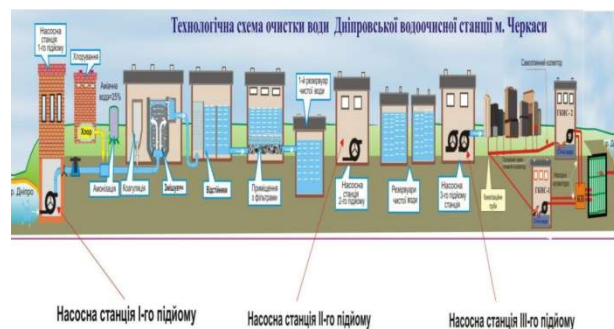


Рисунок 6. Технологічна схема очищення води Дніпровської водоочисної станції м. Черкаси [17]

КП «Черкасиводоканал» постійно забезпечує жителів міста питною водою, якість якої відповідає всім вимогам ДСанПіНу 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [8, 9] як за хімічними, так і за бактеріологічними показниками.

Відповідно до вимог ДСанПіНу 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною», Закону України «Про питну воду та питне водопостачання», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя» відповідальність за якість води і стан джерел централізованого та децентралізованого водопостачання в населених пунктах покладено на органи місцевого самоврядування та на власників колодязів [10, 11].

Слід зазначити, що в регіонах України, де внаслідок російської агресії пошкоджено централізовані джерела водопостачання, люди

змушені використовувати децентралізовані джерела водопостачання, зокрема криниці, вода в яких може бути забруднена нітратами з перевищенням нормативів. Ситуація ускладнюється тим, що на цих територіях не існує альтернативного джерела водопостачання і немає можливості визначення концентрації нітратів.

Для часткового вирішення цієї проблеми Міністерством охорони здоров'я України введено в дію наказ від 22 квітня 2022 р. № 683 «Про затвердження Державних санітарних норм і правил «Показники безпечності та окремі показники якості питної води в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій іншого характеру» [12].

Мета та задачі дослідження. Метою роботи було, використовуючи статистичні, бібліографічні, спостережні, лабораторно-інструментальні й аналітичні методи досліджень, вивчити питання стану якості води джерел централізованого та децентралізованого водопостачання в Україні і Черкаській області щодо її відповідності нормативам на вміст нітратних сполук, провести дослідження показників концентрацій нітратів у питній воді

Черкаського району та області. У завдання роботи входило: провести дослідження показників концентрацій нітратів у питній воді Черкаського району та області, виконати статистичну обробку результатів і проаналізувати їх на відповідність ДДД, охарактеризувати динаміку та джерела надходження токсичних речовин, розробити рекомендації щодо безпечних умов споживання питної води із приватних свердловин і колодязів населенням, визначити перспективи подальших досліджень.

Результати досліджень. Контроль за якістю питної води проводиться на всіх етапах її очищення – як перед подачею у водорозподільну мережу, так і в системі водорозподільних мереж міста Черкаси. Для здійснення контролю функціонує лабораторія КП «Черкасиводоканал», яка у 2018 р. отримала сертифікат визнання вимірювальних можливостей. На сьогоднішній день контроль якості питної води щоденно проводиться за 10 показниками, зокрема і за вмістом нітратів. В таблиці 1 наведено дані щодо дослідження вмісту нітратів у питній воді III підйому КП «Черкасиводоканал» за період квітень–вересень 2022 р.

Таблиця 1. Вміст нітратів у питній воді III підйому КП «Черкасиводоканал» (квітень – вересень 2022 р.)

Період дослідження проб води	Одиниці вимірювання	Показники: нітрати (по NO ₃) питна вода водопровідна	ДСанПіН 2.2.4 – 171-10 Не більше
Квітень	мг/дм ³	5,62	50
Травень		4,8	
Червень		<0,2	
Липень		0,72	
Серпень		0,52	
Вересень		0,45	

З аналізу таблиці 1 можна зробити висновки, що перевищень по вмісту нітратів у питній воді з централізованих джерел водопостачання за зазначений період не виявлено.

За останні роки на КП «Черкасиводоканал» відбулися значні зміни в модернізації технології водопідготовки, зокрема перехід від сірчаноокислого алюмінію як коагулянту на більш сучасні реагенти, що дозволяють значною мірою зменшити вміст алюмінію у воді та відповідно поліпшити якість технологічної обробки.

На наступному етапі провели аналіз забрудненості нітратами води джерел централізованого та децентралізованого водопостачання на дослідних територіях області.

Дослідження вмісту нітратів у джерелах водопостачання Черкаської області, що проводились на базі лабораторії Державної установи «Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» (далі Центр), подано у таблиці 2.

Дані таблиці 2 засвідчують, що відібрані й проаналізовані проби питної води мали

відхилення від нормативних показників допустимої добової дози (ДДД – 50 мг/дм³) як у деяких джерелах централізованого водопостачання (зокрема й у міських водогонях, окрім м. Черкаси) так і у джерелах децентралізованого водопостачання.

стачання (зокрема й у міських водогонях, окрім м. Черкаси) так і у джерелах децентралізованого водопостачання.

Таблиця 2. Показники досліджень джерел господарсько-питного водопостачання у Черкаській області за 2021 р.

№ з/п	Об'єкти водопостачання	Всього	Кількість проб на вміст нітратів, шт.	
			Всього	З них не відповідає нормативам
1	Централізоване водопостачання, зокрема:	402	1027	77
	Водозабори	19	58	7
	Комунальні водопроводи	132	354	24
	Відомчі водозабори	92	328	23
2	Сільські водопроводи	170	296	23
3	Локальні водопроводи	26	49	7
4	Нецентралізоване водопостачання	890	295	271
5	Колодязі шахтні:	801	714	252
	Зокрема громадські	142	81	16
	Індивідуальні колодязі	580	596	220
6	Каптажі	8	20	-
7	Артезіанські свердловини	36	185	19

Оскільки за даними рисунка 1 та показниками таблиці 2 найбільш підвищений рівень концентрації нітрат-іонів на території України та Черкаської області спостерігається у воді колодязів, то для підтвердження отри-

маних результатів і встановлення зміни динаміки накопичення забруднень нами були проведені дослідження питної води шахтних колодязів приватного сектору у селах Черкаського району (таблиця 3).

Таблиця 3. Концентрації вмісту нітратів у питній воді шахтних колодязів селищ Черкаського району

№ з/п	Села району дослідження	Концентрація у мг/дм ³		
		мінімальна	максимальна	середня
1	Білозір'я	4,4	66,8	56,6±2,95
2	Будище	32,6	56,0	54,0±2,95
3	Вергуни	4,4	50,6	52,2±3,62
4	Геронимівка	4,4	58,0	49,6±9,60
5	Дубіївка	16,8	58,6	42,6±11,30
6	Леськи	4,4	52,6	48,5±6,53
7	Лозівок	16,4	53,4	49,4±8,46
8	Мошни	18,6	53,4	48,8±9,56
9	Софіївка	8,8	53,2	52,0±3,62
10	Свидівок	4,4	50,8	50,6±3,62
11	Руська Поляна	8,8	58,0	38,6±4,25
12	Худяки	4,4	54,0	49,4±5,43
13	Хутори	8,8	50,6	44,8±11,52
14	Шелепухи	28,6	50,8	46,8±4,25

Як свідчать дані таблиці, максимальні показники визначених концентрацій нітрат-іонів у воді колодязів зазначених селищ

Черкаського району перевищують добові допустимі дози, що наочно демонструє рисунок 7.

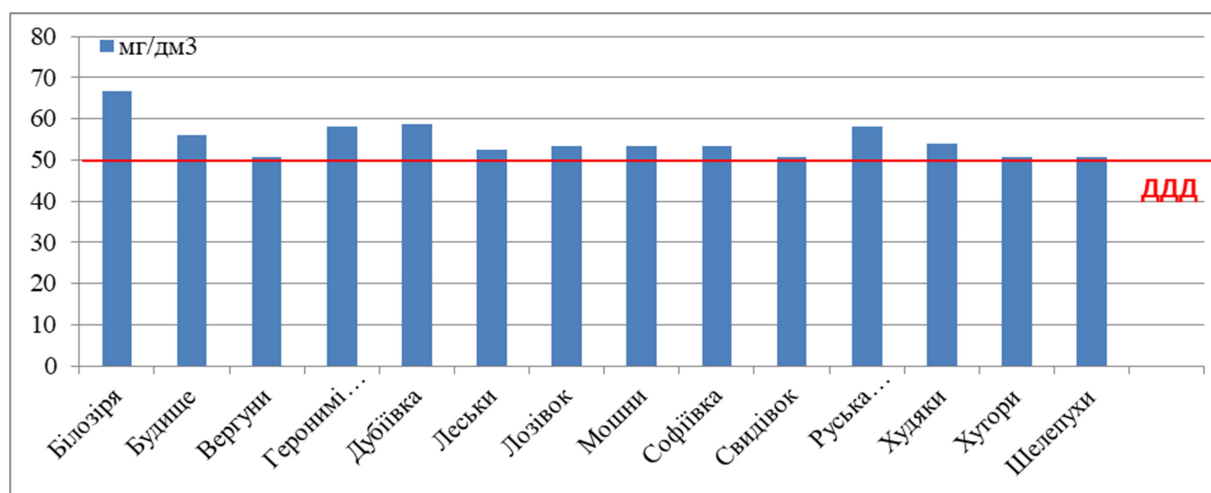


Рисунок 7. Діаграма максимальних концентрацій нітрат-іонів у питній воді колодязів

Середні значення показників у переважній більшості проб знаходяться у межах граничних значень.

Обговорення результатів. Проведені нами дослідження показали, що у воді централізованих джерел водопостачання середня концентрація нітратів становила 24 мг/дм^3 , що не перевищує гранично-допустимий норматив. Разом з тим, у 2,8 % досліджених проб води з джерел централізованого водопостачання деяких міст області концентрація нітратів перевищує гранично-допустимий норматив і становить 110 мг/дм^3 (м. Умань, м. Тальне та ін.).

Значно інформативнішими були дані щодо концентрацій нітратів у воді з децентралізованих джерел водопостачання області, де середня концентрація становила 44 мг/дм^3 , що не перевищує гранично-допустимий норматив. Разом з тим, у 18 % досліджених проб води концентрація нітратів перевищує гранично-допустимий норматив в 1,5–4,0 рази (таблиця 2). В окремих джерелах контролю (шахтні та трубні колодязі) цей показник становить 235 мг/дм^3 і навіть 900 мг/дм^3 , що надзвичайно небезпечно для здоров'я населення, особливо для немовлят, добова норма для яких становить $2,5 \text{ мг/кг/добу}$.

Як свідчать дані таблиці 3 та рисунка 7, максимальні показники визначених концентрацій нітрат-іонів у воді селищних колодязів

Черкаського району перевищують добові допустимі дози в 1,02–1,34 разу. Середні значення показників у переважній більшості проб знаходяться у межах граничних значень, за винятком проб води сіл: Білозір'я, Будище, Вергуни та інші. Проте, якщо допустити використання питної води для харчування, що передбачає її кип'ятіння, то концентрація солей може зрости на 30–80 %.

Державною установою «Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» у 2021 р. досліджено 5254 проби харчових продуктів (овочі та фрукти, продовольча сировина) та 1952 проби питної води з централізованих і децентралізованих джерел водопостачання, з них 925 – з децентралізованих та 1027 – з централізованих (рисунок 8).

Дослідження показали, що 0,6 % проб продуктів харчування мають вміст нітратів, вищий максимально допустимих значень ГДК. У воді питній з централізованих джерел водопостачання перевищення граничних концентрацій містили 4 % проб, а з децентралізованих джерел – понад 30 %.

На основі проведених досліджень відібраних проб води, а також аналізу зразків овочів і фруктів встановлено, що основним джерелом надходження нітратів в організм людини є питна вода децентралізованих джерел водопостачання (рисунок 8).

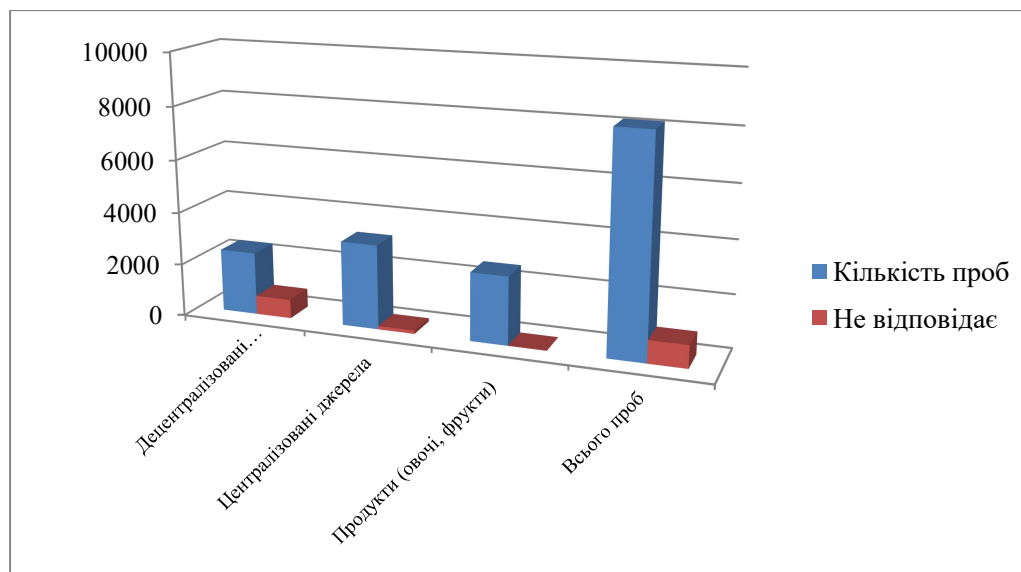


Рисунок 8. Результати дослідження вмісту нітратів у відібраних зразках води та продуктів харчування

З метою моніторингу Центр досліджує лише колодязі громадського користування. Обов'язковою умовою є дослідження води в колодязях у місцях мешкання дітей до трьох років та вагітних жінок. Слід звернути увагу на те, що нітрат-іони не мають ні запаху, ні кольору, тобто за органолептичними показниками їх визначити неможливо. Вживання забрудненої токсикантами питної води та продуктів рослинництва призводить до такого захворювання, як метгемоглобінемія, яка за своїми масштабами вийшла вже на глобальний рівень [13, 14].

Головна небезпека криється в тотальному забрудненні нітратами біосфери, що призводить до негативного впливу останніх на організм людини, особливо дітей раннього віку, погіршенні якості рослинних сільськогосподарських продуктів. Це обумовлено насамперед неможливістю досягнення екологічного оптимуму під час використання у рослинництві інтенсивних технологій, пов'язаних, зокрема, із застосуванням в значних кількостях доступних нітрогенвмісних мінеральних добрив, а також скидом побутових стічних вод від індивідуальних та колективних господарств у вигрібні ями, звідки у результаті всмоктування ґрунтом вони потрапляють у підземні води. Негативним наслідком цього є забруднення питної води, що надзвичайно небезпечно, особливо для дитячого організму, а саме для дітей в перші місяці життя [15].

Висновки. У статті порушено питання проблематики забруднень питної води децентралізованих джерел водопостачання токсичними нітрат-іонами.

Одним із головних механізмів токсичної дії нітратів є перетворення гемоглобіну в метгемоглобін, що викликає циркуляторну і тканинну гіпоксію, блокування ферментних систем клітин та призводить до порушення окиснювального фосфорилування і нітратної метгемоглобінемії. Ризик розвитку метгемоглобінемії у дітей першого року життя насамперед пов'язаний з недосконалістю ферментних систем організму та, відповідно, біохімічних процесів. Немовлята вживають в 10 разів більше рідини на одиницю маси тіла, ніж дорослі. До зони ризику також відносять дітей до 3–6 років та вагітних жінок. Як правило, залежно від рівня метгемоглобіну в крові людини розрізняють легкий (10 %), середній (до 40 %) та важкий (до 60 %) ступінь отруєння. В нормі в організмі людини в крові є 1–2 % метгемоглобіну. Якщо ця величина перевищує 10 %, то спостерігаються клінічні прояви гіпоксії, перевищення на 30–40 % викликають анемію. Причому в дітей рівень метгемоглобіну в 5 % може призвести до легкого ступеня отруєння, а в 40–45 % – до летальних наслідків. Тому водно-нітратну метгемоглобінемію можна віднести до ендемічних захворювань, що виникають у населення конкретної місцевості і обумовлені відповідними геохімічними особливостями.

Таким чином, відповідно до мети дослідження вирішено завдання встановлення причин наявності нітратів у колодязях та каптажах, до яких також можна віднести недотримання власниками вимог санітарного законодавства при їх облаштуванні та відповідно утриманні колодязів, що зі свого боку призводить до забруднення питної води та її непридатності до споживання. Тому контроль питної води, особливо децентралізованих джерел водопостачання, повинен бути вирішений на державному рівні.

Практичне значення. Матеріали статті та проведені дослідження сприяють визначенню пріоритетних завдань та розробці підходів щодо покращення екологічного стану питної води, особливо з джерел децентралізованого водопостачання. Насамперед, необхідно оздоровити водоносний горизонт, проводити інформативно-роз'яснювальну роботу серед населення, починаючи з вивчення та усвідомлення цієї проблеми у школі.

Також постає нагальна проблема з побудови в забруднених зонах водогонів як за кошти окремих громадян, так і за кошти територіальних громад.

Інший ефективний шлях вирішення цієї проблеми пов'язаний з очищенням води, що забруднена нітратами та нітритами, на станціях комплексного очищення води, що також потребує значних матеріальних затрат.

Враховуючи, що діти раннього віку є найбільш чутливими до токсичної дії нітратів та інших хімічних сполук, передусім необхідно вживати заходів щодо забезпечення їх доброякісною питною водою, а отруєння дітей слід розглядати як надзвичайну екологічну ситуацію.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачається досліджувати питання впливу нітратовмісних сполук на довкілля, визначення ризиків, які обумовлюють порушення навколишнього середовища, та визначення збитку від впливу природних, техногенних, економічних та соціальних чинників.

Окрім цього, наведений аналіз даних та результатів експериментального дослідження підтверджує необхідність подальшого здійснення моніторингу за станом підземних та поверхневих джерел водопостачання, а також вивчення популяційного й індивідуального ризиків для здоров'я від фактичного надходження нітратів в організм людини, враховуючи вікову чутливість.

Список використаних джерел

- [1] *Нітрати у воді*: веб-сайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ecosoft.ua.ua/blog/nitraty-v-vode/>.
- [2] L. D. Romanchuk, R. A. Valerko, L. O. Herasymchuk, and M. M. Kravchuk, "Assessment of the impact of organic agriculture on nitrate content in drinking water in rural settlements of Ukraine", *Ukrainian Journal of Ecology*, vol. 11, no. 2, pp. 17-26, 2021. doi: 10.15421/2021_71.
- [3] H. Kim et al., "Nitrate contamination and subsequent hydrogeochemical processes of shallow groundwater in agro-livestock farming districts in South Korea", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 273, pp. 50-61, 2019. doi: 10.1016/j.agee.2018.12.010.
- [4] O. V. Lototska, and V. O. Prokopov, "Assessment of the risk of the consumption of drinking water with the increased content of nitrates for the health of the people of the Ternopil region", *Environment & Health*, no. 4, pp. 20-24, 2018. doi: 10.32402/dovkil2018.04.020.
- [5] С. Р. Гребенюк, та О. М. Хоменко, "Екологічна оцінка поверхневих вод Черкаської області", на *IX Міжнар. наук. конф. молодих вчених, Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування*. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна. 2021, с. 72-74.
- [6] *Вплив нітратів на організм людини*: веб-сайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dpssc.gov.ua/pres-tsentr/novyny/1115/vplyv-nitrativ-na-orhanizm-liudyny.html>.
- [7] *Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні за 2020 рік*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teplo-vodopostachannya-ta-vodovidvedennya/natsionalna-dopovid/nacjonalna-dopovid-pro-yakist-pytanoi-vody-ta-stan-pytного-vodopostachannya-v-ukrayini-za-2020-rik-2/>.
- [8] *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області у 2021 році*. Черкаси: Упр. екології та природних ресурсів Черкас. обл. держ. адміністрації, 2022.

- [9] ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною".
- [10] Закон України "Про питну воду та питне водопостачання".
- [11] Закон України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя".
- [12] Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 22 квітня 2022 року № 683 "Про затвердження Державних санітарних норм і правил "Показники безпечності та окремі показники якості питної води в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій іншого характеру".
- [13] M. Parvizishad, A. Dalvand, A. H. Mahvi, and F. A. Goodarzi, "Review of adverse effects and benefits of nitrate and nitrite in drinking water and food on human health", *Health Scope*, vol. 6 (3), e14164, 2017. doi: 10.5812/jhealthscope.14164.
- [14] M. Qasemi et al., "Health risk assessments due to nitrate levels in drinking water in villages of Azadshahr, northeastern Iran", *Environ Earth Sci.*, vol. 77, 782, 2018. doi: 10.1007/s12665-018-7973-6.
- [15] Ю. Г. Бондаренко, О. С. Джулай, В. М. Рябовол, О. А. Хоменко, та О. А. Коханій, "Медико-гігієнічна оцінка води поверхневого джерела централізованого водопостачання міста Черкаси", *Довкілля та здоров'я*, № 3 (88), с. 16-21, 2018.
- [16] Інтерактивні карти якості води. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://voda.org.ua>
- [17] Комунальне підприємство «Черкасиводоканал». [Електронний ресурс]. Режим доступу: vodokanal-cherkasy.ck.ua
- [18] *Ecosystems & Environment*, vol. 273, pp. 50-61, 2019. doi: 10.1016/j.agee.2018.12.010.
- [4] O. V. Lototska, and V. O. Prokopov, "Assessment of the risk of the consumption of drinking water with the increased content of nitrates for the health of the people of the Ternopil region", *Environment & Health*, no. 4, pp. 20-24, 2018. doi: 10.32402/dovkil2018.04.020.
- [5] S. R. Grebeniuk, and O. M. Khomenko, "Ecological assessment of surface waters of the Cherkasy region", in Proc. IX Int. Sci. Conf. of young scientists, Ecology, Neoeology, Environmental Protection and Balanced Nature Management. Kharkiv: KhNU named after V. N. Karazin, 2021, pp. 72-74 [in Ukrainian].
- [6] *Effects of nitrates on the human body*: website. [Online]. Available: <https://dpssc.gov.ua/pres-tsentr/novyny/1115/vplyv-nitrativ-na-orhanizm-liudyny.html> [in Ukrainian].
- [7] *National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply in Ukraine for 2020*. [Online]. Available: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teplo-vodopostachannya-ta-vodovidvedennya/natsionalna-dopovid/naczialna-dopovid-pro-yakist-pytanoi-vody-ta-stan-pytogo-vodopostachannya-v-ukrayini-za-2020-rik-2> [in Ukrainian].
- [8] *Regional report on the state of the natural environment in the Cherkasy region in 2021*. Cherkasy: Department of Ecology and Natural Resources of the Cherkasy Regional State Administration, 2022 [in Ukrainian].
- [9] ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption" [in Ukrainian].
- [10] *Law of Ukraine "On drinking water and drinking water supply"* [in Ukrainian].
- [11] *Law of Ukraine "On ensuring sanitary and epidemic welfare"* [in Ukrainian].
- [12] *Order of the Ministry of Health of Ukraine dated April 22, 2022 no. 683 "On the approval of State sanitary norms and rules "Safety indicators and separate indicators of the quality of drinking water in conditions of martial law and other emergency situations"* [in Ukrainian].
- [13] M. Parvizishad, A. Dalvand, A. H. Mahvi, and F. A. Goodarzi, "Review of adverse effects and benefits of nitrate and nitrite in drinking water and food on human health",

References

- [1] *Nitrates in water*: web-site. [Online]. Available: <https://ecosoft.ua/ua/blog/nitraty-v-vode/> [in Ukrainian].
- [2] L. D. Romanchuk, R. A. Valerko, L. O. Herasymchuk, and M. M. Kravchuk, "Assessment of the impact of organic agriculture on nitrate content in drinking water in rural settlements of Ukraine", *Ukrainian Journal of Ecology*, vol. 11, no. 2, pp. 17-26, 2021. doi: 10.15421/2021_71.
- [3] H. Kim et al., "Nitrate contamination and subsequent hydrogeochemical processes of shallow groundwater in agro-livestock farming districts in South Korea", *Agriculture*,

- Health Scope*, vol. 6 (3), e14164, 2017.
doi: 10.5812/jhealthscope.14164.
- [14] M. Qasemi et al., "Health risk assessments due to nitrate levels in drinking water in villages of Azadshahr, northeastern Iran", *Environ Earth Sci.*, vol. 77, 782, 2018.
doi: 10.1007/s12665-018-7973-6.
- [15] Y. Bondarenko, O. Julay, V. Rabovol, O. Khomenko, and O. Kohanij, "Medical and hygienic assessment of water of the surface source of the centralized water supply of the city of Cherkasy", *Dovkillia ta zdorovia*, no. 3 (88), pp. 16-21, 2018 [in Ukrainian].
- [16] *Interactive water quality maps*. [Online]. Available: <https://voda.org.ua> [in Ukrainian].
- [17] *Cherkasyvodokanal utility company*. [Online]. Available: vodokanal-cherkasy.ck.ua [in Ukrainian].

O. M. Khomenko¹, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: o.khomenko@chdtu.edu.ua

L. M. Kravchenko¹,

L. I. Zhitska¹, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: zhytska_lyudmila@ukr.net

Yu. G. Bondarenko², Ph. D., Associate Professor
e-mail: ck-oblses@ukr.net

¹Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

²State institution "Cherkasy Regional Center for Disease Control and Prevention
of the Ministry of Health of Ukraine"
Volkova st., 3, Cherkasy, 18005, Ukraine

ENVIRONMENTAL AND HYGIENIC ASSESSMENT OF NITRATE ENTRY INTO THE HUMAN BODY WITH DRINKING WATER

The article raises the issue of compliance of water from the sources of centralized and decentralized water supply in Ukraine and the Cherkasy region with the requirements of DSanPiN 2.2.4-171-10 "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption", the Law of Ukraine "On drinking water and drinking water supply", "On ensuring sanitary and epidemic welfare". The results of the research of the nitrate content in centralized water mains, private wells and wells in settlements of the Cherkasy district are highlighted. It is established that the average concentration of nitrates in the water of centralized water supply sources was 24 mg/dm³, which does not exceed the maximum permissible standard. However, in 2.8% of the investigated water samples of centralized water supply sources, a slight excess of the normative values was observed, and in the water of individual sources it was 110 mg/dm³ (the city of Uman, the city of Talne, etc.). The determined average concentration of nitrates in the water of decentralized water supply sources was 44 mg/dm³, which is within the maximum permissible level, but in 18% of the tested samples there was a deviation from the permissible daily dose (PDD – 50 mg/dm³) in 1,5–4, 0 times, and, in some sources of control (mines and tube wells), was 235 mg/dm³ and even 900 mg/dm³, which is extremely dangerous for public health, especially for infants, for whom the daily norm is 2,5 mg /kg/day.

The issue of the effect of nitrate compounds on the human body, which in high doses quickly oxidize blood hemoglobin into methemoglobin, causing circulatory and tissue hypoxia, block the enzyme systems of body cells, which leads to a violation of oxidative phosphorylation and nitrate methemoglobinemia, has been studied. Possible sources of ingress of toxicants into drinking water have been determined, and recommendations for its use have been developed.

Keywords: drinking water, nitrates, decentralized sources, water supply, ecological and hygienic assessment, toxic effect.

УДК 621.357

[0000-0002-2809-2774] Д. Ю. Ущиповський, канд. техн. наук,
[0000-0001-7479-9140] В. І. Воробйова, канд. техн. наук, доцент,
[0000-0003-3680-8485] О. А. Плївак,
[0000-0002-3717-5934] Т. І. Мотронюк, канд. техн. наук, доцент,
[0000-0003-4056-5551] Г. С. Васильєв, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: g.vasyliiev@kpi.ua

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, пр-т. Перемоги, 37, 03056, Україна

ОБМЕЖЕННЯ НІТРАТНОГО ЕЛЕКТРОЛІТУ МІДНЕННЯ ДЛЯ ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО 3D-ДРУКУ

Проведено випробування локального електроосадження металічної міді з нітратного електроліту з метою визначення можливості застосування цього електроліту в технології електрохімічного 3D-друку. Осадження проводили з використанням платинового нерозчинного анода, розміщеного в поліпропіленовому капілярі діаметром 4 мм. Електроформували об'єкти у формі циліндра висотою 100 мкм та 500 мкм за різної густини струму в стаціонарному та імпульсному режимах. Експериментально осажені зразки аналізували із застосуванням 3D-профілометрії, порівнювали профіль поверхні з комп'ютерною моделлю та бажаним профілем покриття. Встановлено, що найвища точність друку досягається при густині струму осаження 20 А/дм² при товщині осаду до 100 мкм. Збільшення товщини осаду, густини струму осаження та застосування імпульсного режиму призводять до зниження точності електроформування та компактності осаду через появу дифузійних обмежень і утворення дендритів. Таким чином, нітратний електроліт дозволяє проводити якісне локальне електроосадження об'єктів з міді висотою до 100 мкм при густині струму до 20 А/дм².

Ключові слова: локальне електроосадження, профіль осаду, комп'ютерне моделювання, профілометрія, дендрити.

Вступ. Розвиток технологій високоточного позиціонування робочого інструменту на основі комп'ютерної моделі зумовлює перехід від субтрактивних методів виробництва до адитивних. Традиційно для виготовлення деталі субтрактивним методом використовується заготовка з матеріалу, з якої в ході обробки видаляється зайвий матеріал (механічним, термічним, хімічним або іншим способом) і отримується деталь. При адитивному виробництві деталь формується з матеріалу шляхом її пошарового нанесення. При цьому собівартість виготовлення стає оберненою до складності виробу, оскільки при адитивному способі виробництва чим більша складність деталі, тим меншою є витрата матеріалу.

Відомі технології адитивного виробництва з різних матеріалів таких як полімери, кераміка або композити. Однак найбільш перспективними є адитивні технології виробництва з металів. На сьогоднішній день для формування виробу з металу шляхом 3D-друку

набули поширення технології, що базуються на локальному спіканні металевих порошків під дією лазерного променя, дугового розряду або індукційного нагріву [1, 2]. Технології дозволяють виготовляти деталі в широкому інтервалі габаритів 10^{-3} – 10^1 м з різних металів. Недоліком технологій адитивного виробництва, що базуються на локальному плавленні, є висока енергоємність, а також необхідність отримання металевих порошків або дроту, перед тим як виготовляти з нього виріб.

Таких недоліків позбавлена електрохімічна технологія адитивного виробництва, що базується на локальному електрохімічному осаженні металу з електроліту [3-5]. В цій технології формування виробу відбувається за температури до 100 °С, а для більшості металів – навіть за кімнатної. Витрати електричної енергії мінімальні, оскільки напруга для основних електрохімічних процесів не перевищує 2-5 В. Обмеженням електрохімічного 3D-друку є його відносно низька швидкість, що

визначається густиною струму осадження та розмірами робочого електрода.

На сьогоднішній день електрохімічний 3D-друк застосовується для виготовлення мікрооб'єктів розмірами 10^{-8} – 10^{-2} м. Нині відомо кілька електрохімічних методів адитивного виробництва, які можна розділити на дві основні групи: осадження на основі маски та осадження без маски. У першому випадку катод покривають ізоляційною маскою, яка закриває ділянки, де не повинно відбуватися осадження. Так, метал осідає на незакритій частині поверхні [6]. У випадку застосування маски маска рухається разом з анодом. Осадження починається лише тоді, коли маска зафіксована на поверхні. Коли електроліт збіднюється за іоном осаджуваного металу, осадження припиняють, маска знімається, а склад електроліту оновлюється [7].

Методи осадження без маски виконуються на відкритій поверхні. Першим прикладом цього підходу є локальне електрохімічне осадження, запропоноване в 1995 р. [8]. Метод ґрунтується на осадженні металу в локалізованій зоні під робочим електродом. Для отримання дуже локалізованого електричного поля використовується ультратонкий інертний точковий анод, а також малий міжелектродний проміжок. Подальший розвиток запропонованого методу було спрямовано на вдосконалення конструкції анода. Анод розміщувався всередині діелектричного капіляра, що забезпечує додаткове фокусування електричного поля [9-11]. При електроформуванні об'єкта з обмеженим меніском осадження відбувається в електролітному містку у формі меніска між анодом та поверхнею-катодом [12-16]. Швидкість осадження визначається швидкістю дифузії іонів і дуже мала. Надзвичайно малі об'єкти можна отримати шляхом електроосадження за допомогою рідинного силового мікроскопа [17].

Важливим аспектом у технології адитивного виробництва є швидкість виготовлення деталі. Так, при електрохімічному способі адитивного виробництва для збереження швидкості виготовлення при збільшенні розмірів об'єкта потрібно підвищувати швидкість локального осадження металу, що можливо досягти за рахунок підвищення густини струму. Дослідження впливу густини струму на якість локального осадження доцільно проводити в системах із виходом за струмом, близь-

ким до 100 %, наприклад при формуванні виробів із міді. Як відомо, густина струму електрохімічного процесу напряму пов'язана з концентрацією іонів осаджуваного металу, а тому перспективним напрямом може бути перехід від сульфатних до нітратних електролітів міднення.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи було встановлення оптимальної густини струму, висоти об'єкта і точності електроформування при використанні нітратного електроліту міднення в процесах електрохімічного 3D-друку. Для цього треба було вирішити такі задачі:

- встановити кінетичні параметри процесу електроосадження міді з нітратного електроліту;
- побудувати комп'ютерну модель процесу електроформування у середовищі Comsol Multiphysics та дослідити вплив міжелектродної відстані на точність осадження;
- розробити методику визначення точності електрохімічного формування об'єкта;
- провести експериментальне електроформування об'єкта за різних густин струму, часу та режиму електролізу;
- порівняти результати експерименту з комп'ютерною моделлю та оцінити точність електроформування.

Методика експерименту. Дослідження локального електроосадження з нітратного електроліту міднення проводили з електроліту такого складу: 270 г/дм³ Cu(NO₃)₂; 0,1 г/дм³ KCl; HNO₃ до pH 2...2,5. Комірку для осадження наведено на рисунку 1. Осадження проводили на мідну основу, яку попередньо знежирювали та протравлювали. Мідну основу розташовували в тефлоновій ємності об'ємом 200 см³, в яку заливали 150 см³ електроліту, так, щоб рівень електроліту над поверхнею становив 20 мм. Розташований над центром основи капіляр, виготовлений із поліпропілену з внутрішнім діаметром 4 мм і товщиною стінки 1 мм, за допомогою мікрометричного гвинта підводили до поверхні основи на відстань 0,5-1 мм. Всередині капіляра, на відстані 4 мм від його нижнього краю, розміщувався нерозчинний платиновий анод.

Електроліз проводили в стаціонарному та імпульсному режимах. Густина струму в стаціонарному режимі становила 20 А/дм² і 30 А/дм², в імпульсному режимі середня гус-

тина струму – $1,14 \text{ А/дм}^2$, параметри імпульсу: тривалість – $0,01 \text{ с}$, пауза – 1 с , густина струму в імпульсі – 115 А/дм^2 . Тривалість процесу осадження обирали з розрахунку товщини покриття – 100 мкм та 500 мкм .

Для побудови комп'ютерної моделі процесу електроосадження визначали кінетичні параметри процесу. Поляризаційні криві осадження міді з нітратного електроліту знімали в триелектродній комірці з мідним робочим електродом, мідним допоміжним та хлорсрібним електродом порівняння. Поляризаційні криві отримували в гальваностатичному режимі, тривалість витримки при постійній густині струму до встановлення стаціонарного значення потенціалу становила 5 хв . В середньому значення стаціонарного потенціалу встановлювалось за $3\text{--}4 \text{ хв}$ (при зсуві потенціалу не більш ніж 10 мВ/хв). Як джерело постійного струму використовувався імпульсний потенціостат ПП-51.1. Із поляризаційних кривих визначали величину поляризованості, яку використовували для побудови комп'ютерної моделі процесу локального електроосадження.

Для прогнозу можливості локального електроосадження з нітратного електроліту проведено комп'ютерне моделювання росту осаду. Для цього в середовищі COMSOL Multiphysics побудовано модель процесу електроосадження для комірки, яка наведена на рисунку 1, а та відповідає геометричним параметрам експериментальної (рисунк 1, б). Проведено моделювання процесу локального електроосадження для відстані від краю капіляра до поверхні $0,5 \text{ мм}$ та 1 мм . Результати комп'ютерного моделювання порівнювали з профілем реальних зразків, отриманих локальним електроосадженням.

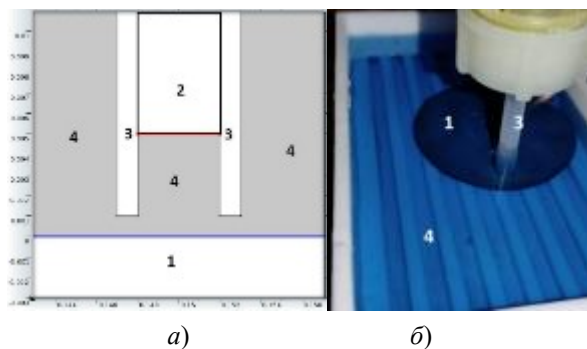


Рисунок 1. Схема (а) і фото (б) електрохімічної комірки: 1 – катод (мідна основа); 2 – анод (платина); 3 – поліпропіленовий капіляр; 4 – електроліт

Для аналізу морфології осаджених зразків застосовували метод 3D-профілометрії із застосуванням пристрою для вимірювання мікрогеометрії та шорсткості. Профіль поверхні отримували з точністю $0,625 \text{ мкм}$ у горизонтальній площині та $0,25 \text{ мкм}$ у вертикальній.

Точність локального електроосадження визначали шляхом порівняння площі, що обмежується профілем поверхні експериментально осадженого об'єкта з профілем покриття комп'ютерної моделі та бажаним профілем об'єкта. Схематично методику оцінки точності зображено на рисунку 2. Бажаним профілем локально осадженого об'єкта на поверхні основи 1 є профіль 2. Весь метал, осаджений в межах цього профілю, осаджується в межах площі S_0 , за межами профілю метал не осаджується. Реальний профіль осадженого об'єкта 3, внаслідок розподілу електричного поля, відрізняється від бажаного. Метал, осаджений в межах бажаного профілю, позначений як S_1 , а метал, осаджений за межами бажаного профілю, – S_2 .

Точність електроосадження чисельно характеризували двома параметрами:

- частка осаду, яка осаджена в межах бажаного профілю, знайдена як відношення $a = S_1/S_0$;
- частка осаду, яка осаджена поза межами бажаного профілю, знайдена як відношення $b = S_2/S_1$.

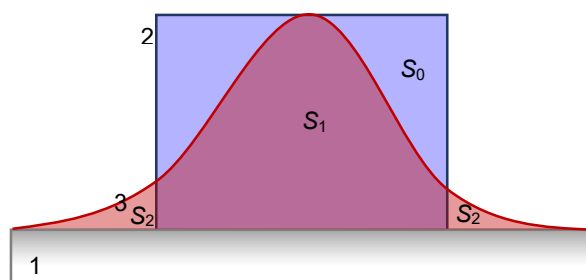


Рисунок 2. Схема обробки результатів локального електроосадження: 1 – поверхня металу-основи; 2 – бажаний профіль осадженого об'єкта; 3 – реальний профіль осадженого об'єкта; S_0 – площа об'єкта бажаного профілю; S_1 – площа реального об'єкта в межах бажаного; S_2 – площа реального об'єкта за межами бажаного

Результати досліджень. Поляризаційні криві, отримані у нітратному електроліті мід-

нення, зображено на рисунку 3, а визначені з них кінетичні параметри – у таблиці 1. З поляризаційної кривої добре видно, що у нітратному електроліті міднення дифузійні обмеження катодного процесу відновлення іонів міді не спостерігаються до густини струму у 25 A/дм^2 , що суттєво вище робочої густини струму у сульфатному електроліті, яка рідко перевищує 5 A/дм^2 . Причиною високої робочої густини струму є значно вища розчинність нітрату міді, порівняно із сульфатом, що веде до вищої концентрації іонів міді в електроліті.

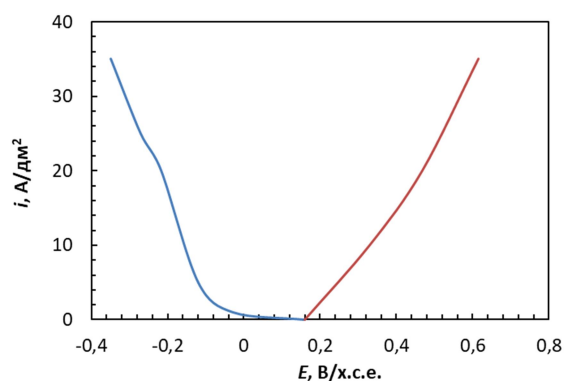


Рисунок 3. Поляризаційні криві у досліджуваному нітратному електроліті міднення

Таблиця 1. Кінетичні параметри процесу електроосадження міді з нітратного електроліту

Параметр	Електро- провідність σ , См/см	Обернена поляризованість катодного процесу di/dE , мА/см ² /В		Обернена поляризованість анодного процесу di/dE , мА/см ² /В	Напруга за густини струму φ_{ext} , В			
		5...25 А/дм ²	25...35 А/дм ²	10...35 А/дм ²	20 А/дм ²		30 А/дм ²	
					$\delta=0,5$ мм	$\delta=1$ мм	$\delta=0,5$ мм	$\delta=1$ мм
Значення	0,121	1600	1100	900	1,2	1,28	1,5	1,85

Фото осадів, сформованих у результаті експерименту, наведено на рисунку 4. Відповідні їм тривимірні діаграми розподілу товщини осаду по поверхні – на рисунку 5.

Локально осаджена мідь має різну структуру залежно від умов осадження. Осади з рівномірним розподілом металу по поверхні вдалося отримати при розрахунковій товщині

до 100 мкм при постійному струмі осадження (рисунки 5, а, б). Зростання товщини до 500 мкм призводить до суттєвого погіршення якості осаду, на поверхні утворюються дендрити (рисунки 5, в, г). Аналогічно осад низької якості отримано і при застосуванні імпульсного режиму осадження (рисунки 5, д).

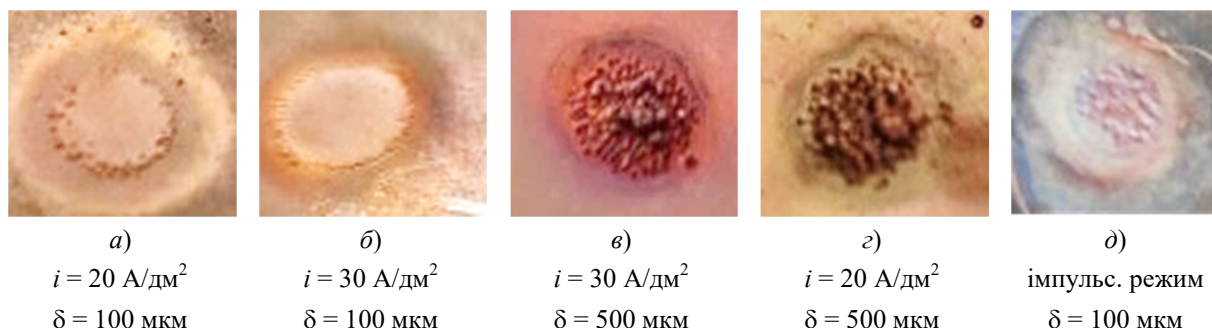


Рисунок 4. Зовнішній вигляд осаду

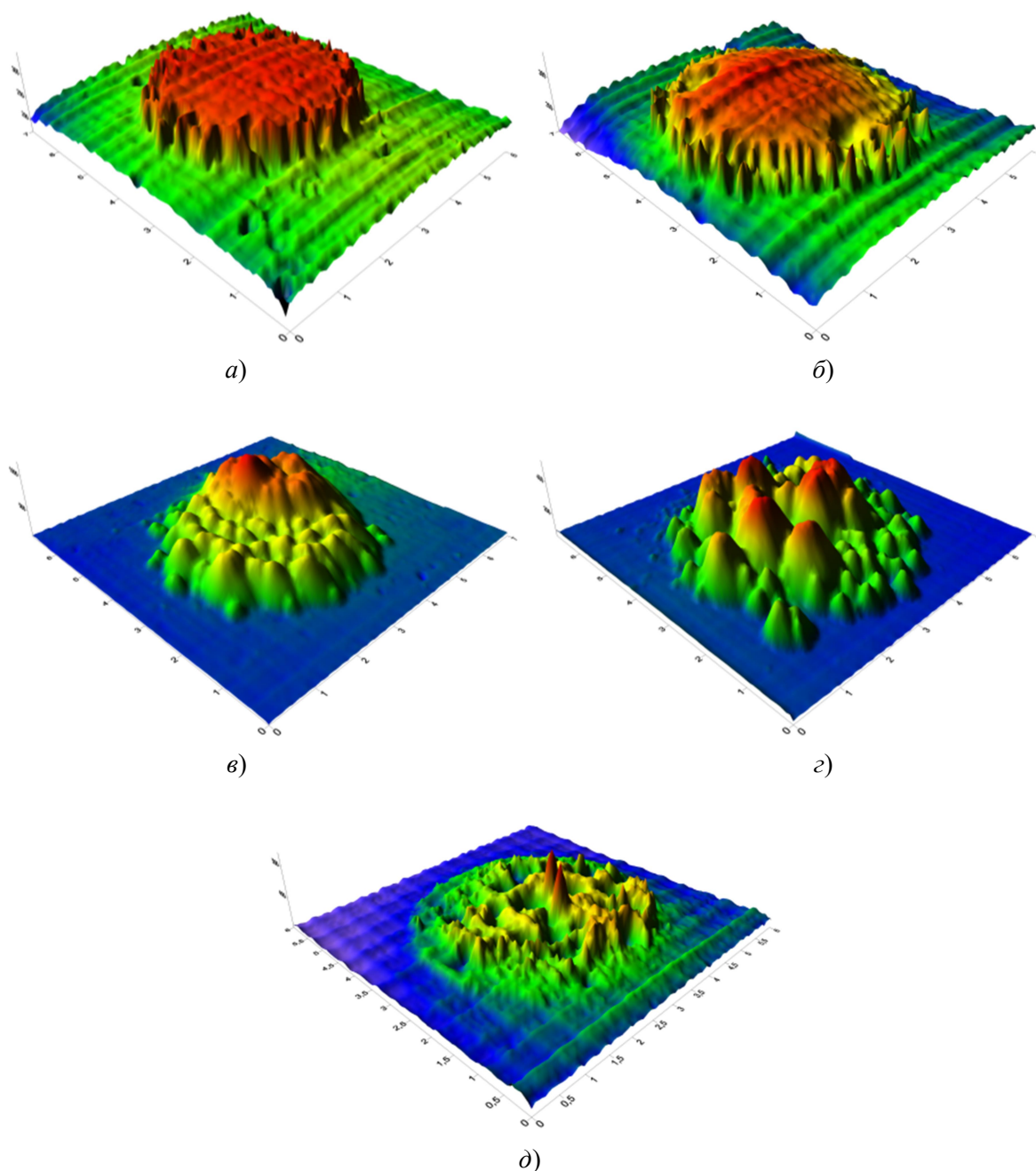


Рисунок 5. 3D-профілометрія локально сформованих осадів: а) 100 мкм, 20 А/дм²; б) 100 мкм, 30 А/дм²; в) 500 мкм, 20 А/дм²; г) 500 мкм, 30 А/дм²; д) імпульсний режим 100 мкм

Обговорення результатів. Для встановлення точності локального електроосадження з нітратного електроліту міднення використовували профілі осаду. На рисунку 6 наведено профілі, отримані в результаті комп'ютерного моделювання процесу осадження, профілі експериментально осадженого осаду, а також наведено бажаний профіль осаду для порівняння.

На рисунку 6, а наведено профілі осаду, осадженого за густини струму 20 А/дм² для

розрахункової товщини 100 мкм. Профіль експериментально осадженого осаду добре співпадає з бажаним. Як показують результати досліджень, зі збільшенням густини струму від 20 А/дм² до 30 А/дм² зростає недосконалість структури локально електроосадженого фрагменту осаду – з'являються по краях окремі кристаліти, зростає площа, яку займає електроосаджений фрагмент. З одного боку, це зумовлене зменшенням величини di/dE , а отже, збільшенням розсіювальної здатності

електроліту, як наслідок електричне поле на поверхні катода дещо розширюється. З другого боку, за густин струму, більших ніж 25 А/дм^2 , зменшується нахил поляризаційної кривої (рисунок 3), що свідчить про зміну характеру масоперенесення. Таким чином, при підвищених густинах струму може з'являтися домінуючий внесок дифузійних обмежень (наближення до граничних значень густини струму). Саме за таких умов недосконалість структури зростає – ріст осаду переважно перебігає на вершинах сформованих кристалічних угруповань. Те саме стосується і виродження кристалічної структури осаду при збільшенні тривалості електроосадження. Низька розсіювальна здатність електроліту та наявність дифузійних обмежень сприяють перетворенню кристалічної структури осаду від компактної стовпчикоподібної на дендритоподібну.

Аналогічні причини лежать в основі погіршення якості осаду при застосуванні імпульсного режиму електролізу. Зростання недосконалості структури осаду зумовлене насамперед виникненням дифузійних обмежень в момент імпульсу струму та інтенсивним збідненням прикатодного шару за іонами міді.

Результати комп'ютерного моделювання профілю осадженого металу при різних відстані від краю капіляра до поверхні металу-основи порівнювали з профілем поверхні металу, отриманим експериментально (рисунок 7). Для цього визначали відсоток збігу площі, обмеженої профілем поверхні, отриманим у комп'ютерній моделі та експериментально.

Із графіка (рисунок 7, а) видно, що відстань між капіляром та поверхнею металу-основи практично не впливає на кількість металу, осадженого в межах бажаного профілю. Для густини струму 20 А/дм^2 модель дає однаковий відсоток осаду в межах бажаного профілю як для міжелектродної відстані $0,5 \text{ мм}$, так і 1 мм . Розходження спостерігається лише для 30 А/дм^2 , при товщині осаду 500 мкм . А от за межами бажаного профілю зменшення міжелектродної відстані в моделі суттєво впливає на кількість осадженого металу (рисунок 7, б). Різниця в кількості осадженого металу становить майже 2 рази.

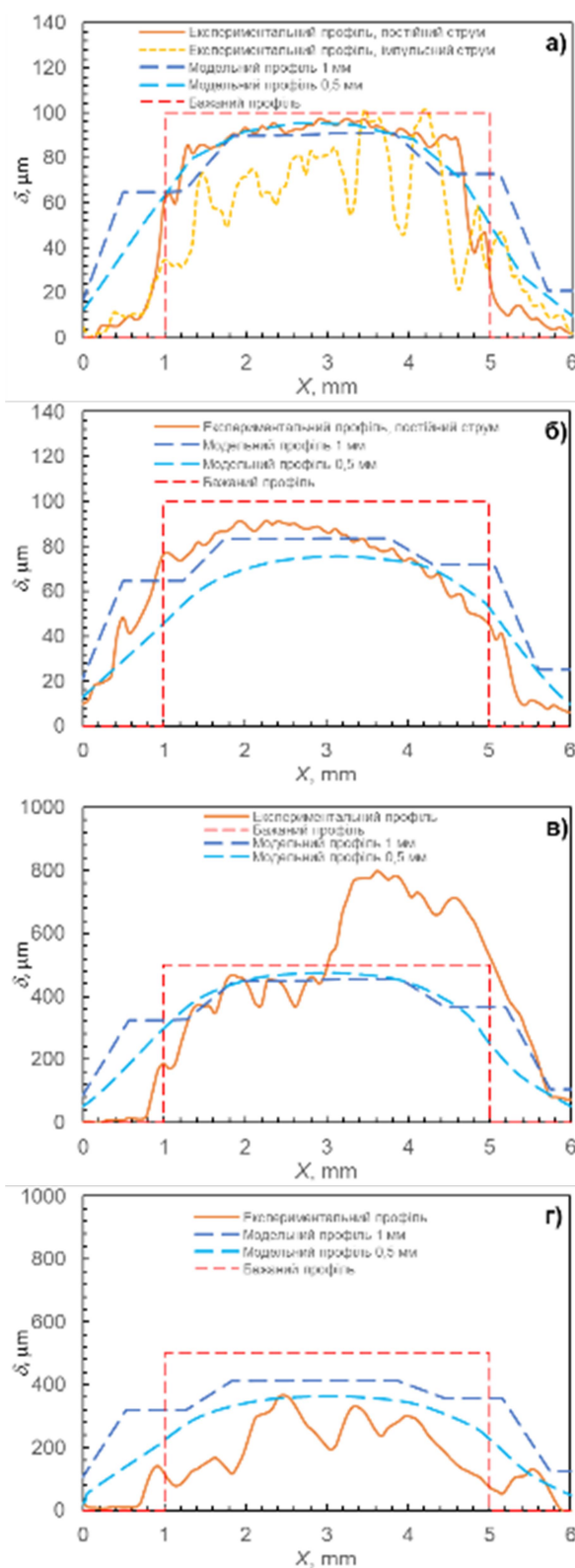


Рисунок 6. Профілі сформованих осадів:

- а) товщина – 100 мкм , густина струму – 20 А/дм^2 ;
- б) товщина – 100 мкм , густина струму – 30 А/дм^2 ;
- в) товщина – 500 мкм , густина струму – 20 А/дм^2 ;
- г) товщина – 500 мкм , густина струму – 30 А/дм^2

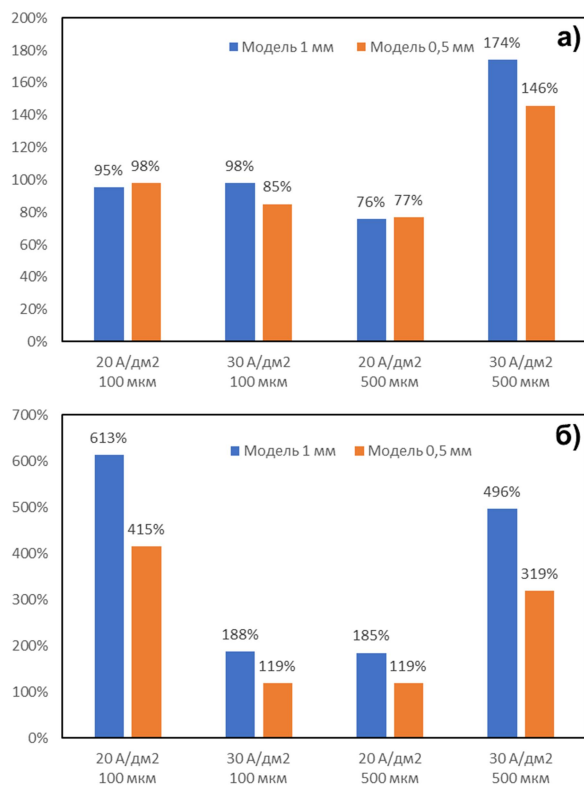


Рисунок 7. Кореляція між модельним та експериментальним профілем поверхні залежно від умов осадження і відстані між краєм капіляра з анодом та поверхнею, на якій осаджується метал: а) для металу, осадженого в межах бажаного профілю – співвідношення «а»; б) для металу, осадженого поза межами бажаного профілю – співвідношення «б»

За результатами комп'ютерного моделювання можна стверджувати, що при порівнянні впливу таких факторів, як електропровідність, поляризованість та міжелектродна відстань, визначальну роль в точності локального електрохімічного осадження відіграє остання. Це узгоджується з теоретичними уявленнями про вплив первинного розподілу струму на отриманий профіль осаду в умовах низької поляризованості.

Для кількісної оцінки точності друку проведено чисельне інтегрування площ, що обмежуються профілями осадженого металу. Так, на рисунку 8 наведено дані щодо площі металу, осадженого в межах бажаного профілю (рисунк 8, а) та поза межами бажаного профілю (рисунк 8, б). Дані гістограм добре узгоджуються з профілями поверхні рисунка 6. Найбільша точність друку спостерігається за густини струму 20 А/дм² і товщини осаду 100 мкм: 87 % осаду знаходиться в межах

бажаного профілю і лише 9 % – поза межами профілю. Підвищення густини струму до 30 А/дм² знижує точність – в межах бажаного профілю осаджується вже 80 %, а поза межами – 31 %. Зростання товщини осаду негативно впливає на точність друку. Так, при товщині осаду 500 мкм поза межами бажаного профілю осаджується не менше 22 % металу.

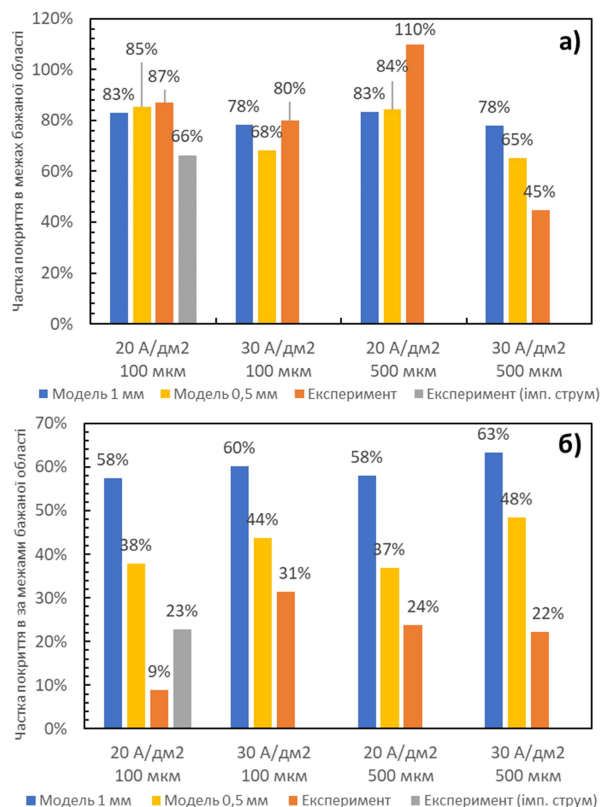


Рисунок 8. Порівняння точності локального електроосадження залежно від умов осадження і товщини осаду: а) частка осаду, що осіла в межах бажаної області – співвідношення «а»; б) частка осадженого осаду поза межами бажаної області – співвідношення «б»

Результати комп'ютерного моделювання на рисунку 8 узгоджуються з даними рисунка 7. Спостерігається добра кореляція між експериментальним і модельним профілями осаду, осадженими в межах капіляра (рисунк 8, а). З другого боку, кількість осадженого металу поза межами бажаного профілю зменшується із 58-63 % до 37-48 % при зменшенні відстані від краю капіляра, в якому розміщено анод, до поверхні, на якій осаджується метал, з 1 мм до 0,5 мм.

Подальші дослідження процесів електрохімічного 3D-друку слід спрямувати на

пошук електроліту та умов осадження, що дозволяє локально електроосаджувати метал з точністю, не гіршою за отриману в цій роботі, але на товщини до 1 мм і більше.

Висновки. Досліджено можливості нітратного електроліту міднення для процесів локального електроосадження металічної міді в процесі електрохімічного 3D-друку. В результаті дослідження встановлено наступне.

1. Обернена поляризованість процесу осадження міді з нітратного електроліту становить $1600 \text{ mA/cm}^2/\text{V}$ за густини струму до 25 A/dm^2 і зменшується до $1100 \text{ mA/cm}^2/\text{V}$ при збільшенні густини струму до 25 A/dm^2 .

2. Комп'ютерне моделювання процесу локального електроосадження міді з нітратного електроліту із застосуванням середовища COMSOL Multiphysics показало, що при порівнянні впливу таких факторів, як електропровідність, поляризованість та міжелектродна відстань, визначальну роль в точності локального електрохімічного осадження відіграє відстань між краєм капіляра, в якому розміщений анод, та поверхнею металу-основи. Через низьку поляризованість у нітратному електроліті найбільший вплив на отриманий профіль осаду має первинний розподіл струму в електроліті.

3. Для оцінки точності електрохімічного друку розроблена методика, що ґрунтується на визначенні площі, яка обмежена профілем поверхні покриття, отриманого експериментально або в комп'ютерній моделі. Точність друку оцінюється як відношення площі, яку займає покриття, в межах бажаного профілю і поза цими межами.

4. Нітратний електроліт міднення дозволяє локально формувати об'єкти сантиметрових розмірів малої товщини (до 100 мкм) при густині струму осадження до 20 A/dm^2 . В цих умовах спостерігається найвища точність нанесення – 87% міді осаджується в очікуваних межах і лише 9% – поза цими межами. За структурою осади є щільноупакованими і дрібнокристалічними.

5. Збільшення висоти осадженого металу до 500 мкм та збільшення густини струму осадження до 30 A/dm^2 призводить до зниження точності електрохімічного друку – кількість осаду за очікуваними межами зростає до 31% , в осаді з'являються дендрити. Це відбувається внаслідок переходу від дифузійно-кінетичних до суто дифузійних обмежень процесу електроосадження.

6. Імпульсний режим електролізу також не дозволяє підвищити точність друку з нітратного електроліту, лише 66% міді осаджується в межах очікуваної області, а 23% – поза межами. Зростання недосконалості структури осаду зумовлене виникненням дифузійних обмежень в момент імпульсу струму та інтенсивним збідненням прикатодного шару за іонами міді.

Подяка

Роботу виконано за підтримки МОН України в межах проєкту молодих вчених «Адитивна технологія електроосадження металів для 3D-друку нових матеріалів», 2022 р. Номер державної реєстрації – 0122U001523.

Список використаних джерел

- [1] C. Korner, "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - a review", *International Materials Reviews*, vol. 61, no. 5, pp. 361-377, 2016.
- [2] P. Regenfass et al., "Principles of laser micro sintering", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 204-212, 2007.
- [3] L. Xinchao, M. Pingmei, A. Sansan, and W. Wei, "Review of additive electrochemical micro-manufacturing technology", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 173, p. 103848, 2021.
- [4] Г. С. Васильєв, Д. Ю. Ущеповський, В. І. Воробйова, та О. В. Лінючева, "Моделювання процесів електрохімічного 3d-друку", *Наукові вісті КНУ*, № 2, с. 97-105, 2021.
- [5] G. Vasyliiev, V. Vorobyova, D. Uschapovskiy, and O. Linyucheva, "Local electrochemical deposition of copper from sulfate solution", *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 557-563, 2022.
- [6] S. D. Leith, and D. T. Schwartz, "High-rate through-mold electrodeposition of thick ($>200 \text{ }\mu\text{m}$) NiFe MEMS components with uniform composition", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 384-392, 1999.
- [7] A. L. Cohen, U. Frodis, F. G. Tseng, G. Zhang, M. Florian, and P. M. Will, "EFAB: low-cost automated electrochemical batch fabrication of arbitrary 3D microstructures", in *Proc. Micromachining and Micro-*

- fabrication Process Technology V*, vol. 3874, pp. 236-247, 1999.
- [8] J. D. Madden, S. R. Lafontaine, and I. W. Hunter, "Fabrication by electrodeposition: building 3D structures and polymer actuators", in *Proc. IEEE Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995, pp. 77-81.
- [9] J. Xu, W. Ren, Z. Lian, P. Yu, and H. Yu, "A review: development of the maskless localized electrochemical deposition technology", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, pp. 1731-1757, 2020.
- [10] P. Hanekamp, W. Robl, and F. M. Matysik, "Development and application of a multi-purpose electrodeposition cell configuration for studying plating processes on wafer specimen and for characterizing surface films by scanning electrochemical microscopy", *Journal of Applied Electrochemistry*, pp. 1-8, 2017.
- [11] S. Morsali, S. Daryadel, Z. Zhou, A. Behroozfar, D. Qian, and M. Minary-Jolandan, "Multi-physics simulation of metal printing at micro/nanoscale using meniscus-confined electrodeposition: Effect of environmental humidity", *Journal of Applied Physics*, vol. 121, pp. 024903-024908, 2017.
- [12] J. Hu, and M. F. Yu, "Meniscus-confined three-dimensional electrodeposition for direct writing of wire bonds", *Science*, vol. 329, no. 5989, pp. 313-316, 2010.
- [13] S. K. Seol et al., "Electrodeposition-based 3D printing of metallic microarchitectures with controlled internal structures", *Small*, vol. 11, no. 32, pp. 3896-3902, 2015.
- [14] A. Behroozfar, S. Daryadel, S. R. Morsali, S. Moreno, M. Baniyadi, R. A. Bernal, and M. Minary-Jolanda, "Microscale 3D printing of nanotwinned copper", *Advanced Materials*, vol. 30, no. 4, pp. 1705107-1705113, 2017.
- [15] P. Liu, Y. Guo, Y. Wu, J. Chen, and Y. Yang, "A low-cost electrochemical metal 3D printer based on a microfluidic system for printing mesoscale objects", *Crystals*, vol. 10, no. 4, pp. 257-273, 2020.
- [16] K. Nakazawa, M. Yoshioka, Y. Mizutani, T. Ushiki, and F. Iwata, "Local electroplating deposition for free-standing micropillars using a bias-modulated scanning ion conductance microscope", *Microsystem Technologies*, vol. 26, pp. 1-10, 2019.
- [17] G. Ercolano, C. V. Nisselroy, T. Merle, J. Voros, D. Momotenko, W. W. Koelmans, and T. Zambelli, "Additive manufacturing of sub-micron to sub-mm metal structures with hollow AFM cantilevers", *Micromachines*, vol. 11, pp. 6-20, 2020.

References

- [1] C. Korner, "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - a review", *International Materials Reviews*, vol. 61, no. 5, pp. 361-377, 2016.
- [2] P. Regenfass et al., "Principles of laser micro sintering", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 204-212, 2007.
- [3] L. Xinchao, M. Pingmei, A. Sansan, and W. Wei, "Review of additive electrochemical micro-manufacturing technology", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 173, p. 103848, 2021.
- [4] G. S. Vasiliev, D. Y. Ushchapovskiy, V. I. Vorobyova, and O. V. Linyucheva, "Modeling of electrochemical 3d printing processes", *Naukovi visti KPI*, no. 2, pp. 97-105, 2021 [in Ukrainian].
- [5] G. Vasyliiev, V. Vorobyova, D. Ushchapovskiy, and O. Linyucheva, "Local electrochemical deposition of copper from sulfate solution", *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 557-563, 2022.
- [6] S. D. Leith, and D. T. Schwartz, "High-rate through-mold electrodeposition of thick ($>200\text{ }\mu\text{m}$) NiFe MEMS components with uniform composition", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 384-392, 1999.
- [7] A. L. Cohen, U. Frodis, F. G. Tseng, G. Zhang, M. Florian, and P. M. Will, "EFAB: low-cost automated electrochemical batch fabrication of arbitrary 3D microstructures", in *Proc. Micromachining and Microfabrication Process Technology V*, vol. 3874, pp. 236-247, 1999.
- [8] J. D. Madden, S. R. Lafontaine, and I. W. Hunter, "Fabrication by electrodeposi-

- tion: building 3D structures and polymer actuators", in *Proc. IEEE Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995, pp. 77-81.
- [9] J. Xu, W. Ren, Z. Lian, P. Yu, and H. Yu, "A review: development of the maskless localized electrochemical deposition technology", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, pp. 1731-1757, 2020.
- [10] P. Hanekamp, W. Robl, and F. M. Matysik, "Development and application of a multi-purpose electrodeposition cell configuration for studying plating processes on wafer specimen and for characterizing surface films by scanning electrochemical microscopy", *Journal of Applied Electrochemistry*, pp. 1-8, 2017.
- [11] S. Morsali, S. Daryadel, Z. Zhou, A. Behroozfar, D. Qian, and M. Minary-Jolandan, "Multi-physics simulation of metal printing at micro/nanoscale using meniscus-confined electrodeposition: Effect of environmental humidity", *Journal of Applied Physics*, vol. 121, pp. 024903-024908, 2017.
- [12] J. Hu, and M. F. Yu, "Meniscus-confined three-dimensional electrodeposition for direct writing of wire bonds", *Science*, vol. 329, no. 5989, pp. 313-316, 2010.
- [13] S. K. Seol et al., "Electrodeposition-based 3D printing of metallic microarchitectures with controlled internal structures", *Small*, vol. 11, no. 32, pp. 3896-3902, 2015.
- [14] A. Behroozfar, S. Daryadel, S. R. Morsali, S. Moreno, M. Baniasadi, R. A. Bernal, and M. Minary-Jolanda, "Microscale 3D printing of nanotwinned copper", *Advanced Materials*, vol. 30, no. 4, pp. 1705107-1705113, 2017.
- [15] P. Liu, Y. Guo, Y. Wu, J. Chen, and Y. Yang, "A low-cost electrochemical metal 3D printer based on a microfluidic system for printing mesoscale objects", *Crystals*, vol. 10, no. 4, pp. 257-273, 2020.
- [16] K. Nakazawa, M. Yoshioka, Y. Mizutani, T. Ushiki, and F. Iwata, "Local electroplating deposition for free-standing micropillars using a bias-modulated scanning ion conductance microscope", *Microsystem Technologies*, vol. 26, pp. 1-10, 2019.
- [17] G. Ercolano, C. V. Nisselroy, T. Merle, J. Voros, D. Momotenko, W. W. Koelmans, and T. Zambelli, "Additive manufacturing of sub-micron to sub-mm metal structures with hollow AFM cantilevers", *Micromachines*, vol. 11, pp. 6-20, 2020.

D. Yu. Ushchapovskiy, Ph. D.,

V. I. Vorobyova, Ph. D., Associate Professor,

O. A. Plivak,

T. I. Motronyuk, Ph. D., Associate Professor,

G. S. Vasyliiev, Ph. D., Associate Professor,

e-mail: g.vasyliiev@kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

LIMITATIONS OF COPPER NITRATE ELECTROLYTE FOR FAST ELECTROCHEMICAL 3D-PRINTING

To date, technologies based on local sintering of metal powder have become widespread for forming a metal product by 3D-printing. The disadvantage of additive manufacturing technologies based on local melting is high energy consumption, as well as the need to obtain metal powder or wire before making a product from it. The electrochemical technology of additive manufacturing, which is based on the local electrochemical deposition of metal from an electrolyte, does not have such disadvantages. An investigation of local electrodeposition of metallic copper from a nitrate electrolyte was conducted in order to determine the possibility of using this electrolyte in electrochemical 3D printing technology. Deposition was carried out using a platinum insoluble anode placed in a polypropylene capillary with a diameter of 4 mm. Cylinder-shaped coatings with a height of 100 μm and 500 μm were grown at different current densities in stationary and pulsed modes. Experimentally deposited

samples were analyzed using 3D-profilometry, the surface profile was compared with the computer model and the desired coating profile. It has been established that the highest printing accuracy is achieved at a deposition current density of 20 A/dm^2 when a deposition thickness is below $100 \text{ }\mu\text{m}$. In these conditions, the highest deposition accuracy is observed - 87% of the coating is deposited within the expected borders, and only 9% - outside these borders. The deposited metal is densely packed and has a finely crystalline structure. An increase in the deposition thickness and the deposition current density and the use of a pulse mode led to a decrease in the accuracy of the deposition and the quality of the coating due to the appearance of diffusion limitations and the formation of dendrites. Thus, the nitrate electrolyte allows for high-quality local electrodeposition of copper of a small thickness (up to $100 \text{ }\mu\text{m}$) at a current density of up to 20 A/dm^2 . Further studies of electrochemical 3D printing processes should be directed to the search for an electrolyte and deposition conditions that allow metal local electrodeposition with an accuracy no worse than that obtained in this work, but for thicknesses of up to 1 mm and more.

Keywords: *local electrodeposition, deposit profile, computer modeling, profilometry, dendrites.*