

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки

Заснований у грудні 1996 р.

4/2020

Редакційна колегія:

Фауре Е. В., д.т.н., професор

(головний редактор)

Антонюк В. С., д.т.н., професор

Базіло К. В., д.т.н., доцент

Батраченко О. В., к.т.н., доцент

Бондаренко М. О., д.т.н., доцент

Бондаренко Ю. Ю., к.т.н., доцент

Вамболь В. В., д.т.н., професор

Вашенко В. А., д.т.н., професор

Вязовик В. М., д.т.н., доцент

Гальченко В. Я., д.т.н., професор

Заболотній С. В., д.т.н., доцент

Кажіс Р., д.т.н., професор (Литва)

Котов В. М., д.фіз.-мат.н., професор (Білорусь)

Лукашенко В. М., д.т.н., професор

Мусієнко М. П., д.т.н., професор

Нерода М. В., к.т.н., доцент (Білорусь)

Палагін В. В., д.т.н., професор

Петрищев О. М., д.т.н., професор

Півоваров О. А., д.т.н., професор

Прокопенко Т. О., д.т.н., професор

Ситник О. О., д.т.н., професор

Столяренко Г. С., д.т.н., професор

Уткіна Т. Ю., к.т.н., доцент

Федоров Є. Є., д.т.н., професор

Хоменко О.М., к.х.н., доцент

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський
державний технологічний університет

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

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

**АВТОМАТИЗАЦІЯ
І ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

**ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА**

**МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО,
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ
СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ
І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЧДТУ, к. 604/1, бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 51-15-89

vtn.chdtu.edu.ua (подання статей)

Сисоєнко С. В. (відповідальний секретар)
e-mail: vtn@chdtu.edu.ua

4•2020

ВІСНИК

Черкаського державного
технологічного університету

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu

TECHNICAL SCIENCE

4 • 2020

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),
Eurazian Scientific Journal Index (ESJI),
ResearchBib – Academic Resource Index,
Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat,
Наукова періодика України,
Open Ukrainian Citation Index

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

ISSN 2306-4412 (Print),
ISSN 2306-4455 (CD-ROM),
ISSN 2708-6070 (Online)

Затверджено вченою радою
Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 5 від 21.12.2020 р.

При повному або частковому
передрукуванні матеріалів
посилання на «Вісник Черкаського
державного технологічного
університету» є обов'язковим.

© Черкаський державний
технологічний університет, 2020
© Автори, 2020

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ І ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<i>Bazilo C. V., Khlivnyi V. V., Bondarenko Yu. Yu.</i> Modification and practical application of piezoelectric transducers with separated electrodes.....	5
<i>Пильтій С. И., Булашенко А. В., Калиниченко Е. И., Булашенко А. В.</i> Высокоэффективный волноводный поляризатор для спутниковых информационных систем	14

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Триус Ю. В., Заспа Г. О., Кожем'якін О. С., Аширова А. В.</i> Інформаційно-аналітична система підтримки освітньої діяльності структурних підрозділів закладів вищої освіти	27
<i>Пташкін Р. Л., Гожий О. О., Обруч Ю. Ю., Павлов В. В., Калініченко Р. А.</i> Аналіз оперативної пам'яті як один із методів проведення комп'ютерно-технічних криміналістичних досліджень.....	39
<i>Оксамитна Л. П., Свіржевський О. В.</i> Проектування та створення веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют.....	48
<i>Баландіна Н. М., Василенко М. Д., Слатвінська В. М., Сисоєнко С. В.</i> Підхід до моделювання поведінкових проявів у соціальному інжинірингу в інтересах захисту інформації.....	57
<i>Фауре Е. В., Швидкий В. В., Щерба А. І., Харін О. О., Ступка Б. А.</i> Метод циклової синхронізації на основі перестановок	67
<i>Прокопенко Т. О., Можсаєв М. О., Рудницький С. В., Рудницька Ю. В.</i> Програмування режиму ненавантаженого резервування у комп'ютерних системах критичного застосування.....	77
<i>Смірнова Т. В., Минайленко Р. М., Доренський О. П., Сисоєнко С. В., Смірнов С. А.</i> Хмарна автоматизована система інтелектуальної підтримки прийняття рішень для технологічних процесів.....	84
<i>Васильченков О. Г., Евсина Н. А., Сальников Д. В., Буслов П. В.</i> Реализация фильтра с постфильтрационным принятием решения на микропроцессорных архитектурах с векторным расширением для обеспечения показателей эффективности судебной экспертизы.....	93
<i>Усік П. С., Смірнов О. А., Миронець І. В., Буравченко К. О., Якименко Н. М.</i> Метод підвищення ефективності розподіленої обробки даних у комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку	103

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

<i>Починок В. В., Вязовик В. М.</i> Математична модель дифузійних процесів під час електроннокаталітичної переробки CO ₂ в органічні сполуки	111
---	-----

Мислюк О. О., Хоменко О. М., Єгорова О. В. Сучасні природні й антропогенні загрози екологічному благополуччю прісноводних екосистем..... 120

Мотрічук Р. Б., Кириченко О. В., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Кириченко Є. П., Цибулін В. В. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей 131

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Стеблянюк П. О., Дьомічев К. Е., Петров О. Д. Моделювання поведінки стрижня з трилінійного двофазного матеріалу з урахуванням температури 143

Билоник И. М., Береговенко Н. Н., Капустян А. Е., Шумилов А. А., Билоник Д. И., Губарь Е. Я. Применение электрошлаковой наплавки для изготовления молотков ударного механизма встряхивания осадительных электродов электрофильтров 152

Різник О. О., Єфіменко Н. А. Метод експертної оцінки контролю якості продукції на підприємствах машинобудівної галузі 162

UDC 534.133

[0000-0002-1571-401X] **C. V. Bazilo**, *Dr.Sc. (Eng.), associate professor*,

[0000-0001-9806-3453] **V. V. Khlivnyi**,

[0000-0002-5179-8329] **Yu. Yu. Bondarenko**, *Ph.D. (Eng.), associate professor*

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MODIFICATION AND PRACTICAL APPLICATION OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS WITH SEPARATED ELECTRODES

The paper presents the results of improving the technology of forming current-conducting electrodes of piezoelectric elements and the development of devices from piezoelectric ceramics with separated electrodes by a method based on the technology of combined electron-beam modification. The prospect of using the method of thermal vacuum deposition for obtaining electrode coatings on products made of piezoelectric ceramics of the PZT grade is shown. It has been found that silver coatings formed by the proposed technology on piezoelectric elements are more uniform and homogeneous in comparison with the coatings obtained by the traditional (industrial) method. As a practical result of the implementation of the technology proposed in the article, designs of piezoelectronic devices based on elements made of piezoelectric ceramics with separated electrodes formed on their surface, in particular, a multisectional piezoelectric transducer, have been developed. Changing the size of the electrodes, their relative position allows to influence the parameters of the output signals and opens wide opportunities for the design of piezoelectric transducers of computer systems for critical applications. The main advantage of using transducers made from piezoceramic materials in computer systems is due to their special structure, which allows to implement fundamentally different schemes in one such element.

Keywords: piezoelectric transducer, piezoelectric ceramics, conductive electrode, separated electrodes, combined electron-beam modification technology.

Introduction. Currently, the leading manufacturers of radio-electronic components serially produce a fairly large list of elements that include various microelectromechanical structures. The main advantage of using elements made of piezoceramic materials in measuring devices is due to their special structure, which makes it possible to implement fundamentally different schemes in one such element, for example, for simultaneous measurement of temperature, pressure and humidity. The main indicators of the quality of a piezoelectric product that affect the smooth operation and reliability of their operation is the observance of the required level of microroughness of the surfaces of piezoelectric elements and the absence of microdefects on them [1].

For elements made of piezoelectric ceramics of the PZT grade, there are also questions of increasing the mechanical strength of silver (less often – nickel) electrodes, which, according to traditional technology, are chemically applied to the ceramic surface and have insignificant wear

resistance and adhesive strength (no more than 8 MPa) [2].

Technological features of the manufacture of piezoceramics are described in sufficient detail in the monograph [3]. It should be noted that the technology for the manufacture of piezoelectric ceramics is quite complex and can be applied only at enterprises that have specialized equipment for the production and processing of piezoelectric ceramics (today, according to the review, there are no such enterprises in Ukraine). However, the technology of forming conductive electrodes and further polarization of the samples is subject to improvement in this work.

Promising and relevant in this direction of research is the improvement of the technology of forming current conductive electrodes of elements from piezoelectric ceramics, which will increase their wear resistance and adhesive strength without reducing the value of surface microroughness and the period of reliable operation of samples of these ceramics.

Therefore, *the purpose of this work* is to improve the technology of forming current conductive electrodes of piezoelectric elements and to develop devices with piezoelectric ceramics with separated electrodes.

Methods and materials. In [2], [4] it was shown that thermal deposition in vacuum can produce high-quality uniform coatings on the surfaces of piezoceramic elements.

With the participation of the authors, a combined method of deposition of metal coatings on the surface of dielectric materials with its subsequent low-energy electron-beam modification has been developed. The essence of this method is thermal (resistive or electron-beam) deposition of the coating material (for example, Ag) in vacuum $(5-6) \times 10^{-3}$ Pa on a specially prepared piezoceramic surface [5] and subsequent action by electron flow of fixed power onto the surface of a piezoelectric material in one technological cycle. This action leads to heating and compaction of the coating material with a simultaneous increase in the depth of its diffusion penetration into the material of the piezoelectric element [6].

A feature of this combined method is its implementation in one technological cycle "thermal vacuum deposition – electron-beam modification of the coating" under constant conditions of the working environment (vacuum $p = (5-7) \cdot 10^{-5}$ Pa), which excludes the formation of chemical compounds of the deposited coating with elements of the environment at the intermediate stage of the formation of the nanostructure [7].

The procedure for conducting a technological experiment is performed in the following sequence [7]:

- cleaning the glass surface from possible organic and inorganic contamination;
- preparation of the electron beam equipment for operation;
- resistive deposition of an electrode material on a sample surface in a vacuum;
- electron beam modification (EBM) of the obtained coating;
- finishing operations [8].

The technology for obtaining modified electrodes on piezoceramic elements is based on a combined process of thermal vacuum deposi-

tion of a thin (80 ... 120 μm thick) silver coating on the piezoelectric ceramics of the PZT grade.

An industrial vacuum installation YBH-71П3 was used as the base for the experimental electron-beam installation (EBI), which was expanded with additional equipment, namely:

- under-cap technological equipment;
- Pierce electron gun with a wire tungsten cathode;
- thermal furnace for preheating material in vacuum;
- mechanism for fastening and moving products to the processing area.

General view and diagram of the EBI are shown in Fig. 1.

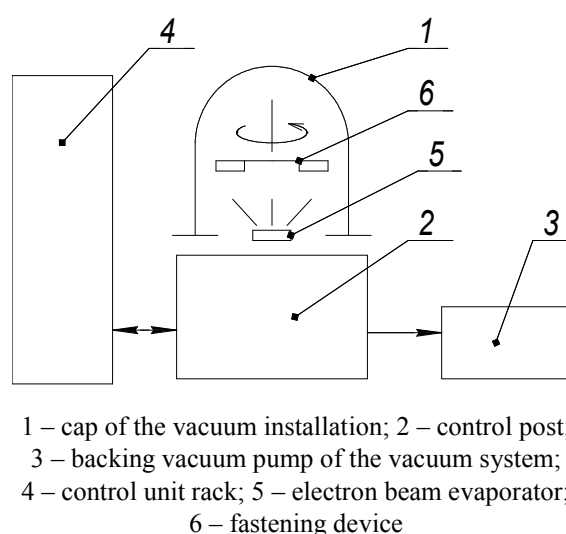


Figure 1 – Structural diagram of a vacuum installation YBH-71П3

The production of silver coatings for the electrodes of the elements of piezoelectric ceramics by the method of combined EBM in one technological cycle with the polarization of these elements (Fig. 2) made it possible to propose a qualitatively new technology for the manufacture of elements from piezoelectric ceramics.

It should also be taken into account that long-term operation of such piezoelements, which had a high number of microdefects before electron-beam recovery, simultaneously leads to a sharp decrease in the resonance peak from 580 mV to 220 mV (2.6 times) in the amplitude-frequency characteristics of these elements (Fig. 3) [9].

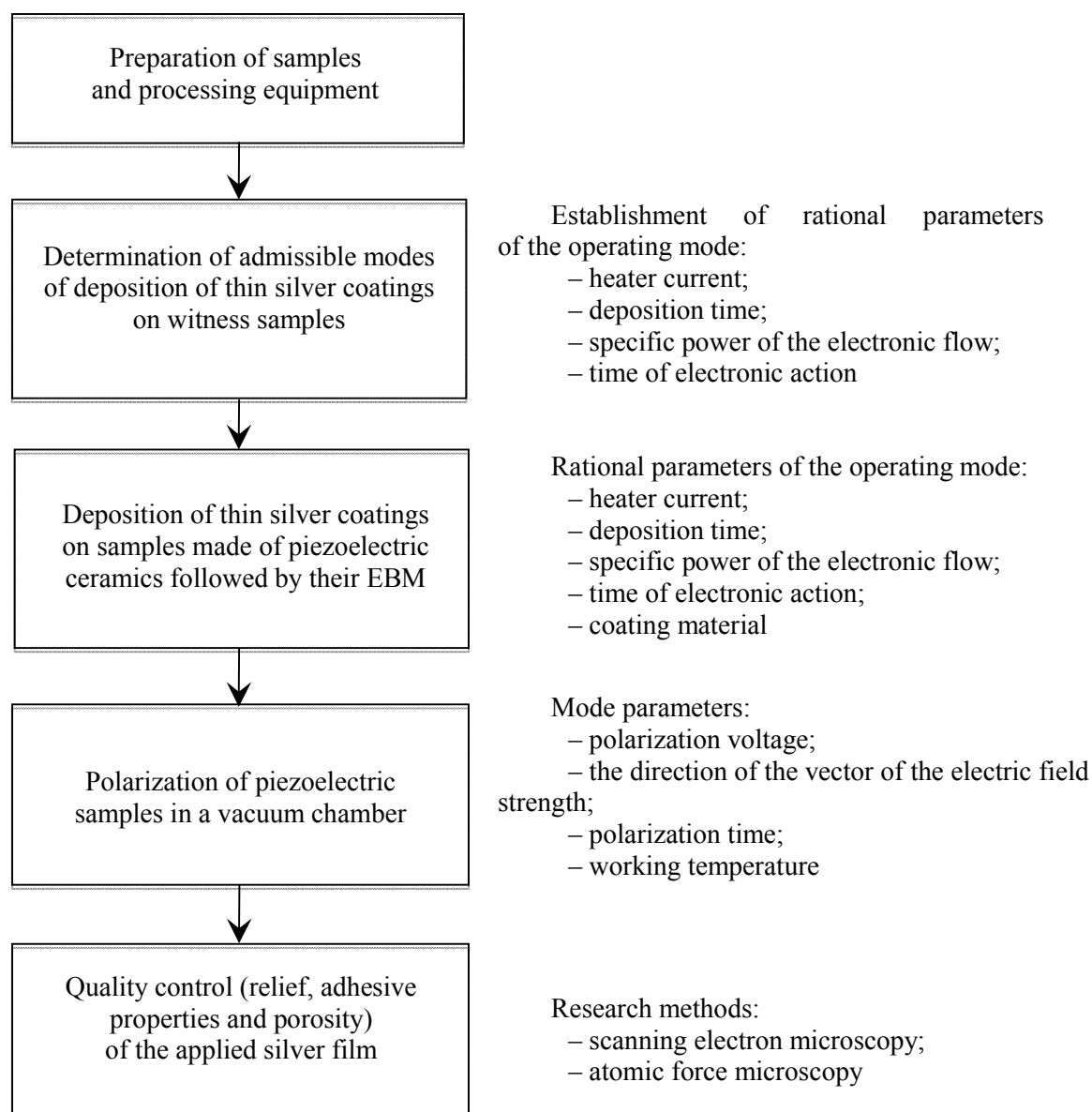


Figure 2 – The sequence of obtaining a silver coating by a combined electron-beam method on piezoelectric ceramics of PZT in one technological cycle

Compared to traditional (industrial) methods of manufacturing such elements, the combined EPM method has 1.5-2.3 times higher adhesive strength, 1.2-1.8 times higher wear resistance, 3.5-4.2 times less surface microroughness and less than 1.3-1.5 times porosity. This leads to an increase in the time of reliable operation of these elements by 1.6-2.0 times, the quality factor – by 3.5-5 times, the electromechanical coefficient – by 2.2-2.6 times [6].

Until recently, the scientific and technical basis for the design and improvement of piezoceramic transducers was mainly limited only by changing the shape, size and material of the piezoelectric element, as well as the type of excited

vibrations. Existing approaches to increasing the efficiency of piezoelectric transducers, in particular, expanding the operating range, increasing the sensitivity and level of the output signal of piezoelectric transducers, require an inevitable compromise with the requirements for miniaturization of these transducers, the provision of which is especially important for critical applications [9, 10].

The main advantage of using transducers from piezoceramic materials with separated electrodes in computer systems (a method for modifying the formation of conductive electrodes) is due to their special structure. This makes it possible to implement fundamentally different cir-

cuits in one such element, while the degree of integration is determined by the number of functional elements combined in one unit [11].

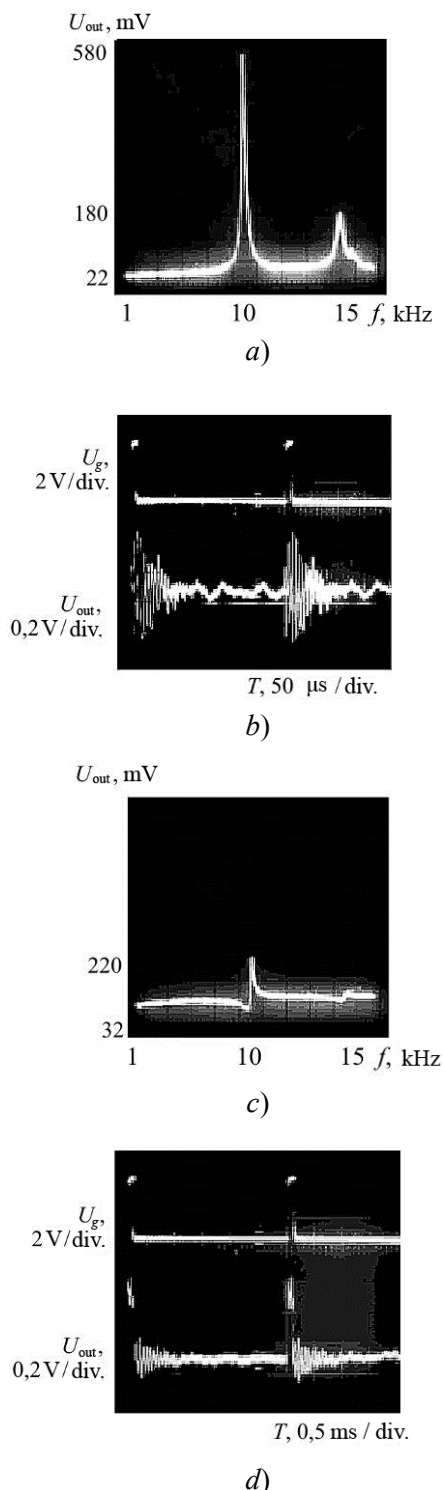


Figure 3 – Amplitude-frequency (a, c), pulse (b, d) characteristics of piezoelectric transducer (PZT, diameter 10 mm, thickness 0.3 mm) at the beginning and after 12 years of operation, respectively

The analysis of a significant number of possible connection schemes for disk piezoelectric transformers shows that they can all be reduced to four main types (Fig. 4) [12].

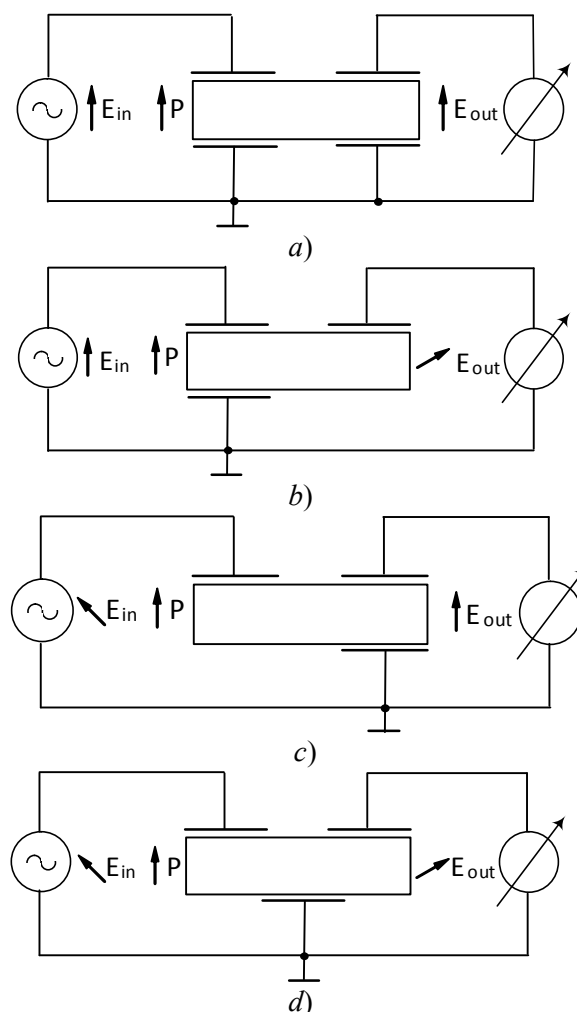


Figure 4 – Piezoelectric transformer designs

1. Traditional connection diagram. In this case, the angle α between the polarization vector P and the electric field vector of the excitation voltage E_{in} (generator voltage) is equal to zero. Similarly, the angle β between the polarization vector P and the vector of the electric field of the output voltage E_{out} is equal to zero.

2. The input section of the piezoelectric transformer is built according to the traditional scheme ($\alpha = 0$), and for the output section the angle $\beta \leq 90^\circ$.

3. The input section of the piezoelectric transformer is constructed in such a way that $0 < \alpha \leq 90^\circ$, and the output section is built according to the traditional scheme $\beta = 0$.

4. Connection diagram at which the angles between the polarization vector and the electric field vectors are $0 < \alpha \leq 90^\circ$ and $0 < \beta \leq 90^\circ$.

Experiments. Let's consider further a multisectional piezoelectric transducer [12]. As is known, a piezoelectric transformer is a converter of electrical voltage of one level into electrical voltage of another level. The piezoelectric transducer is made of PZT-4 piezoceramics with a diameter of 30 and a thickness of 0.8 mm. The transducer has five electrodes located on the end surfaces of the piezoelectric element, and the top electrodes are projections of the bottom ones [13].

For a piezoceramic transducer, one should take into account not only the location of the electric field vector of the output signal, but also the electric field vector of the input signal (generator) [14, 15].

In this case, if piezoelectric elements of small thickness are used, the angle between the vectors of the electric field $\mathbf{E}$ and polarization $\mathbf{P}$ can be close to 90° . The piezoelectric transducer switching circuit is shown in Fig. 5, and oscillograms of signals at the inputs and outputs of the transducer are shown in Fig. 6.

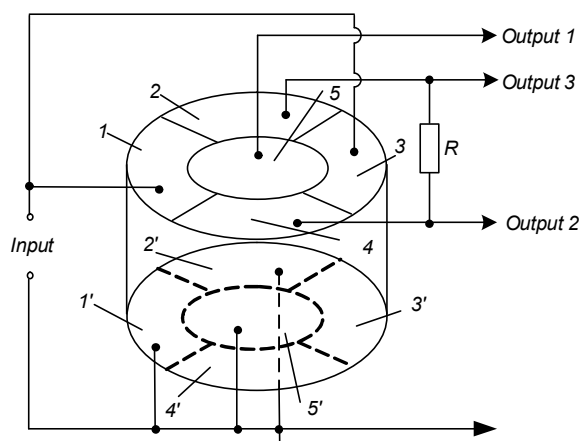
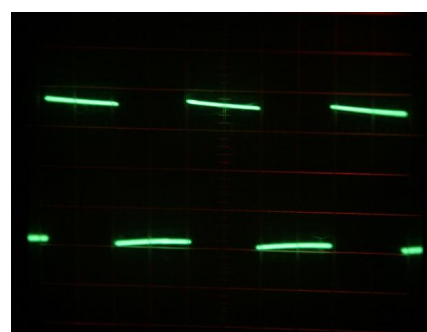


Figure 5 – Wiring diagram for electrodes of a multisectional transducer

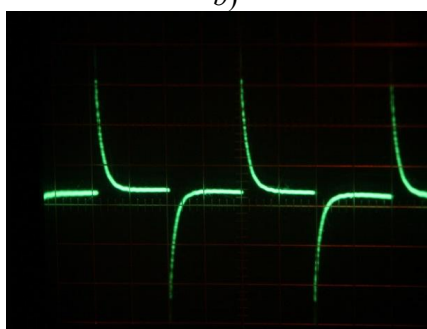
As seen from Fig. 6, depending on the connection diagram of the electrodes (that is, on the relative position of the vectors $\mathbf{F}$, $\mathbf{E}_{in}$ and $\mathbf{E}_{out}$), it is possible to obtain a signal corresponding to the oscillatory (Fig. 6, *b*), differentiating (Fig. 6, *c*) and integrating chains (Fig. 6, *d*).



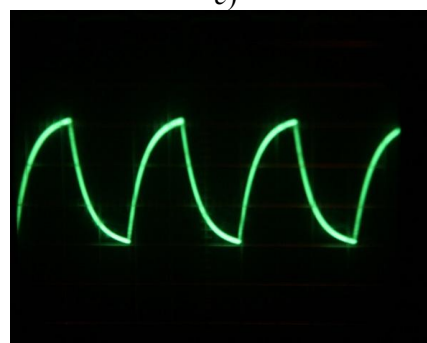
a)



b)



c)



d)

a) input signal (square wave);
b) output 1; *c)* output 2; *d)* output 3

Figure 6 – Oscillograms of signals from a piezoelectric transducer

However, the most interesting in this case is that a piezoelectric element – an elastic monolithic solid – can have these properties simultaneously [13] due to the technological capabilities of the thermal vacuum deposition. This allows to

create multifunctional piezoelectric transducers on a single basis with a high degree of integration (3-4 times more than the base element).

Results and discussions. The described version of the piezoelectric transducer, which allows processing the input signal, is, of course, not the only one. Changing the size of the electrodes, their relative position allows to influence the parameters of the output signals and opens up wide opportunities for the design of piezoelectric transducers for computer systems of critical application.

For example, based on bimorph piezoelectric elements with separated electrodes, sound pressure sensors can be built [12]. One of the possible sensor designs is shown in Fig. 7.

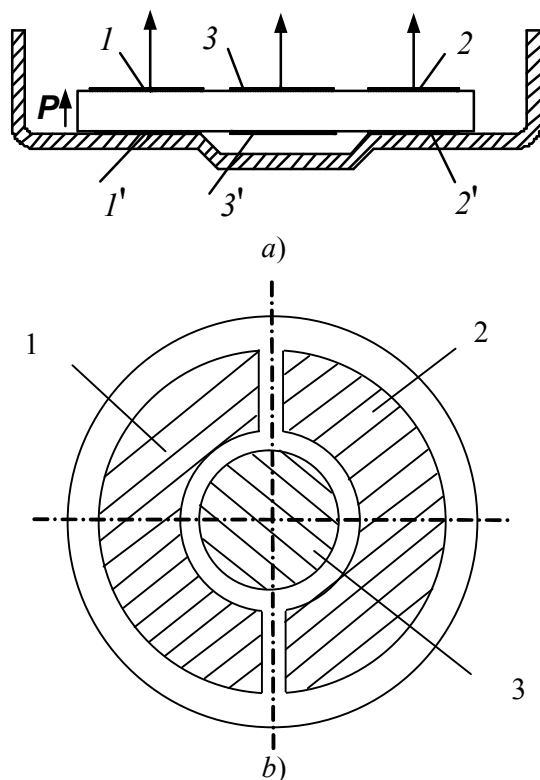


Figure 7 – Pressure sensor design

The sensor consists of a piezoelectric element 30 mm in diameter and 0.8 mm thick. The piezoelectric element is glued to a metal plate (brass) 0.3 mm thick. The sensor has 3 electrode systems – 1-1', 2-2' and 3-3'. Electrodes 1' and 2' are connected to each other through a metal plate.

The sensor was installed in a vibroacoustic chamber (Fig. 8), where it was exposed to a sound pressure of 10 Pa (114 dB) at a frequency of 200 Hz.



Figure 8 – Experimental stand with vibroacoustic chamber

The results of measuring the output voltage of a pressure sensor based on a piezoelectric element with separated electrodes are given in Table 1.

Table 1 – The value of the output voltage of the pressure sensor based on a piezoelectric element with separated electrodes

Electrodes	1-1'	2-2'	3-3'	3-1'	1-3'	2-3'
Voltage sensitivity, mV / Pa	2,6	2,7	2,0	1,3	4,0	4,2
Capacitance between electrodes, nF	4,08	3,93	1,36	0,34	0,31	0,32

As can be seen from Table 1, depending on the connection scheme of the electrodes to the measuring instrument, the sensitivity of the sensor can vary almost three times. Moreover, an increase in sensitivity is achieved for the case when the angle between the electric field vector of the output signal and the polarization vector is close to 90° . At the same time, in this case, the capacitance between these electrodes decreases [12].

Conclusions. The prospect of using the method of thermal vacuum deposition in obtaining electrode coatings on products made of piezoelectric ceramics of the PZT grade is shown.

It has been established that the silver coatings formed on piezoelectric elements by the proposed technology are more uniform and homogeneous in comparison with the coatings obtained by the traditional industrial method.

On the basis of a piezoelectric element – an elastic monolithic solid – it is simultaneously possible to create multifunctional piezoelectric transducers with a high degree of integration due to the technological capabilities of the thermal vacuum deposition method.

Designs of piezoelectronic devices based on piezoelectric elements with separated electrodes have been developed. In particular, the use of a structure with separated electrodes made it possible to increase the sensitivity of the pressure sensor by 1.5-2 times.

References

- [1] "DIN ISO 2859-1-2014. Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection (ISO 2859-1:1999 + Cor. 1:2001 + Amd.1:2011); Text in German and English; 01.08.2014".
- [2] V. M. Sharapov, A. M. Gurzhiy, M. O. Bondarenko, and Yu. Yu. Bondarenko, "Study of the characteristics of current conductive piezoceramic elements", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, pp. 255-257, 2007 [in Russian].
- [3] R. G. Dzhagupov, and A. A. Erofeev, *Piezoelectronic devices for computing technology, monitoring and control systems*. St. Petersburg, Politehnika, 1994 [in Russian].
- [4] M. A. Bondarenko, et. al., "Formation of ordered nanostructures on piezoelectric ceramics of the PZT system by thermal deposition in vacuum", in *Effektivnost' realizatsii nauchnogo, resursnogo i promyshlennogo potentsiala v sovremennyh usloviyah*, Slavske of Lviv Region, 2010, pp. 159-160 [in Russian].
- [5] M. O. Bondarenko, "Investigation of the influence of low-energy electron beam on the microgeometry of the surfaces of piezoceramic elements", *Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta*, no. 2 (32), pp. 149-153, 2009 [in Ukrainian].
- [6] V. V. Medianyuk, Yu. Yu. Bondarenko, C. V. Bazilo, and M. O. Bondarenko, "Research of current-conducting electrodes of elements from piezoelectric ceramics modified by the low-energy ribbon-shaped electron stream", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 6, pp. 06012-1-06012-6, 2018.
- [7] V. S. Antoniuk, G. S. Tymchyk, Yu. Yu. Bondarenko, Yu. I. Kovalenko, M. O. Bondarenko, and R. P. Gaidash, *Coatings in instrumentation*. Kyiv, NTUU "KPI", 2016 [in Ukrainian].
- [8] V. A. Vashchenko, M. O. Bondarenko, G. V. Kanashevich, et. al., "Technological foundations of obtaining ordered nanostructures on the surfaces of probes for atomic force microscopy", Cherkasy, research report, 2012 [in Ukrainian].
- [9] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. Springer, 2011.
- [10] V. Sharapov, Z. Sotula, and L. Kunickaya, *Piezo-Electric Electro-Acoustic Transducers*. Springer, 2014.
- [11] V. D. Vavilov, S. P. Timoshenkov, and A. S. Timoshenkov, *Microsystem sensors of physical quantities*. Moscow, Tekhnosfera, 2018 [in Russian].
- [12] V. M. Sharapov, I. G. Minaev, Zh. V. Sotula, K. V. Bazilo, and L. G. Kunitskaya, *Piezoceramic transformers and sensors*. Cherkasy, Vertikal', 2010 [in Russian].
- [13] V. Sharapov, A. Vladišauskas, K. Bazilo, L. Kunitskaya, and Zh. Sotula, "Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement", *Ultrasound*, Kaunas, Lithuania, no. 4, pp. 44-50, 2009.
- [14] V. M. Sharapov, O. N. Petrishchev, K. V. Bazilo, Zh. V. Sotula, and A. I. Mashtapa, "Classification of piezoelectric transformers", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 58-61, 2014 [in Russian].
- [15] K. V. Bazilo, "Piezoelectric transformer", *Ukr. patent for a utility model*, no. 92334, Aug. 11, 2014 [in Ukrainian].

Список використаних джерел

- [1] "DIN ISO 2859-1-2014. Sampling procedures for inspection by attributes – Part 1: Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot-by-lot inspection (ISO 2859-1:1999 + Cor. 1:2001 + Amd.1:2011); Text in German and English; 01.08.2014."
- [2] В. М. Шарапов, А. М. Гуржій, М. О. Бондаренко, и Ю. Ю. Бондаренко, "Исследование характеристик токопроводящих

- электропроводных пьезокерамических элементов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету, спец-випуск*, с. 255-257, 2007.
- [3] Р. Г. Джагулов и А. А. Ерофеев, *Пьезо-электронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: справочник*. Санкт-Петербург: Политехника, 1994.
- [4] М. А. Бондаренко и др., "Формирование упорядоченных наноструктур на пьезоэлектрической керамике системы ЦТС термическим осаждением в вакууме", в *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях*, с. Славское Львовской обл., 2010, с. 159-160.
- [5] М. О. Бондаренко, "Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів", *Труди Одеського політехнічного університету: науч. и произв.-практ. сб. по техн. и ест. наук*, № 2 (32), с. 149-153, 2009.
- [6] V. V. Medanyk, Yu. Yu. Bondarenko, C. V. Bazilo, and M. O. Bondarenko, "Research of current-conducting electrodes of elements from piezoelectric ceramics modified by the low-energy ribbon-shaped electron stream", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 6, pp. 06012-1-06012-6, 2018.
- [7] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, і Р. П. Гайдаш, *Покриття у приладобудуванні*. Київ: НТТУ "КПІ", 2016.
- [8] В. А. Ващенко, М. О. Бондаренко, Г. В. Канашевич, та ін., "Технологічні основи отримання впорядкованих наноструктур на поверхнях зондів для атомно-силової мікроскопії", Черкаси, звіт про науково-дослідну роботу, 2012.
- [9] V. Sharapov, *Piezoceramic Sensors*. Springer, 2011.
- [10] V. Sharapov, Z. Sotula, and L. Kunickaya, *Piezo-Electric Electro-Acoustic Transducers*. Springer, 2014.
- [11] В. Д. Вавилов, С. П. Тимошенко, и А. С. Тимошенко, *Микросистемные датчики физических величин: монография в двух частях*. Москва: Техносфера, 2018.
- [12] В. М. Шарапов, И. Г. Минаев, Ж. В. Сотула, К. В. Базило, и Л. Г. Куницкая, *Пьезокерамические трансформаторы и датчики*. Черкасы: Вертикаль, 2010.
- [13] V. Sharapov, A. Vladišauskas, K. Bazilo, L. Kunitskaya, and Zh. Sotula, "Methods of synthesis of piezoceramic transducers: spatial energy force structure of piezoelement", *Ultrasound*, Kaunas, Lithuania, no. 4, pp. 44-50, 2009.
- [14] В. М. Шарапов, О. Н. Петрищев, К. В. Базило, Ж. В. Сотула, и А. И. Маштапа, "Классификация пьезоэлектрических трансформаторов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 58-61, 2014.
- [15] К. В. Базило, "П'єзоелектричний трансформатор", *Патент України на корисну модель № 92334*, Серп. 11, 2014.

К. В. Базило, д.т.н., доцент,

В. В. Хлівний,

Ю. Ю. Бондаренко, к.т.н., доцент

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

МОДИФІКАЦІЯ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З РОЗДІЛЕНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

В роботі наводяться результати удосконалення технології формування струмопроводних електродів п'єзоелектричних елементів та розробка пристроїв з п'єзоелектричної кераміки з розділеними електродами методом, що базується на технології комбінованої електронно-променевої модифікації. Показано перспективу використання методу термовакuumного напилення при отриманні покриттів електродів на виробках з п'єзоелектричної кераміки сорту ЦТС. Особливістю такого комбінованого методу є здійснення його в одному технологічному циклі «термовакuumне осадження – електронно-

променева модифікація покриття» за незмінних умов робочого середовища, що виключає утворення хімічних сполук в осаджуваному покритті на проміжному етапі формування наноструктурних утворень. Встановлено, що утворені за запропонованою технологією срібні покриття на п'єзоелектричних елементах є більш рівномірними та однорідними порівняно з покриттями, отриманими у традиційний (промисловий) спосіб. Як практичний результат реалізації запропонованої в статті технології розроблено конструкції пристроїв п'єзоелектроніки на основі елементів із п'єзоелектричної кераміки зі сформованими на їх поверхні розділеними електродами, зокрема багатосекційного п'єзоелектричного перетворювача. Найбільш цікавим у цьому випадку є те, що п'єзоелемент (пружне монолітне тверде тіло) може одночасно мати різні властивості внаслідок технологічних можливостей методу термовакуумного напилення. Зміна розмірів електродів, їх взаємне розташування дають змогу впливати на параметри вихідних сигналів і відкривають широкі можливості для створення п'єзоелектричних перетворювачів для комп'ютерних систем критичного застосування. Основна перевага використання перетворювачів з п'єзокерамічних матеріалів у комп'ютерних системах пов'язана з їх особливою конструкцією, що дає можливість реалізувати принципово різні схеми в одному такому елементі.

Ключові слова: п'єзоелектричний перетворювач, п'єзоелектрична кераміка, струмопровідний електрод, розділені електроди, технологія комбінованої електронно-променевої модифікації.

[0000-0002-6927-8663] **С. И. Пильтай**¹, к.т.н., доцент,

e-mail: s.piltai@kpi.ua

[0000-0002-4987-4978] **А. В. Булашенко**¹, ст. преподаватель,

e-mail: a.bulashenko@kpi.ua

[0000-0001-9085-1201] **Е. И. Калиниченко**¹, студентка,

e-mail: kaliza@ukr.net

[0000-0002-56486658] **А. В. Булашенко**², студент

e-mail: alex.bulashenko2020@gmail.com

¹ Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина

² Шосткинский профессиональный колледж имени Ивана Кожедуба
Сумского государственного университета
ул. Институтская, 1, г. Шостка, Сумская обл., 41100, Украина

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ ПОЛЯРИЗАТОР ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Статья содержит результаты анализа и оптимизации нового волноводного поляризатора для спутниковых информационных систем. Конструкция разработанного поляризатора состоит из волновода квадратного сечения с четырьмя диафрагмами. Была выполнена оптимизация поляризатора для его применения в рабочем диапазоне частот от 10,7 ГГц до 12,8 ГГц. Разработанный волноводный поляризатор обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 3,5^\circ$, коэффициент стоячей волны по напряжению менее 1,24, коэффициент эллиптичности менее 0,53 дБ, кроссполяризационную развязку выше 30,3 дБ. Таким образом, созданный новый поляризатор на основе квадратного волновода с четырьмя диафрагмами обеспечивает качественную работу во всем рабочем Ки-диапазоне частот 10,7–12,8 ГГц.

Ключевые слова: поляризатор, волноводный поляризатор, диафрагма, волновод, дифференциальный фазовый сдвиг, коэффициент эллиптичности, кроссполяризационная развязка.

Введение. На сегодняшний день увеличение информационной емкости каналов связи и повышение их энергетической эффективности являются важными задачами современных исследователей. В развивающихся системах связи 5G с этой целью применяются технологии прямого соединения D2D, технологии M2M, технологии OFDM [1-5]. В спутниковых информационных системах и радарх для повторного использования частотного ресурса применяют поляризационную обработку сигналов [6].

Частотные ресурсы спутниковых, наземных и других систем связи дороги и ограничены. Наиболее эффективным методом повторного использования одной и той же полосы частот в современных информационных системах является применение сигналов и антенн с двумя ортогональными линейными или круговыми поляризациями. В этом случае информационная емкость беспроводного канала увеличивается вдвое.

Тип поляризации электромагнитной волны оказывает важное влияние на особенности процесса ее распространения в беспроводном канале связи [6]. Применение сигналов с круговой поляризацией снижает эффект замирания и деструктивные помехи сигналов, вызванные многолучевым распространением. Сигналы, которые отражаются от поверхности Земли или от других объектов, изменяют свою поляризацию на ортогональную для каждого отражения. Например, нечетно отраженная электромагнитная волна с левой круговой поляризацией трансформируется в волну с правой круговой поляризацией, и наоборот. Приемная антенна, предназначенная для приема, обработки и передачи на фидер сигналов с кополяризацией (например, с левой круговой поляризацией), будет отражать сигналы с кроссполяризацией (с правой круговой поляризацией), которые отразились от Земли, или некоторые другие объекты. Следовательно, уровень искажающих сигналов с нечетным

числом отражений в приемной антенне будет пренебрежимо малым. Таким образом, применение сигналов с ортогональной круговой поляризацией значительно улучшает характеристики беспроводных информационных систем, работающих в условиях многолучевого распространения электромагнитных волн.

Еще одним преимуществом применения сигналов с круговой поляризацией является отсутствие необходимости в точной угловой ориентации между передающей и приемной антеннами для установления процесса связи [6]. Указанная особенность отличает круговую поляризацию от линейной, при которой возможны большие потери сигнала из-за несовпадения ориентации плоскостей поляризации передающей и приемной антенн. Это преимущество сигналов с круговой поляризацией важно для мобильных спутниковых телекоммуникационных систем, где трудно обеспечить фиксированную ориентацию одной антенны относительно другой, а также для связи со спутниками, вращающимися вокруг направления линии связи. В случае применения сигналов с круговой поляризацией уровень принимаемого сигнала остается постоянным независимо от угловой ориентации антенн.

Третьим преимуществом сигналов с круговой поляризацией является их нечувствительность к влиянию вращения плоскости поляризации линейно поляризованных электромагнитных волн, которая вызвана эффектом Фарадея в ионосфере [6]. Кроме того, эффект Фарадея может возникать при распространении электромагнитных волн в областях атмосферы с большим количеством воды, особенно в дождливых условиях [6]. Эффект Фарадея может вызвать значительные потери, если сигнал передается электромагнитными волнами с линейной поляризацией. В ионосфере электромагнитные волны с таким типом поляризации совершают случайные повороты плоскости поляризации, вызванные изменениями условий в ионосфере. Угол поворота плоскости поляризации зависит от толщины и температуры ионосферы, а также от частоты электромагнитной волны [6]. Угол поворота больше на более низких частотах. Следовательно, угол наклона плоскости поляризации входной электромагнитной волны должен контролироваться приемной антенной системы связи. При рас-

пространении в ионосфере электромагнитной волны с круговой поляризацией происходит одновременное вращение обеих ее ортогональных линейно поляризованных компонент. Следовательно, циркулярно поляризованная электромагнитная волна, являющаяся суперпозицией упомянутых компонентов, сохраняет свою поляризацию после распространения через ионосферу. Из-за этой особенности сигналы с круговой поляризацией широко используются в тех системах связи, в которых электромагнитные волны распространяются через ионосферу. Типичными примерами таких систем являются спутниковая телеметрия, системы связи с космическими зондами и баллистическими ракетами.

Применение сигналов с круговой поляризацией увеличивает эффективность радиолокационных систем [6]. Довольно сложно создать поглощающие материалы, которые не отражали бы электромагнитные волны с круговой поляризацией. Рассмотрим РЛС с антенной, работающей на линейной поляризации. В этом случае линейные или близкие к ним цели, вращающиеся в поперечной плоскости, создают синусоидальную зависимость принимаемого антенной сигнала от угла поворота. Вблизи нулей этой зависимости радар, работающий с линейно поляризованными сигналами, не обнаружит никаких целей. Напротив, радары с циркулярно поляризованными сигналами лишены этого недостатка, так как вращение вектора электрического поля в пространстве и времени позволяет обнаруживать линейные цели независимо от их ориентации. Кроме того, радары с круговой поляризацией более эффективны для радиолокации в дождливых условиях, поскольку помехи, создаваемые отражением электромагнитных волн с круговой поляризацией от водяных капель, ниже, чем в случае отражения волн с линейной поляризацией [6].

Все упомянутые преимущества объясняют, почему антенны и сигналы с круговой поляризацией широко применяются в современных беспроводных, радиолокационных и спутниковых системах различного назначения. Поэтому разработка и оптимизация характеристик новых волноводных поляризаторов для фидеров спутниковых антенн являются важной инженерной задачей, которая решается в данной статье.

Целью исследования является разработка нового волноводного поляризатора с диафрагмами и оптимизация его электромагнитных характеристик для спутникового диапазона частот 10,7–12,8 ГГц.

Анализ последних исследований. Волноводный поляризатор является ключевым элементом гофрированных рупорных систем питания, которые работают на круговых поляризациях. Поляризатор – это микроволновое устройство, которое выполняет преобразование электромагнитных волн с линейной поляризацией в круговую поляризацию или наоборот. Следовательно, поляризатор антенной системы определяет ее дифференциальный фазовый сдвиг, коэффициент эллиптичности и кроссполяризационную развязку (КПР).

Одним из наиболее часто используемых типов волноводных поляризаторов является поляризатор с перегородкой [7-9]. Основным преимуществом поляризатора с перегородкой является его компактная конструкция, которая объединяет ортомодовый преобразователь и сам поляризатор в единую структуру. Недостатком поляризатора с перегородкой, ограничивающим его применение в некоторых современных системах спутниковой связи, является узкая рабочая полоса частот. В [7] было продемонстрировано, что относительная ширина полосы поляризатора с перегородками может достигать только 20%, если в системе антенного питания одновременно требуются изоляция более 25 дБ и КПР более 30 дБ.

Поляризатор с диафрагмами [10-20] представляет собой альтернативную конструкцию волноводного поляризатора, которая обеспечивает лучшие характеристики и более широкую относительную полосу пропускания. С одной стороны, в антенных системах с двойной поляризацией волноводный поляризатор с диафрагмами функционирует только в сочетании с ортомодовым преобразователем [10], что усложняет структуру питания. С другой стороны, при использовании волноводного поляризатора с диафрагмами можно получить гораздо лучшие характеристики в той же рабочей полосе частот по сравнению с поляризатором с перегородкой. Кроме того, конструкция поляризатора с волноводной диафрагмой имеет осевую симмет-

рию С2 и две зеркальные плоскости симметрии, что снижает возможные поляризационные искажения и упрощает изготовление с использованием технологии фрезерования и ЧПУ.

Авторы статьи [15] разработали аналитический метод анализа характеристик волноводных поляризаторов с диафрагмами. С применением теории микроволновых цепей были получены волновые матрицы рассеивания и передачи для волноводного поляризатора. Основные электромагнитные характеристики поляризатора были определены через элементы общей матрицы рассеивания. Метод дает возможность аналитически исследовать эти характеристики. На основе метода был разработан поляризатор на основе прямоугольного волновода с двумя диафрагмами в диапазоне частот от 7,4 до 8,5 ГГц. Разработанный поляризатор поддерживает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 8^\circ$, коэффициент эллиптичности поляризатора является меньшим, чем 1,6 дБ, кроссполяризационная развязка меньше, чем 21,5 дБ. Разработанная модель волноводного поляризатора с диафрагмами с учетом их толщины была предложена в [16]. Предложенный поляризатор сконструирован на основе волновода с квадратным сечением и содержит две реактивные диафрагмы. Поляризатор обеспечивает такие характеристики: дифференциальный фазовый сдвиг составляет $90^\circ \pm 4.2^\circ$, коэффициент эллиптичности является меньшим, чем 2,15 дБ, кроссполяризационная развязка меньше, чем 21,7 дБ. Недостатком предложенного поляризатора является невозможность перестройки его характеристик после изготовления конструкции. Предложенные конструкции поляризаторов обеспечивают плохой уровень чистоты круговой поляризации и недостаточный уровень кроссполяризационной развязки.

Авторы исследования [17] разработали модифицированный аналитический метод для моделирования и проектирования новых поляризаторов. Метод использовали для создания волноводного поляризатора с двумя диафрагмами в диапазоне частот от 3,4 ГГц до 4,2 ГГц. Такой поляризатор обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 3.4^\circ$, коэффициент эллиптичности является меньшим, чем 1,6 дБ, кроссполяризационная развязка меньше, чем 27,7 дБ. К недостаткам

разработанного поляризатора следует отнести большие габаритные размеры его конструкции и недостаточно хорошее согласование структуры. Конструкция поляризатора с тремя диафрагмами была предложена в [17]. Устройство обеспечивает следующие электромагнитные характеристики устройства. Дифференциальный фазовый сдвиг составляет $90^\circ \pm 4,0^\circ$, коэффициент эллиптичности является меньшим, чем 0,7 дБ, кроссполяризационная развязка меньше, чем 29,0 дБ. Недостатками разработанного поляризатора являются узкий рабочий диапазон частот, недостаточно качественный уровень согласования структуры. Научная статья [18] описывает конструкцию компактного поляризатора с четырьмя диафрагмами, которая обеспечивает следующие характеристики устройства. Дифференциальный фазовый сдвиг составляет $90^\circ \pm 4,5^\circ$, коэффициент эллиптичности является меньшим, чем 0,9 дБ, кроссполяризационная развязка меньше, чем 28,5 дБ. Характерными недостатками конструкции разработанного поляризатора являются относительно узкий диапазон частот, а также недостаточно хорошее согласование структуры. Для спутниковых телекоммуникационных систем Кудиапазона были разработаны конструкции новых волноводных поляризаторов с разным количеством диафрагм [19]. Конструкция поляризатора с пятью диафрагмами обеспечивает лучшие электромагнитные характеристики устройства. Дифференциальный фазовый сдвиг составляет $90^\circ \pm 2,6^\circ$, коэффициент эллиптичности является меньшим, чем 0,6 дБ, кроссполяризационная развязка меньше, чем 32,9 дБ. Недостатком разработанных поляризаторов является невозможность уменьшения габаритов и сложность конструкции.

Лучшая симметрия структуры и меньшие поляризационные искажения могут быть получены в волноводах с осевой симметрией. Типичными примерами волноводов с такой симметрией являются четырехреберные волноводы, на которых основаны коаксиальные и другие ортомодовые преобразователи и поляризаторы [20-31]. Главный недостаток таких волноводов – сложность изготовления. Таким образом, для разработки поляризаторов для питания спутниковых антенн была выбрана конструкция на основе прямоугольного волновода с диафрагмами.

Электромагнитные характеристики поляризаторов. Электромагнитными характеристиками поляризатора являются рабочая полоса частот, пиковый уровень коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для обеих поляризаций, дифференциальный фазовый сдвиг, коэффициент эллиптичности, кроссполяризационная развязка. В антенных фидерах с двумя ортогональными поляризациями применяется волноводный поляризатор с диафрагмами в сочетании с ортомодовым преобразователем, который определяет изоляцию всей антенной фидерной системы [22]. Все остальные поляризационные параметры системы питания точно определяются применяемым волноводным поляризатором.

Обычно волноводный поляризатор обеспечивает хорошее согласование электромагнитных волн обеих поляризаций. Амплитуды компонент поля с ортогональными линейными поляризациями на входе и выходе поляризатора равны с высокой точностью. В этом случае равенство амплитуд компонент для обеих поляризаций на входе приводит к их равенству на выходе поляризатора. На самом деле соответствие несовершенное. Таким образом, для расчета основных поляризационных характеристик поляризатора необходимо учитывать не только дифференциальный фазовый сдвиг, но и разность амплитуд компонент электрического поля с ортогональными линейными поляризациями на выходе поляризатора.

Дифференциальный фазовый сдвиг определяется выражением

$$\Delta\phi = \phi_{\Sigma 21.H} - \phi_{\Sigma 21.V}, \quad (1)$$

где $\phi_{\Sigma 21.H}$ – фаза общей волновой матрицы рассеяния для модели в горизонтальной плоскости; $\phi_{\Sigma 21.V}$ – фаза общей волновой матрицы рассеяния для модели в вертикальной плоскости.

КСВН горизонтальной и вертикальной поляризации определяется формулой

$$VSWR = \frac{1+|S_{\Sigma 11}|}{1-|S_{\Sigma 11}|}, \quad (2)$$

где $S_{\Sigma 11}$ – элемент волновой матрицы рассеяния.

Структура полей в вертикальной и горизонтальной плоскостях представлена на рисунке 1.

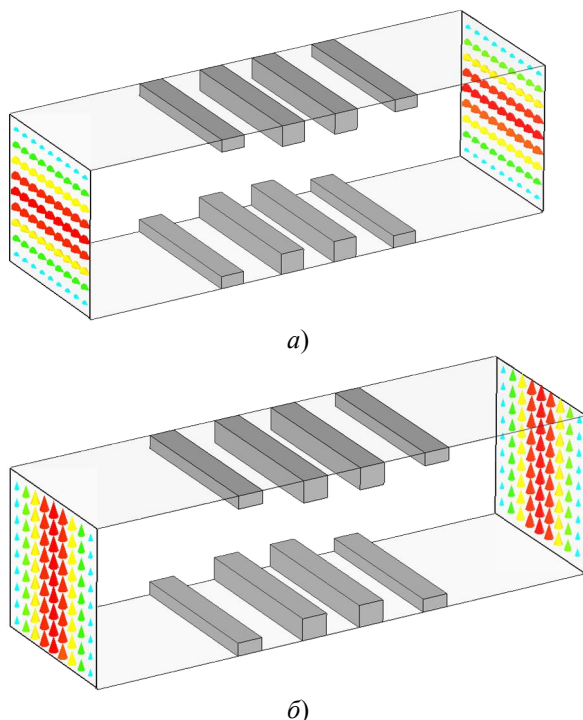


Рисунок 1 – Структуры поля в вертикальной и горизонтальной плоскостях

Комплексные амплитуды электрических полей волн лежат в поперечной плоскости и имеют вид:

$$\vec{E}_x = Ae^{i\phi_A}\vec{e}_x; \vec{E}_y = Be^{i\phi_B}\vec{e}_y, \quad (3)$$

где A и B – амплитуды электрических полей, ориентированных по осям x и y соответственно, ϕ_A и ϕ_B – начальные фазы волн на выходе поляризатора

Выделим центральную фазу и разность фаз:

$$\phi_0 = \frac{\phi_A + \phi_B}{2}; \Delta\phi = \phi_B - \phi_A.$$

Тогда:

$$\phi_A = \phi_0 - \frac{\Delta\phi}{2}; \phi_B = \phi_0 + \frac{\Delta\phi}{2}. \quad (4)$$

Далее подставляем формулы (4) в (3) и рассматриваем суперпозицию волн на выходе поляризатора:

$$\begin{aligned} \vec{E}_\Sigma &= \vec{E}_x + \vec{E}_y = Ae^{i(\phi_0 - \Delta\phi/2)}\vec{e}_x + Be^{i(\phi_0 + \Delta\phi/2)}\vec{e}_y = \\ &= e^{i\phi_0}(Ae^{-i\Delta\phi/2}\vec{e}_x + Be^{i\Delta\phi/2}\vec{e}_y). \end{aligned} \quad (5)$$

Затем выделяем проекции $\dot{C}$ и $\dot{D}$ полученного вектора (5) в базисе круговой поляризации

$$\begin{aligned} &Ae^{-i\Delta\phi/2}\vec{e}_x + Be^{i\Delta\phi/2}\vec{e}_y = \\ &= \dot{C}(\vec{e}_x + i \cdot \vec{e}_y) + \dot{D}(\vec{e}_x - i \cdot \vec{e}_y). \end{aligned}$$

В результате получаем систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{C} + \dot{D} = Ae^{-i\Delta\phi/2} \\ \dot{C} - \dot{D} = -iBe^{i\Delta\phi/2} \end{cases} \quad (6)$$

Решение системы (6) следующее:

$$\dot{C} = \frac{1}{2}\left(A\cos\frac{\Delta\phi}{2} - iA\sin\frac{\Delta\phi}{2} - iB\cos\frac{\Delta\phi}{2} + B\sin\frac{\Delta\phi}{2}\right);$$

$$\dot{D} = \frac{1}{2}\left(A\cos\frac{\Delta\phi}{2} - iA\sin\frac{\Delta\phi}{2} + iB\cos\frac{\Delta\phi}{2} - B\sin\frac{\Delta\phi}{2}\right).$$

Далее мы определяем модули и упрощаем их:

$$|\dot{C}| = \frac{1}{2}\sqrt{A^2 + B^2 + 2AB\sin\Delta\phi}; \quad (7)$$

$$|\dot{D}| = \frac{1}{2}\sqrt{A^2 + B^2 - 2AB\sin\Delta\phi}. \quad (8)$$

В базисе круговой поляризации коэффициент эллиптичности определяется с использованием модулей (7) и (8) следующим образом [6]:

$$r = \frac{|\dot{C}| + |\dot{D}|}{|\dot{C}| - |\dot{D}|}. \quad (9)$$

Теперь подставим (5) и (6) в квадрат формулы (9) и получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{|\dot{C}|^2 + |\dot{D}|^2 + 2|\dot{C}| \cdot |\dot{D}|}{|\dot{C}|^2 + |\dot{D}|^2 - 2|\dot{C}| \cdot |\dot{D}|} = \\ &= \frac{A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2\cos(2\Delta\phi)}}{A^2 + B^2 - \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2\cos(2\Delta\phi)}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Используя логарифмическую шкалу, коэффициент эллиптичности можно выразить в дБ следующим образом [6]:

$$r = 10\lg \frac{A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2\cos(2\Delta\phi)}}{A^2 + B^2 - \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2\cos(2\Delta\phi)}}, \quad (11)$$

где A , B обозначают амплитуды ортогональных линейно поляризованных компонент поля, $\Delta\phi$ – дифференциальный фазовый сдвиг между ними на выходе поляризатора.

Эквивалентная характеристика поляризации КПР выражается в дБ и может быть рассчитана следующим образом:

$$\text{XPD (dB)} = 20\lg \left(\frac{r+1}{r-1} \right), \quad (12)$$

где r – коэффициент эллиптичности (11), который предварительно необходимо перевести в линейный масштаб.

Результаты оптимизации. В этом разделе представлены результаты численного моделирования и оптимизации характеристик поляризаторов на основе квадратного волно-

вода с четырьмя диафрагмами с применением метода конечного интегрирования.

Внутренняя конструкция квадратного волноводного поляризатора с четырьмя диафрагмами и обозначения всех его размеров показаны на рисунке 2. Две внешние диафрагмы имеют одинаковую высоту h_1 . Для улучшения согласования структуры внешние диафрагмы ниже двух внутренних диафрагм с высотой h_2 . Толщина всех диафрагм одинакова и обозначена как w .

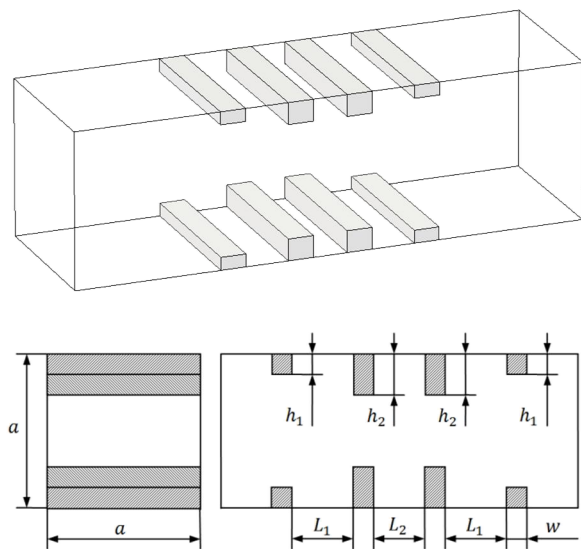


Рисунок 2 – Внутренняя конструкция волноводного поляризатора с четырьмя диафрагмами

На рисунке 3 представлены зависимости КСВН оптимизированного прямоугольного волноводного поляризатора с четырьмя диафрагмами от частоты для двух основных мод обеих линейных поляризаций в рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц. Как видно из рисунка 3, максимальный уровень КСВН для обеих линейных поляризаций составляет 1,24 и достигается на нескольких частотах в пределах Ку-диапазона.



Рисунок 3 – Зависимость КСВН от частоты для обеих поляризаций

На рисунке 3 видно, что зависимости КСВН от частоты для оптимизированного квадратного волноводного поляризатора с четырьмя диафрагмами не являются монотонными функциями, в отличие от таковых для поляризатора с тремя диафрагмами. Это обусловлено тем, что в случае структуры с четырьмя и более диафрагмами происходят сильные взаимодействия между модами более высокого порядка, которые возбуждаются на диафрагмах. Таким образом, одномодовый метод эквивалентных микроволновых схем может прогнозировать характеристики поляризатора волноводной диафрагмы только приблизительно. Интересная особенность, что локальные максимумы КСВН для основной моды горизонтальной поляризации наблюдаются в окрестности частот, которые соответствуют локальным минимумам КСВН основной моды вертикальной поляризации.

Зависимость дифференциального фазового сдвига оптимизированного прямоугольного волноводного поляризатора с четырьмя диафрагмами от частоты показана на рисунке 4.

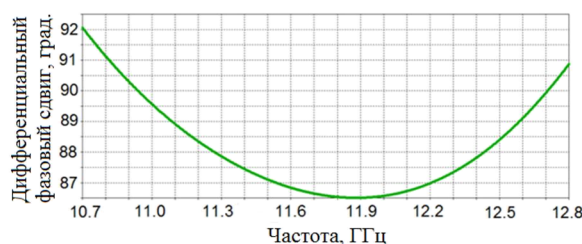


Рисунок 4 – Зависимость дифференциального фазового сдвига от частоты

Как видно из рисунка 4, дифференциальный фазовый сдвиг равен 90° на частотах 10,94 ГГц и 12,71 ГГц. В рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц дифференциальный фазовый сдвиг поляризатора с четырьмя диафрагмами изменяется от $86,5^\circ$ до $92,1^\circ$. Максимальное отклонение дифференциального фазового сдвига от 90° составляет $3,5^\circ$ и наблюдается на частоте 11,9 ГГц.

Зависимости коэффициента эллиптичности и КПР оптимизированного поляризатора с четырьмя диафрагмами от частоты в рабочем Ку-диапазоне показаны на рисунке 5 и рисунке 6 соответственно.

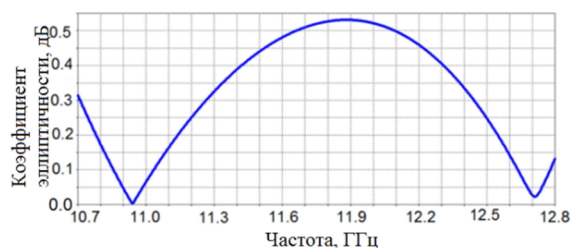


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента эллиптичности от частоты

На рисунке 5 видно, что в рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц коэффициент эллиптичности оптимизированного квадратного волноводного поляризатора с четырьмя диафрагмами составляет менее 0,53 дБ.

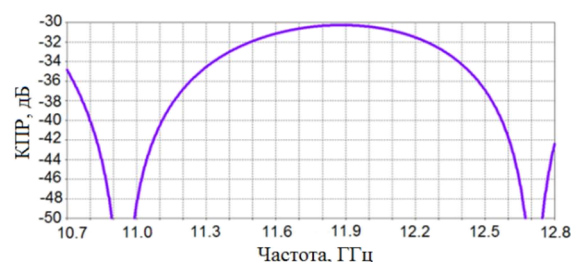


Рисунок 6 – Зависимость КПП от частоты для поляризатора с четырьмя диафрагмами

На рисунке 6 видно, что соответствующий КПП поляризатора превышает 30,3 дБ. Два минимума зависимостей коэффициента эллиптичности и КПП от частоты встречаются на частотах 10,94 ГГц и 12,71 ГГц, которые совпадают с частотами, соответствующими дифференциальному фазовому сдвигу 90° . Максимальный коэффициент эллиптичности, как и самый низкий уровень кроссполяризационной развязки, наблюдается на частоте 11,9 ГГц, что в точности соответствует частоте максимального отклонения дифференциального фазового сдвига поляризатора от 90° .

Таким образом, в рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц оптимизированный поляризатор на основе прямоугольного волновода с четырьмя диафрагмами обеспечивает следующие характеристики: КСВН для основных мод обеих линейных поляризаций меньше 1,24, дифференциальный фазовый сдвиг находится в диапазоне $90^\circ \pm 3,5^\circ$, коэффициент эллиптичности менее 0,53 дБ, КПП более 30,3 дБ.

Результаты исследования и их обсуждение. В таблице 1 представлены все внутренние размеры конструкций поляризатора

на основе квадратного волновода с четырьмя диафрагмами, оптимизированных для рабочего диапазона Ку 10,7–12,8 ГГц.

Таблица 1 – Размеры поляризатора, оптимизированного для Ку-диапазона частот

Размер	Значение
Размер стенки волновода	21,6 мм
Высота внутренних диафрагм	2,99 мм
Высота крайних диафрагм	1,77 мм
Расстояние между средними диафрагмами	4,68 мм
Расстояние между крайними и средними диафрагмами	5,86 мм
Толщина всех диафрагм	3,44 мм

Когда в конструкции поляризатора используется большее количество диафрагм, тогда дифференциальный фазовый сдвиг, вносимый каждой диафрагмой, становится меньше, потому что полный дифференциальный фазовый сдвиг на выходе поляризатора должен быть близок к 90° для каждой из рассматриваемых конструкций. Это приводит к уменьшению высоты диафрагм по мере увеличения их количества. Кроме того, уменьшение высоты диафрагм улучшает согласование структуры поляризатора.

Из таблицы 2 видно, что поляризатор на основе прямоугольного волновода с четырьмя диафрагмами обеспечивает требуемое согласование в большинстве систем питания, поскольку его максимальный уровень КСВН выше 1,24. При этом коэффициент эллиптичности не превышает 0,53 дБ, а КПП является выше, чем 30,3 дБ. Следовательно, разработанный волноводный поляризатор с четырьмя диафрагмами обеспечивает одновременно хорошее согласование и отличные поляризационные характеристики в Ку-диапазоне.

Таблица 2 – Характеристики оптимизированного поляризатора в пределах Ку-диапазона

Характеристика	Значение
Дифференциальный фазовый сдвиг	$90^\circ \pm 3,5^\circ$
Максимальный КСВН	1,24
Коэффициент эллиптичности	0,53 дБ
Минимальная КПП	30,3 дБ

Выводы. В статье разработан и оптимизирован новый высокоэффективный волноводный поляризатор с четырьмя диафрагмами для спутниковых информационных систем Ку-диапазона частот с ортогональными круговыми поляризациями.

Разработанный волноводный поляризатор с четырьмя диафрагмами обеспечивает КСВН меньше 1,24. Его дифференциальный фазовый сдвиг составляет $90^\circ \pm 3,5^\circ$. Коэффициент эллиптичности не превышает 0,53 дБ. Соответствующая кроссполяризационная развязка выше, чем 30,3 дБ. Таким образом, разработанный поляризатор обеспечивает отличные поляризационные характеристики и удовлетворяет требованиям к согласованию в современных спутниковых информационных системах.

Список использованных источников

- [1] А. В. Булашенко, "Оцінка зв'язності D2D комунікацій у мережах 5G", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, № 81, с. 21-29, 2020. DOI: 10.20535/RADAR.2020.81.21-29.
- [2] А. В. Булашенко, "Розподіл ресурсів для пристроїв малої потужності технології M2M в мережах 5G", *Наукові вісті КПІ*, Вип. 3, с. 7-13, 2020. DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.3.203863.
- [3] В. В. Гладун, та А. В. Булашенко, "Забезпечення високої якості мереж 5G за допомогою технології D2D", на *Міжнар. наук.-техн. конф. Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи*, Київ, 2019, с. 57-59.
- [4] В. А. Гнитецький, та А. В. Булашенко, "Забезпечення дуже низьких затримок у стільниковій системі 5G на базі МЕС", на *Міжнар. наук.-техн. конф. Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи*, Київ, 2019, с. 153-155.
- [5] А. В. Булашенко, та О. Л. Литвинець, "Аналіз можливостей хмарних технологій", на *II Всеукр. наук.-метод. конф. Освіта, наука та виробництво: розвиток і перспективи*, Суми, 2017, с. 1-3. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66966/1/Bulashenko_cloud_technologies.pdf.
- [6] W. L. Stutzman, *Polarization in Electromagnetic Systems*, Artech House, Norwood, 2018.
- [7] F. F. Dubrovka, S. I. Pilyay, R. R. Dubrovka, M. M. Lytvyn, and S. M. Lytvyn, "Optimum septum polarizer design for various fractional bandwidths", *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 1, pp. 15-23, 2020. DOI: 10.3103/S0735272720010021
- [8] F. Dubrovka, S. Pilyay, O. Sushko, R. Dubrovka, M. Lytvyn, and S. Lytvyn, "Compact X-band stepped-thickness septum polarizer", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, 2020, pp. 135-138. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583
- [9] F. Dubrovka, S. Martunyk, R. Dubrovka, M. Lytvyn, S. Lytvyn, Yu. Ovsianyk, S. Pilyay et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, 2020, pp. 196-202. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600
- [10] F. F. Dubrovka, and S. I. Pilyay, "A novel wideband coaxial polarizer", in *IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 473-474. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650816
- [11] D. Yu. Kulik, L. P. Mospan, A. O. Perov, and N. G. Kolmakova, "Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 1-9, 2016. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10
- [12] D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, and A. A. Kirilenko, "Compact polarization plane rotator at a given angle in the square rectangular waveguide", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 855-864, 2017. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i10.20
- [13] S. I. Pilyay, "High performance extended C-band 3.4–4.8 GHz dual circular polarization feed system", in *IEEE XI Int. Conf. on Antenna Theory and Techn.*, Kyiv, 2017, pp. 284-287. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972644
- [14] A. A. Kirilenko, S. O. Steshenko, V. N. Derkach, and Y. M. Ostryzhnyi, "A tunable compact polarizer in a circular waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592-596, 2019. DOI: 10.1109/TMTT.2018.2881089

- [15] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Analytical technique for iris polarizers development", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 464-469.
- [16] А. В. Булашенко, С. І. Пільтяй, та І. В. Демченко, "Оптимізація поляризатора на основі квадратного хвильоводу з діафрагмами", *Наукові технології*, Вип. 47, № 3, с. 287-297, 2020.
DOI: 10.18372/2310-5461.47.14878
- [17] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact polarizers for satellite information systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 350-355.
- [18] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, p. 05024, 2020.
DOI: 10.21272/jnep.12(5).05024
- [19] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Analytical synthesis of waveguide iris polarizers", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579-1597, 2020.
DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10
- [20] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds", in *XI IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Kyiv, 2017, pp. 277-280.
DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972642
- [21] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides", in *Int. Conf. on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavske, 2012, p. 191.
- [22] S. I. Piltyay, "Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides", in *14-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory*, Kyiv, 2012, pp. 492-495.
DOI: 10.1109/MMET.2012.6331195
- [23] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of sectoral coaxial ridged waveguides", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 239-247, 2012.
DOI: 10.3103/S0735272712060015
- [24] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Electrodynamics boundary problem solution for sectoral coaxial ridged waveguide by integral equation technique", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 5, pp. 191-203, 2012.
DOI: 10.3103/S0735272712050019
- [25] S. I. Piltyay, and F. F. Dubrovka, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory", *Visnyk NTUU KPI. Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol. 54, pp. 13-23, 2013.
DOI: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23
- [26] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Numerical results", *Visnyk NTUU KPI. Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol. 55, pp. 13-23, 2013.
DOI: 10.20535/RADAP.2013.55.13-23
- [27] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Theory", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 57, no. 1, pp. 1-30, 2014.
DOI: 10.3103/S0735272714010014
- [28] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59-69, 2014.
DOI: 10.3103/S0735272714020010
- [29] S. I. Piltyay, "Enhanced C-band coaxial orthomode transducer", *Visnyk NTUU KPI. Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol. 58, pp. 27-34, 2014.
DOI: 10.20535/RADAP.2014.58.27-34
- [30] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides", *Information and Telecommunication Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 48-61, 2014.
- [31] S. I. Piltyay, O. Yu. Sushko, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673-1690, 2020.
DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10

References

- [1] A. V. Bulashenko, "Evaluation of connectivity of D2D communications in 5G networks", *Visnyk NTUU KPI. Seriya - Radio-tekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol. 81, pp. 21-29, 2020.
DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29 [in Ukrainian].
- [2] A. V. Bulashenko, "Resource allocation for low-power devices of M2M technology in 5G networks", *Naukovi visti KPI*, vol. 3, pp. 7-13, 2020.
DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.3.203863 [in Ukrainian].
- [3] V. V. Gladun, and A. V. Bulashenko, "Obtaining of high quality 5G networks with D2D technology", in *Int. Sci. and Tech. Conf. Radioengineering Fields, Signals, Devices and Systems*, Kyiv, 2019, pp. 57-59. [in Ukrainian].
- [4] V. A. Gnitetsky, and A. V. Bulashenko, "Obtaining of very low delays in 5G cellular system based on MEC", in *Int. Sci. and Tech. Conf. Radioengineering Fields, Signals, Devices and Systems*, Kyiv, 2019, pp. 153-155. [in Ukrainian].
- [5] A. V. Bulashenko, and O. L. Litvinets, "Analysis of cloud technologies capabilities", in *II All-Ukr. Sci.-Method. Conf. Education, Science and Production: Development and Prospects*. Sumy, 2017, pp. 1-3. [Online]. Available: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66966/1/Bulashenko_cloud_technologies.pdf.
- [6] W. L. Stutzman, *"Polarization in Electromagnetic Systems"*, Artech House, Norwood, 2018.
- [7] F. F. Dubrovka, S. I. Piltyay, R. R. Dubrovka, M. M. Lytvyn, and S. M. Lytvyn, "Optimum septum polarizer design for various fractional bandwidths", *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 1, pp. 15-23, 2020.
DOI: 10.3103/S0735272720010021
- [8] F. Dubrovka, S. Piltyay, O. Sushko, R. Dubrovka, M. Lytvyn, and S. Lytvyn, "Compact X-band stepped-thickness septum polarizer", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, 2020, pp. 135-138.
DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583
- [9] F. Dubrovka, S. Martunyuk, R. Dubrovka, M. Lytvyn, S. Lytvyn, Yu. Ovsianyk, S. Piltyay et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, 2020, pp. 196-202.
DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600
- [10] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "A novel wideband coaxial polarizer", in *IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 473-474.
DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650816
- [11] D. Yu. Kulik, L. P. Mospan, A. O. Perov, and N. G. Kolmakova, "Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 1-9, 2016.
DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10
- [12] D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, and A. A. Kirilenko, "Compact polarization plane rotator at a given angle in the square rectangular waveguide", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 855-864, 2017.
DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i10.20
- [13] S. I. Piltyay, "High performance extended C-band 3.4–4.8 GHz dual circular polarization feed system", in *IEEE XI Int. Conf. on Antenna Theory and Techn.*, Kyiv, 2017, pp. 284-287.
DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972644
- [14] A. A. Kirilenko, S. O. Steshenko, V. N. Derkach, and Y. M. Ostryzhnyi, "A tunable compact polarizer in a circular waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592-596, 2019.
DOI: 10.1109/TMTT.2018.2881089
- [15] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Analytical technique for iris polarizers development", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 464-469.
- [16] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Optimization of a polarizer based on a square waveguide with diaphragms", *Naukoiemni tekhnolohii*, Iss. 47, No. 3, pp. 287-297, 2020.
DOI: 10.18372/2310-5461.47.14878 [in Ukrainian].
- [17] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact polarizers for

- satellite information systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 350-355.
- [18] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, p. 05024, 2020.
DOI: 10.21272/jnep.12(5).05024
- [19] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Analytical synthesis of waveguide iris polarizers", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579-1597, 2020.
DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10
- [20] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds", in *XI IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Kyiv, 2017, pp. 277-280.
DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972642
- [21] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides", in *Int. Conf. on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavske, 2012, p. 191.
- [22] S. I. Piltyay, "Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides", in *14-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory*, Kyiv, 2012, pp. 492-495.
DOI: 10.1109/MMET.2012.6331195
- [23] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of sectoral coaxial ridged waveguides", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 239-247, 2012.
DOI: 10.3103/S0735272712060015
- [24] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Electrodynamics boundary problem solution for sectoral coaxial ridged waveguide by integral equation technique", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 5, pp. 191-203, 2012.
DOI: 10.3103/S0735272712050019
- [25] S. I. Piltyay, and F. F. Dubrovka, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory", *Visnyk NTUU KPI. Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol. 54, pp. 13-23, 2013.
DOI: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23
- [26] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Numerical results", *Visnyk NTUU KPI. Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol. 55, pp. 13-23, 2013.
DOI: 10.20535/RADAP.2013.55.13-23
- [27] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Theory", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 57, no. 1, pp. 1-30, 2014.
DOI: 10.3103/S0735272714010014
- [28] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59-69, 2014.
DOI: 10.3103/S0735272714020010
- [29] S. I. Piltyay, "Enhanced C-band coaxial orthomode transducer", *Visnik NTUU KPI. Seriya - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, vol. 58, pp. 27-34, 2014.
DOI: 10.20535/RADAP.2014.58.27-34
- [30] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides", *Information and Telecommunication Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 48-61, 2014.
- [31] S. I. Piltyay, O. Yu. Sushko, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673-1690, 2020.
DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10

S. I. Piltyay¹, *Ph.D., associate professor,*
e-mail: s.piltiai@kpi.ua

A. V. Bulashenko¹, *senior lecturer,*
e-mail: a.bulashenko@kpi.ua

Ye. I. Kalinichenko¹, *student,*
e-mail: kaliza@ukr.net

O. V. Bulashenko², *student*
e-mail: alex.bulashenko2020@gmail.com

¹ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
Ave. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

² Shostka Ivan Kozhedub professional college of Sumy State University
St. Instytutaska, 1, Shostka, Sumy region, 41100, Ukraine

HIGH PERFORMANCE WAVEGUIDE POLARIZER FOR SATELLITE INFORMATION SYSTEMS

Signals with circular polarizations are widely used in modern satellite information systems and wireless data transmission systems. Signals of this type require the application of specific antenna systems with polarization processing. This approach allows to save twice the frequency resources, which are limited. As a result, the information capacity of information transmission channels of satellite and another information systems increases. A polarizer is the essential element of antenna systems with circular polarizations. Such device carries out the transformation of circularly polarized electromagnetic waves into linearly polarized waves or vice versa. The application of a polarizer and of an orthomode transducer in antenna systems provides the transformation of the signals polarization and their simultaneous transmission to the isolated waveguide channels. The article contains the results of the analysis and optimization of a new high performance waveguide polarizer for satellite information systems. The design of the developed polarizer consists of a square waveguide with four diaphragms. The polarizer has been optimized for its application within the frequency band from 10.7 GHz to 12.8 GHz. The phase, polarization and matching characteristics have been analyzed and optimized using the numerical finite integration technique. The developed waveguide polarizer with four diaphragms provides the differential phase shift of $90^\circ \pm 3.5^\circ$, voltage standing wave ratio less than 1.24, axial ratio less than 0.53 dB, crosspolar discrimination higher than 30.3 dB. Therefore, the created new polarizer based on a square waveguide with four diaphragms provides highly efficient performance in the whole operating Ku-band 10.7–12.8 GHz. The device can be widely applied in modern antenna systems with the processing of signal's polarization in telecommunication, radar and satellite information systems.

Keywords: *polarizer, waveguide polarizer, diaphragm, waveguide, differential phase shift, axial ratio, crosspolar discrimination.*

С. І. Пільтяй¹, к.т.н., доцент,
e-mail: s.piltiai@kpi.ua

А. В. Булашенко¹, ст. викладач,
e-mail: a.bulashenko@kpi.ua

Є. І. Калініченко¹, студентка,
e-mail: kaliza@ukr.net

О. В. Булашенко², студент,
e-mail: alex.bulashenko2020@gmail.com

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

² Шосткинський фаховий коледж імені Івана Кожедуба Сумського державного університету
вул. Інститутська, 1, м. Шостка, Сумська обл., 41100, Україна

ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ ХВИЛЕВОДНИЙ ПОЛЯРИЗАТОР ДЛЯ СУПУТНИКОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У сучасних супутникових інформаційних системах та безпроводних системах передачі даних широко використовують сигнали із коловими поляризаціями. Сигнали цього типу вимагають застосування спеціальних антенних систем із поляризаційним обробленням. Такий підхід дає можливість удвічі зекономити частотні ресурси, які є обмеженими. У результаті збільшується інформаційна ємність каналів передачі інформації в супутникових та інших інформаційних системах. Базовим елементом антенних систем із коловими поляризаціями є поляризатор. Такий пристрій здійснює перетворення електромагнітних хвиль із круговою поляризацією в лінійно поляризовані хвилі або навпаки. Використання поляризатора та ортомодового перетворювача в антенних системах забезпечує перетворення поляризації сигналів із одночасною передачею їх до розв'язаних хвильоводних каналів. Стаття містить результати аналізу та оптимізації нового високоефективного хвильоводного поляризатора для супутникових інформаційних систем. Конструкція розробленого поляризатора складається із хвильоводу квадратного перерізу з чотирма діафрагмами. Виконано оптимізацію поляризатора для його застосування в робочому діапазоні частот від 10,7 ГГц до 12,8 ГГц. Проаналізовано й оптимізовано фазові, поляризаційні характеристики та характеристики узгодження із застосуванням чисельного методу скінченного інтегрування. Розроблений хвильоводний поляризатор із чотирма діафрагмами забезпечує диференційний фазовий зсув $90^\circ \pm 3,5^\circ$, коефіцієнт стійкої хвилі з напругою, меншою 1,24, коефіцієнт еліптичності, менший 0,53 дБ, кросполяризаційну розв'язку, вищу 30,3 дБ. Таким чином, створений новий поляризатор на основі квадратного хвильоводу з чотирма діафрагмами забезпечує якісну роботу в усьому робочому Ки-діапазоні частот 10,7–12,8 ГГц. Пристрій може широко використовуватися в сучасних антенних системах із поляризаційним обробленням сигналів у телекомунікаційних, радіолокаційних і супутникових інформаційних системах.

Ключові слова: поляризатор, хвильоводний поляризатор, діафрагма, хвильовід, диференційний фазовий зсув, коефіцієнт еліптичності, кросполяризаційна розв'язка.

УДК 004.02:378.14

[0000-0002-0739-2065] **Ю. В. Триус**, д.пед.н., професор,

e-mail: tryus@chdtu.edu.ua

[0000-0001-8726-7100] **Г. О. Заспа**,

e-mail: g.zaspa@chdtu.edu.ua

[0000-0001-6117-3114] **О. С. Кожем'якін**,

e-mail: a.kozhemyakin71@gmail.com

[0000-0002-8067-8203] **А. В. Аширова**

e-mail: a.ashyrova@chdtu.edu.ua

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

ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ОСВІТНЬОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СТРУКТУРНИХ ПІДРОЗДІЛІВ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Стаття присвячена проблемам розробки і впровадження інформаційних систем підтримки освітньої діяльності закладів вищої освіти в умовах цифрової трансформації. На основі аналізу вітчизняного і закордонного досвіду визначено технічні та функціональні вимоги до таких систем, обґрунтовано необхідність комплексного використання системного, процесного і проєктного підходів при їх проєктуванні, створенні і впровадженні. Метою дослідження є автоматизація опрацювання інформації, що стосується організації освітнього процесу навчальними підрозділами університету, уніфікація процесів електронного документообігу в університеті, забезпечення його статистичної звітності і підтримка прийняття управлінських рішень на основі аналізу даних про успішність здобувачів вищої освіти за рахунок розробки веб-орієнтованої інформаційно-аналітичної системи в рамках концентричної інформаційної технології. У роботі запропоновано модель наповнення бази даних системи інформацією для формування вихідної документації про освітню діяльність студентів, зокрема додатків до диплому європейського зразка. Також змодельовано і спроектовано бізнес-процеси, що відбуваються в освітньому середовищі університету. На основі цілеспрямованого і комплексного використання сучасних підходів і технологій проєктування та програмування створено базові модулі веб-орієнтованої інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності закладу вищої освіти, які впроваджені у діяльність структурних підрозділів Черкаського державного технологічного університету.

Ключові слова: цифрова трансформація, вища освіта, веб-орієнтована інформаційна система, моделювання, проєктування, системний підхід.

Вступ. Система вищої освіти України сьогодні перебуває в стадії докорінного реформування, що надає додаткової турбулентності освітньому процесу в закладах вищої освіти. Це, насамперед, пов'язано з процесами цифрової трансформації ключових сфер діяльності людини, зокрема й освіти [1]. В умовах цифровізації вищої освіти розробка інформаційних систем підтримки та супроводу освітнього процесу в університетах потребує підвищеної уваги та ретельності щодо питань їх моделювання, проєктування, обрання архітектури та технологій і засобів створення. Водночас необхідно використовувати підходи, які б давали можливість в обмеженому часі змінювати структуру системи так, щоб вона залишалася працездатною й актуальною протя-

гом тривалого часу. Такими підходами до моделювання, проєктування, створення та впровадження інформаційних систем є системний, процесний і проєктний підходи.

Комплексний підхід до «розв'язання проблеми проєктування інформаційно-освітнього середовища передбачає створення єдиної інформаційної системи навчального закладу і мережі його підрозділів через формування корпоративної комунікативної інфраструктури, використання сучасного цифрового обладнання, комп'ютерної техніки та програмних засобів із подальшою інтеграцією різних інформаційних систем до загального комплексу взаємопов'язаних програмних продуктів і технічних рішень та побудови системи управління його розвитком» [2].

У процесі проектування інформаційно-освітнього середовища закладів освіти «важливо передбачити створення інформаційної архітектури, інформаційної моделі на основі сучасних інтегрованих рішень для сфери освіти, концепцій інформації, управління інформаційними ресурсами, ... дієвих організаційно-економічних та інформаційних механізмів, програм запровадження сучасних технологій та інновацій, інформатизації закладів освіти» [2].

Одним із шляхів розвитку інформатизації закладу вищої освіти є створення та впровадження інформаційно-аналітичної системи управління освітнім процесом. Робота над створенням такої системи в Черкаському державному технологічному університеті (ЧДТУ), за участю авторів, триває упродовж кількох років [3], [4]. Новим етапом розвитку цієї системи стало створення інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності структурних підрозділів (ІАСПОДСП) університету. Ця розробка розпочалась навесні 2018 р. в рамках роботи науково-технічної проблемної групи «Сучасні технології створення інформаційних систем», організованої на кафедрі комп'ютерних наук та системного аналізу, і продовжилась у рамках НДР і ДКР № 0118U002315 цієї кафедри.

З самого початку основним принципом роботи над проектом створення ІАСПОДСП ЗВО, що отримав назву «Deanoffice», було широке залучення до його реалізації студентів комп'ютерних спеціальностей ЧДТУ. Тому різною мірою студенти залучалися до всіх видів робіт у життєвому циклі інформаційної системи: аналіз предметної галузі, вироблення вимог, моделювання, проектування, розробка, тестування і супроводження. За час роботи над системою в розробці взяло участь близько 50 студентів спеціальностей 121 – інженерія програмного забезпечення, 122 – комп'ютерні науки, 124 – системний аналіз та 125 – кібербезпека. Іншим важливим принципом у роботі над проектом було залучення досвідчених фахівців провідних ІТ-компаній м. Черкаси: SPD Ukraine, Master of Code, Interlink та eKreative для організаційної і консультаційної підтримки на всіх етапах розробки. Як наслідок, студенти мали можливість одержувати постійні технічні консультації від ІТ-професіоналів, а також результати аналізу зробленої роботи з їхнього боку. Крім того, комунікація з ІТ-компаніями позитивно впливала на мотивацію студентів до навчання і давала їм можливість краще зрозуміти вимоги працевластуваних та підго-

туватися до майбутньої професійної діяльності в ІТ-галузі.

Мета дослідження: автоматизувати опрацювання інформації, що стосується організації освітнього процесу навчально-науковими підрозділами університету, уніфікувати процеси електронного документообігу в університеті, забезпечити його статистичну звітність і підтримку прийняття управлінських рішень на основі аналізу даних про успішність здобувачів вищої освіти за рахунок розробки веб-орієнтованої інформаційно-аналітичної системи в рамках концентричної інформаційної технології.

Постановка проблеми. Використання інформаційно-аналітичних систем в управлінні підприємствами, зокрема й закладами вищої освіти (ЗВО), «сприяє вирішенню таких проблем:

- зниження складності (складність управління при необхідності вибору управлінського рішення із множини можливих рішень);
- управління підприємством, що вимагає обробки великих обсягів інформації;
- необхідність прийняття рішення за короткий часовий проміжок (проявляється в міру ускладнення діяльності);
- проблема координації (рішення необхідно координувати з іншими ланками процесу або об'єкта);
- необхідність збереження і поширення знань, накопичених у процесі багаторічної роботи, і великого практичного досвіду» [5].

Для вирішення завдань дослідження вивчався досвід створення та використання інформаційних систем управління у вітчизняних ЗВО ([6]–[8]) і ЗВО ближнього зарубіжжя ([9]), було проведено аналіз інформаційних систем управління, що використовуються у ЗВО України, зокрема:

- АСУ «Університет» – розробник ТОВ «UNITEX+» [<http://www.unitex.com.ua/products/commercial-software/automated-system-for-higher-education-institution/>];
- Пакет комп'ютерних систем ПП «Політек-софт» [<http://www.politek-soft.kiev.ua/index.php?do=products>];
- АСУ «ВНЗ» – розробник Науково-дослідний інститут прикладних інформаційних технологій [[http://ndipit.com.ua, https://vuz.osvita.net/ua/](http://ndipit.com.ua,https://vuz.osvita.net/ua/)];
- ІАС «Університет» – розробник Херсонський державний університет [<http://www.kspu.edu>];

– Електронна система управління ЗВО «Сократ» – розробник Вінницький національний аграрний університет [<http://socrates.vsau.org/index.php/ua/>];

– ІАС управління університетом – розробник Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького [8].

Також вивчався досвід використання інформаційних систем управління в європейських та інших закордонних університетах, де розвитку інформатизації приділяється велика увага. Водночас відзначається прогрес у розробленні стратегій інформатизації і діяльності структур управління ІТ в університетах [10], [11], звертається увага на використання ІТ-стратегій на основі системного підходу в умовах цифрової трансформації [12]. Проведений аналіз вітчизняних і закордонних інформаційних систем управління ЗВО показав, що:

– питанням моделювання, проектування, створення і впровадження інформаційних систем управління освітнім процесом ЗВО приділяється ще недостатньо уваги; через це створення, впровадження та використання таких систем у багатьох ЗВО нашої країни відбувається фрагментарно, епізодично та, інколи, хаотично і без дотримання стандартів;

– у більшості випадків використовується велика кількість ІТ-систем та додатків, але вони є лише частково інтегрованими;

– найбільш поширені ІАС управління ЗВО є комерційними продуктами, з англійським інтерфейсом, вимагають ліцензованого програмного забезпечення великої вартості і, як правило, не враховують специфіку вітчизняних ЗВО.

Тому в умовах цифрової трансформації вищої освіти актуальною для ЗВО є *науково-практична проблема*: на основі використання принципів системного підходу, методів системного проектування у поєднанні з використанням сучасних методів і засобів моделювання, проектування та розробки інформаційних систем разом з методами організації процесу розробки на основі науково обґрунтованих методологій проектного менеджменту реалізувати створення веб-орієнтованої інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності структурних підрозділів ЗВО як інтегрованої системи, що здатна вирішувати широке коло задач з обробки інформації та підтримки прийняття рішень і здатна існувати у середовищі з іншими інформаційними освітніми системами та взаємодіяти з ними в реальному часі.

Виклад основного матеріалу. Для ефективної розробки та впровадження ІАС управління освітнім процесом у ЗВО така система повинна мати такі характеристики:

- використання відкритої архітектури;
- наявність модульної організації;
- кросплатформність;
- мінімізація вимог до програмного забезпечення клієнта;
- підтримка розмежування прав доступу користувачів системи;
- підтримка одночасного мережевого доступу до системи різних користувачів;
- наявність розвинутих механізмів захисту зберігання та передавання даних;
- наявність моделей даних, за якими можна згенерувати структури баз даних та структури даних програмних модулів;
- наявність моделей, за якими можна перевірити відповідність структур даних інформаційної системи поточному стану предметної галузі з можливістю подальшого корегування.

Розглянемо основні етапи створення інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності структурних підрозділів ЗВО та її основних модулів.

Моделювання. Сукупність усіх «бізнес-процесів», що відбуваються у ЗВО, формує логіку його діяльності, керуючими механізмами якої є чинники, що визначають правила цієї діяльності (законодавчі акти, нормативні документи, освітні програми, навчальні плани, штатний розпис, правила внутрішнього розпорядку тощо). З організаційно-інформаційної точки зору, кожен ЗВО можна розглядати як складний багаторівневий механізм, в якому основні бізнес-процеси ґрунтуються на обробці інформаційних потоків, а також склалися певні принципи управління. Систематизація цих потоків дала змогу побудувати модель концентричної інформаційної технології, в якій виділяються взаємодіючі компоненти: система ведення нормативно-довідкової інформації, система відображення інформаційних баз задач, технологія управління інформацією, інформаційна технологія вирішення функціональних задач, інформаційно-аналітична система підтримки освітньої діяльності. Це дає можливість формалізувати більшість задач управління такими процесами, скласти відповідні алгоритми та процедури, а також побудувати комп'ютерні системи автоматизації управління закладом вищої освіти на основі системного підходу [13], [14].

Одним із основних напрямів роботи в процесі побудови інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності структурних підрозділів був аналіз предметної галузі – освітнього процесу та його організаційного супроводження, з побудовою відповідних моделей, які надалі відображались у структури даних та програмні структури. Предметна галузь характеризується великою кількістю інформаційних сутностей, часом доволі складних. До того ж, ці сутності можуть поєднуватися різними способами при формуванні документів або аналізі даних.

Для створення ефективної інформаційної системи управління освітнім процесом ЗВО, яка дає можливість автоматично формувати різноманітні документи, пов'язані з освітньою діяльністю студентів (накази по університету, виписки і відомості обліку успішності,

додатки до дипломів тощо), перш за все, потрібно визначити перелік даних, які необхідні для формування цих документів, і шляхи потрапляння цих даних до інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності підрозділів університету.

Серед усіх документів, що формуються в сучасному ЗВО, найбільш складним за кількістю даних і процесом їх підготовки є додаток до диплому про вищу освіту європейського зразка. Це обумовлено тим, що в цьому документі акумулюються дані за увесь період навчання здобувача вищої освіти, для його формування потрібен значний обсяг вхідних даних і багато часу на їх опрацювання.

Модель наповнення ІАСПОД даними для формування додатка до диплома зображено на рисунку 1.

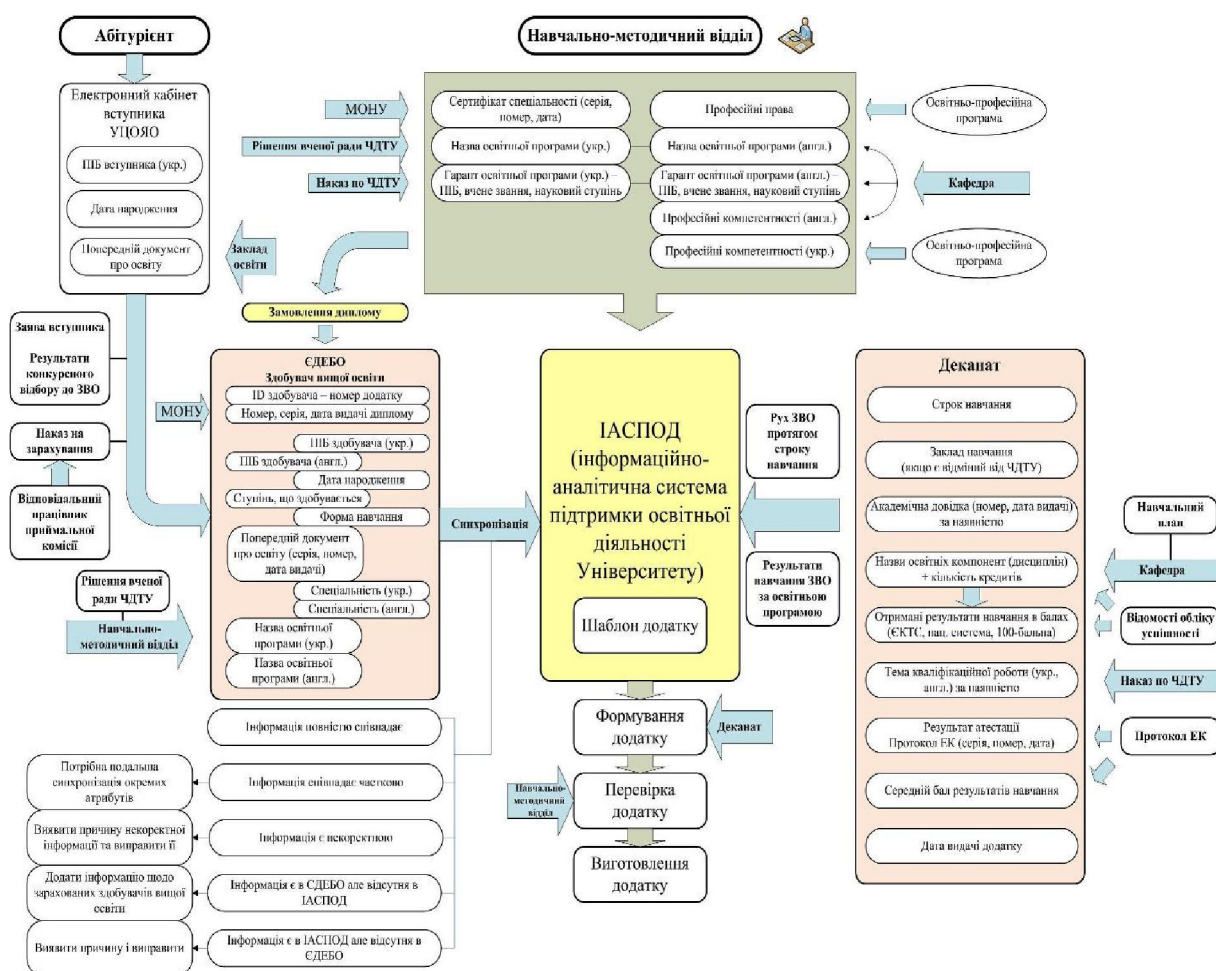


Рисунок 1 – Модель наповнення ІАСПОД даними для формування додатка до диплома ЗВО

Для побудови моделі було проаналізовано накази МОНУ № 525 від 12.05.2015 та № 701 від 22.06.2016, в яких визначається перелік даних, що наводяться у додатку, затвер-

джено опис документів про вищу освіту (наукові ступені) державного зразка та додатків до них. Було також проаналізовано «Рекомендації щодо заповнення Додатка до диплома про

вищу освіту у вищих навчальних закладах України», яких необхідно дотримуватись при формуванні додатка. Зазначені рекомендації розроблено відповідно до рекомендацій Європейської комісії, Ради Європи і ЮНЕСКО/СЕПЕС щодо оформлення додатка до диплома європейського зразка.

Було визначено інформаційні сутності й атрибути, потрібні для формування додатка, та джерела внесення інформації для кожного розділу додатка: інформація про випускника ЗВО, інформація про здобуту спеціальність, про рівень вищої освіти, інформація про зміст та результати освітньої діяльності, інформація про академічні та професійні права, додаткова інформація, засвідчення додатка до диплома.

Було розроблено алгоритм формування інформаційного наповнення бази даних системи та інших дій для формування додатка до диплома. Алгоритм включає 14 основних

кроків, що виконуються працівниками деканатів та навчально-методичного відділу.

Проектування. До основних функціональних можливостей розробленої системи відносяться: збирання і накопичення первинних особових даних про здобувачів вищої освіти; формування академічних груп; формування особових (навчальних) карток студентів; формування документів, пов'язаних з освітнім процесом (залікові та екзаменаційні відомості, академічні довідки тощо); формування звітних і зведених документів (семестрові, річні та загальні зведені відомості про успішність, додатки до дипломів, виписки в особові справи); архівування даних про випускників ЗВО, підготовка аналітичних даних стосовно успішності студентів, формування стипендіального рейтингу студентів. На рисунку 2 представлено структурну схему ІАС-ПОДСП ЗВО.

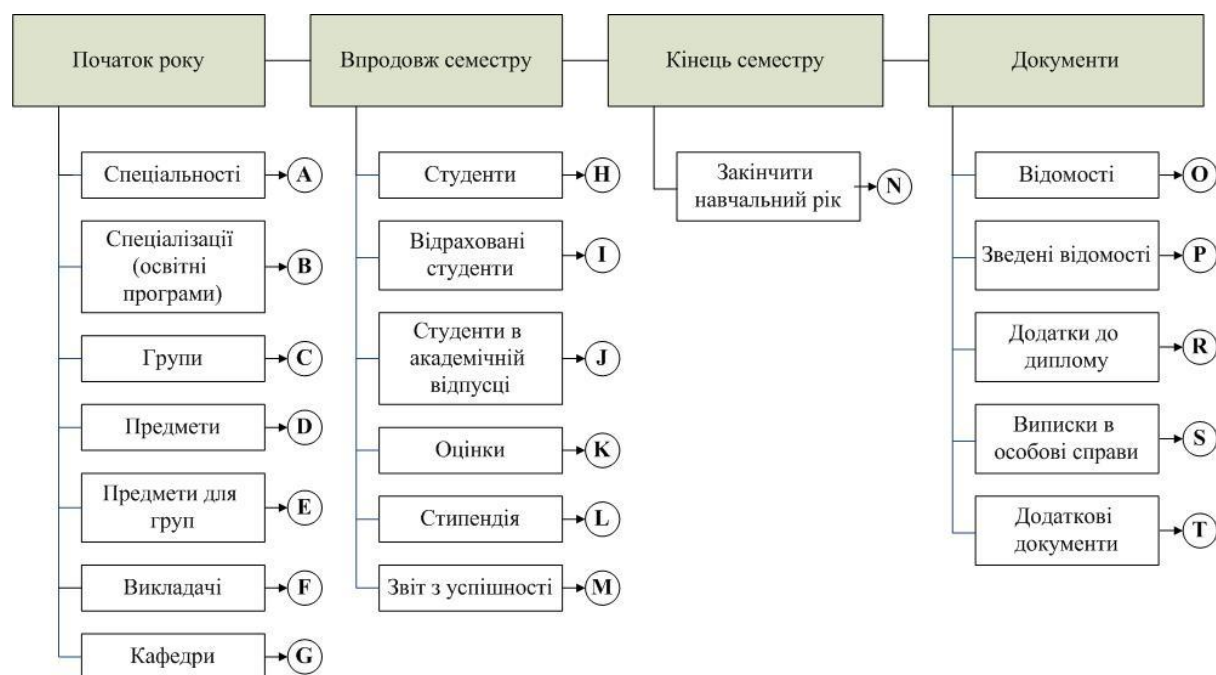


Рисунок 2 – Структурна схема ІАС підтримки освітньої діяльності підрозділів ЧДТУ

Основний інтерфейс програми складається з чотирьох основних меню, які логічно відображають чотири базові структурні модулі системи: «Початок року», «Впродовж семестру», «Кінець семестру» та «Документи». Кожний розділ має підмодулі, які відображають в цілому майже увесь організаційний процес діяльності деканату факультету (кожен із підмодулів позначено окремою буквою). На рисунках 3–6 як приклад подано структуру підмодулів А, В, С, D, E, F, G, H.

Розглянемо детальніше підмодуль Н модуля «Студенти», який є одним із найважливіших підмодулів системи (рисунки 6). Він дає можливість працювати з усією інформацією, що стосується здобувача вищої освіти: з особистими даними (ПІБ студента українською та англійською мовами, дата народження, стать, адреса проживання, контактні дані тощо), з інформацією про освітню діяльність (освітній рівень, спеціальність, освітня програма, академічна група, номер і дата наказу на зарахування, тема кваліфікаційної роботи

обома мовами, відомості щодо проведення атестації, попередній документ про освіту тощо), проводити різні бізнес-дії, що відображаються на даних про студентів чи пов'язані з ними інформації.

Цей підмодуль дає можливість вносити інформацію про переведення студента в іншу академічну групу, про зарахування в групу,

відрахування його чи переведення на іншу спеціальність, а також сформувати випику із залікової книжки студента, зокрема, перед проведенням атестації. Також цей підмодуль дає змогу швидко знайти студента в загальному списку. Дані, що формуються за допомогою цього підмодуля, є основою бази даних усієї інформаційної системи.

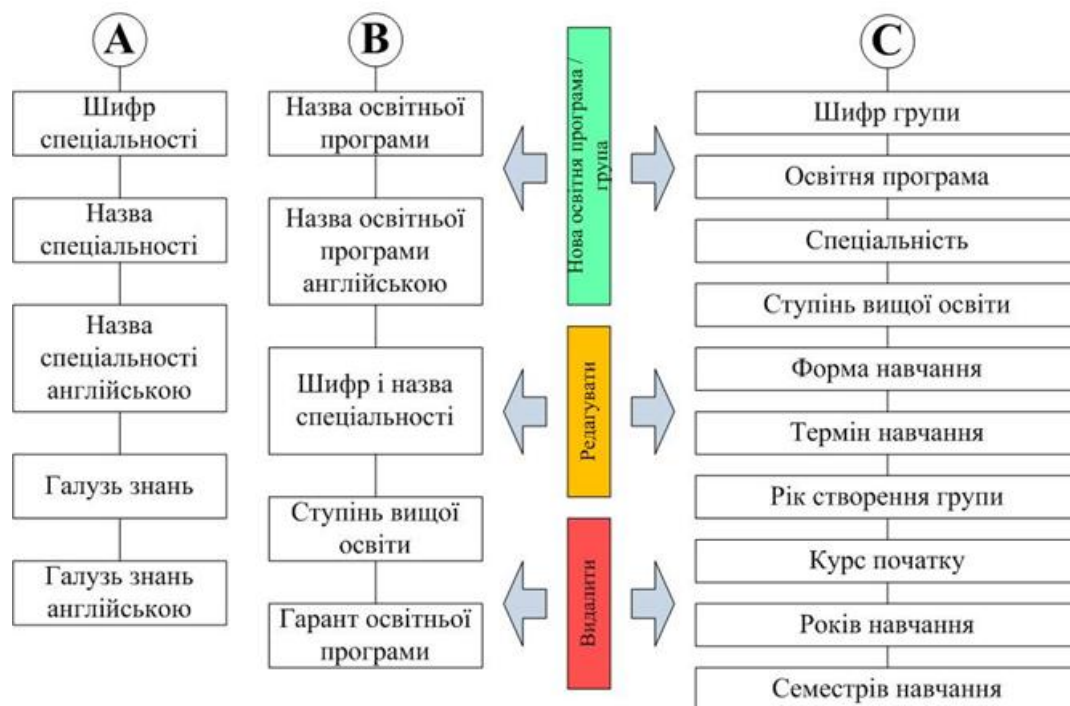


Рисунок 3 – Структура підмодулів А, В, С модуля «Початок року»

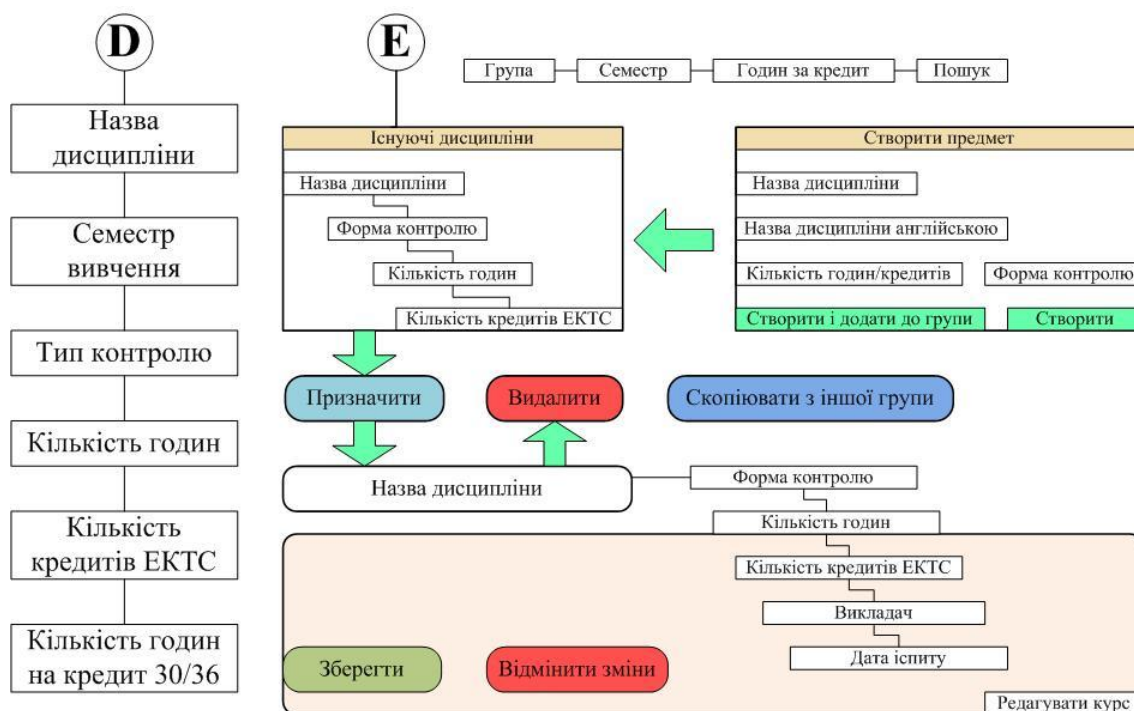


Рисунок 4 – Структура підмодулів D, E модуля «Початок року»

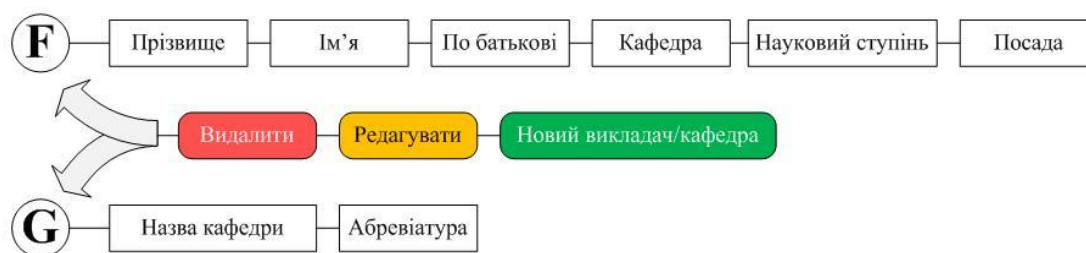


Рисунок 5 – Структура підмодулів F, G модуля «Початок року»

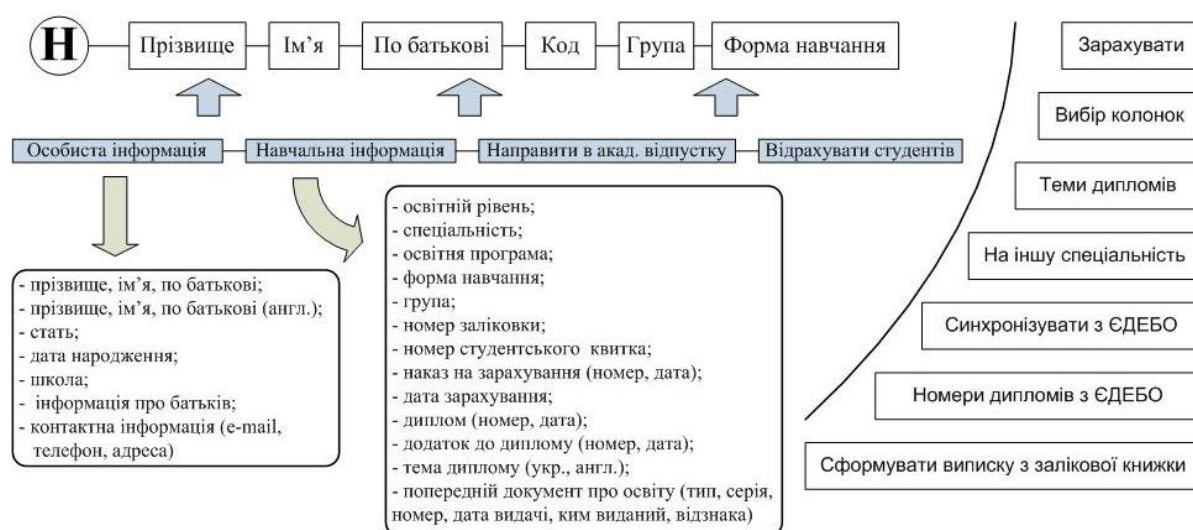


Рисунок 6 – Структура підмодуля Н модуля «Студенти»

Спроектвана структура основних модулів і підмодулів веб-орієнтованої інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності університету дає можливість автоматизувати процес діяльності працівників деканату факультету ЗВО, зокрема в частині формування основних документів з організації освітнього процесу та документів про вищу освіту.

Розробка. ІАСПОД структурних підрозділів ЗВО, що розробляється, є веб-орієнтованою системою, побудованою за клієнт-серверною технологією. Тому програмне забезпечення системи складається з серверної частини, що побудована на основі мови програмування Java та каркасу Spring Framework, і клієнтської частини, що побудована на основі мови програмування JavaScript та каркасу Angular.

Для тестування клієнтської частини програми було використано програми: Postman, Swagger, Mozilla Firefox. Як IDE було використано програми IntelliJ IDEA і Webstorm.

Для збереження даних під час роботи веб-додатка використано об'єктно-реляційну систему керування базами даних PostgreSQL.

Ці засоби розробки було обрано за рекомендацією ІТ-фахівців з компанії-кураторів проекту. Мови програмування JavaScript та Java є найпопулярнішими серед використовуваних у промисловій розробці програмного забезпечення ІТ-компаніями [15]. Spring Framework та Angular – серед найпопулярніших фреймворків для Java і фронтенд-розробки, що постійно розвиваються та вдосконалюються. PostgreSQL є найпопулярнішим сервером баз даних у світі серед продуктів open source.

Принциповим питанням у рамках розробки було використання актуальних сучасних технологій проектування і створення інформаційних систем, що використовуються ІТ-компаніями в їх проектах. Такий підхід дає студентам можливість набутися в рамках навчання в університеті таких умінь і навичок, які дають їм змогу легко увійти в роботу на першому робочому місці в ІТ-компаніях. Важливим є вироблення у студентів не лише умінь і навичок, що безпосередньо стосуються програмування, а й умінь із супутніх технічних дисциплін, пов'язаних з промисловою розробкою програмного забезпечення, а також галузі управління проектом, взаємодії та комунікації

в команді. Для участі у розробці системи студент повинен володіти (оволодіти) багатьма поняттями, принципами, технологіями, засобами, що використовуються в промисловому програмуванні при побудові веб-систем (основні з них відображені в таблиці 1).

Розробка проєкту поділена на ітерації (спринти), кожен з яких триває три тижні. Вимоги формуються на основі використання методології «User Story». Кожна User story являє собою частину роботи, що може бути виконана впродовж не більше, ніж однієї ітерації та має певну цінність для користувача.

На початку кожного спринта команда розробників проводить Planning meeting, де визначаються та обираються User story, що реалізовуватимуться в цьому спринті. Впродовж спринта розробники тісно спілкуються між собою. В кінці кожного спринта проводиться «демо» – презентація зробленого в рамках спринта, на якому обов'язково присутні потенційні користувачі системи. В рамках демо-презентації проводяться дискусії розробників із користувачами стосовно того, як зробити систему кращою.

Таблиця 1 – Перелік і структура технологій, що використовуються в проєкті

База даних	Зв'язок База даних– Бекенд	Бекенд	Зв'язок Бекенд– Фронтенд	Фронтенд	Репозиторій	Процес розробки
PostgreSQL DB Trigger	Flyway Spring JPA Hibernate	Java Spring Fmwork MVC Gradle Docx4j DTO Lombok Spring Boot Spring Security Logging Jetty Swagger	OOP AJAX REST Unit test CORS JSON cmd CI/CD Staging Amazon Cloud Integration Test	HTML CSS Bootstrap JavaScript NodeJS TypeScript Angular Swimlane	Git Github	Agile SCRUM User story Issue Pull request Slack

Результати досліджень. У результаті дворічної роботи в рамках НДР і ДКР № 0118U002315 було розроблено та впроваджено базові модулі ІАС, які автоматизують більшість задач з обробки інформації, що виконуються деканатами, зокрема дають можливість вводити дані, перевіряти дані на коректність, формувати 16 видів документів різної складності, проводити аналіз навчальних здобутків студентів, а також деякі функції навчально-методичного відділу.

Розроблена ІАС підтримки освітньої діяльності нині є офіційною в ЧДТУ інформаційною системою, яка використовується підрозділами університету для обробки інформації, що стосується освітньої діяльності в університеті. Вона згадується в нормативних документах ЧДТУ, зокрема «Положенні про порядок формування індивідуального навчального плану здобувача вищої освіти Черкаського державного технологічного університету» [18] та «Положенні про порядок замовлення, виготовлення, видачі та обліку документів про вищу освіту» [19].

Нині ІАСПОДСП впроваджена в усіх деканатах факультетів та в навчально-методичному відділі ЧДТУ і забезпечує автоматизацію більшості задач щодо опрацювання даних, з якими працюють ці підрозділи.

Перспективи дослідження. Система, що розробляється, постійно вдосконалюється та розширюється. Найближчими задачами, які ставляться перед розробниками, є завершення розробки функціоналу, що потрібен деканатам, покращення внутрішньої структури системи, а також розширення функцій системи для нових користувачів.

Серед функцій деканатів, які не було інформатизовано, є дві великі, що мають бути реалізовані власними модулями: формування наказів та робота з дисциплінами за вибором студентів.

Формування наказів – об'ємна та складна функція, адже: 1) є багато видів наказів і вони включають багато варіацій поєднання даних; 2) потрібно забезпечити історію створення та підписання наказів з урахуванням

того, що форма може змінюватись; 3) потрібно вносити суттєві зміни в базу даних і, відповідно, забезпечити міграцію даних, що стосуються наказів, зі старої структури в нову; 4) потрібно переробити всі частини програми, в яких відбувається робота з даними наказів, під нову структуру бази даних. Робота з розроблення цього модуля вже розпочалась. Було сформовано зміни до структури бази даних і створено каркас серверної та клієнтської частин програмного забезпечення. На наступному етапі планується повністю розробити та впровадити цей модуль.

Робота з інформацією, що стосується дисциплін за вибором студентів, – це задача, пов'язана з впровадженням в ЧДТУ нової системи вибору вибірових предметів студентами, яка дає їм можливість будувати індивідуальну траєкторію навчання. Побудова модуля вибірових дисциплін – складна і об'ємна задача, тому що: 1) ця новація – це суттєва зміна в предметній галузі, що значною мірою змінює навіть сенс деяких сутностей, таких, наприклад, як група студентів; у свою чергу, це незмінно приведе до зміни в модулях предметної галузі та, відповідно, до зміни структури бази даних; 2) змінюється принцип належності студентів до певного факультету – це приведе до необхідності значних змін у системі авторизації прав працівників деканатів; 3) будуть необхідними суттєві зміни в уже наявний функціонал: для деяких модулів – універсалізація, для інших потрібно буде розробляти паралельні модулі для роботи з вибіровими дисциплінами.

Було зроблено перший крок у реалізації цього модуля – розроблено модуль додавання вибірових дисциплін і функцію формування індивідуального навчального плану студента. Також було започатковано паралельний проєкт – побудова мобільного додатка для студента ЧДТУ, який, зокрема, реалізує функцію запису студента на вибірові дисципліни.

Висновки. Цифровізація вищої освіти є сучасним етапом її інформатизації, що передбачає насичення інформаційно-освітнього середовища електронно-цифровими пристроями, засобами, системами та налагодження електронно-комунікаційного обміну між ними і вимагає докорінних змін у технології, культурі й операціях в організації освітнього процесу університетів та принципах і формах надання традиційних і створення нових освітніх послуг. Проведений у рамках дослідження аналіз інформаційних освітніх систем у різних

ЗВО України та зарубіжжя показав, що існують проблеми щодо моделювання, проєктування, створення і впровадження інформаційних аналітичних систем управління освітнім процесом ЗВО на основі сучасних наукових підходів та інформаційних технологій, які задовольняють вимогам цифрової трансформації вищої освіти.

У роботі обґрунтовано необхідність використання системного підходу до моделювання, проєктування, побудови та підтримки такої складної системи, як інформаційно-аналітична система підтримки освітньої діяльності структурних підрозділів ЗВО, особливо в умовах швидких змін у предметній галузі вищої освіти. Визначено основні вимоги до ефективної розробки та впровадження таких систем. При розробці інформаційно-аналітичної системи підтримки освітньої діяльності ЧДТУ на основі сучасних технологій проєктування і веб-програмування було забезпечено реалізацію зазначених вище характеристик таких систем.

Наукова новизна дослідження полягає у побудові моделей наповнення ІАСПОД даними для формування вихідної документації про освітню діяльність студентів, зокрема додатків до диплому європейського зразка, а також побудові моделей бізнес-процесів, що відбуваються в освітньому середовищі ЗВО, на основі цілеспрямованого і комплексного використання сучасних підходів і технологій проєктування, створення і впровадження веб-орієнтованої інформаційної системи управління в діяльність ЗВО.

Практична значущість отриманих результатів полягає у проєктуванні й розробці основних модулів ІАСПОДСП ЗВО та їх впровадженні у діяльність ЧДТУ, а також у створенні умов, що дають можливість студентам комп'ютерних спеціальностей здобути досвід у розробці реальної інформаційної системи з використанням новітніх технологій побудови таких систем, підвищити рівень їх професійної підготовки і конкурентоспроможність на ринку праці в ІТ-галузі.

На наступному етапі розробки планується розширити функції системи з метою її використання іншими користувачами, для вирішення задач, які є дотичними до освітньої діяльності університету. Зокрема, планується завершити розробку функцій для працівників навчально-методичного відділу, а також розробити функціонал для автоматизації діяльності викладачів та інформаційного забезпе-

чення студентів. Ще однією важливою задачею наступного етапу є інтеграція системи з іншими інформаційними системами, що забезпечують освітній процес в університеті. На цей час система частково інтегрована з ЄДЕ-БО. На порядку денному стоїть задача інтеграції з системою підтримки дистанційного навчання на платформі Moodle, системами обліку наукових досягнень, системою електронного документообігу.

Систему, що розробляється, можна віднести до розряду інформаційних систем керування університетом, проте вона здійснює автоматизацію управління лише основного виду діяльності ЗВО – освітнього процесу, не торкаючись таких аспектів управління, як фінансова чи господарська діяльність, облік та управління матеріальними ресурсами тощо. Тому надалі буде проводитися робота щодо інтеграції ІАСПОДСП з відповідними інформаційними системами.

Список використаних джерел

- [1] Navitas Ventures, *Digital Transformation in Higher Education*, 2017. Available: https://www.navitasventures.com/wp-content/uploads/2017/08/HE-Digital-Transformation-Navitas_Ventures_-EN.pdf
- [2] Михайло Топузов, "Інформаційно-освітнє середовище навчальних закладів. Проектування відповідно до вимог сучасного суспільства", *Директор школи*, № 9-10 (825-826), с. 17-25, 2018. Available: <http://lib.iitta.gov.ua/710963/1/dyg-2018-009-block-17-25.pdf>
- [3] А. А. Тимченко, Ю. В. Триус, І. В. Стеценко та ін., *Інформаційно-аналітична система контролю і оцінювання навчальних досягнень студентів ВНЗ*: монографія. Черкаси: МакЛаут, 2010.
- [4] Yu. Tryus, I. Stetsenko, and I. Herasymenko, "Information-analytical learning management system universities", *Information Technologies in Education*, no. 29, pp. 15-30, 2016.
- [5] Н. В. Бугас, та О. О. Коваленко, "Інформаційна система як умова ефективних управлінських рішень", *Ефективна економіка*, № 12, 2016. Available: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5313>
- [6] О. В. Співаковський, Я. Б. Федорова, О. О. Глущенко, та Н. А. Кудас, *Управління інформаційними технологіями вищих навчальних закладів*: навч. посіб. Херсон: Айлант, 2010.
- [7] М. С. Львов, О. В. Співаковський, та Д. Є. Щедролосьєв, "Інформаційна система управління вищим навчальним закладом як платформа реалізації управління академічним процесом", *Вісник Харківського університету. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*, № 1, с. 1-21, 2012.
- [8] В. Г. Гриценко, *Організаційно-педагогічні засади створення і впровадження web-орієнтованої інформаційно-аналітичної системи управління університетом*: монографія. Черкаси: ЧНУ ім. Б. Хмельницького, 2016.
- [9] Д. Ю. Столяров, "Использование автоматизированных систем управления в деятельности учреждений высшего профессионального образования в Российской Федерации (аналитический обзор)", А. Н. Тихонова, ред. Москва: ФГУ ГНИИ ИТТ "Информика", 2009. Available: <http://window.edu.ru/app.php/resource/945/68945>
- [10] Harald Gilch, Anna Sophie Beise, René Krempkow, Marko Müller, Friedrich Stratmann, and Klaus Wannemacher, "Survey on the Status of Digitization at German HEI", *European Journal of Higher Education IT*, no. 1, 2020. Available: https://www.eunis.org/download/2020/EUNIS_2020_paper_82.pdf
- [11] Pekka Kähkipuro, "IT strategy in the era of digital transformation: Case higher education", *European Journal of Higher Education IT*, no. 1, 2019.
- [12] M. Elhoseny, N. Metawa, and A. E. Hassani, "An automated information system to ensure quality in higher education institutions", in *12th Int. Computer Engineering Conf. (ICENCO)*, Cairo, 2016, pp. 196-201.
- [13] А. А. Тимченко, и А. А. Родионов, *Основы информатики системного проектирования объектов новой техники*. Киев: Наук. думка, 1991.
- [14] М. З. Згуровский, и Н. Д. Панкратова, *Системный анализ. Проблемы, методология, приложения*. Киев: Наук. думка, 2005.
- [15] *Рейтинг мов програмування 2020*. Available: <https://dou.ua/lenta/articles/language-rating-jan-2020/>

- [16] J. Sutherland, *Scrum the Art of Doing Twice the Work in Half the Time*. New York: Random House, 2014.
- [17] Роман Пихлер, *Управление продуктом в Scrum. Agile-методы для вашего бизнеса*; пер. с англ. А. Коробейникова. Москва: Манн, Иванов и Фербер, 2017.
- [18] Положення про порядок формування індивідуального навчального плану здобувача вищої освіти Черкаського державного технологічного університету. Черкаси, 2020. Available: <https://docs.google.com/file/d/1UYGhcf6Kqau7ErcDOTgA4R6q5WHzjVZw/view>
- [19] Положення про порядок замовлення, виготовлення, видачі та обліку документів про вищу освіту. Черкаси, 2019. Available: <https://drive.google.com/file/d/0B9liSQ0oKS8XdDIFZEVZcTI2QzVwV2cwODNEd1ITdjMxZlZF/view>
- [7] M. S. Lvov, O. V. Spivakovsky, and D. Ye. Shchedrolov, "Information system of management by higher educational institution as a platform for realization of academic process management", *Visnyk Kharkivskoho universytetu. Seriya: Matematychni modeliuvannia. Informatsiini tekhnologii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia*, no. 1, pp. 1-21, 2012 [in Ukrainian].
- [8] V. G. Grytsenko, *Organizational and pedagogical principles of creation and implementation of university management web-oriented information-analytical system*: monograph. Cherkasy: ChNU im. B. Khmelnytskoho, 2016 [in Ukrainian].
- [9] D. Yu. Stolyarov, "The use of automated control systems in the activities of institutions of higher professional education in Russian Federation (analytical review)", In A. N. Tikhonova, Ed. Moscow: FHI GNII ITT "Informika", 2009. Available: <http://window.edu.ru/app.php/resource/945/68945>
- [10] Harald Gilch, Anna Sophie Beise, René Krempkow, Marko Müller, Friedrich Stratmann, and Klaus Wannemacher, "Survey on the Status of Digitization at German HEI", *European Journal of Higher Education IT*, no. 1, 2020. Available: https://www.eunis.org/download/2020/EUNIS_2020_paper_82.pdf
- [11] Pekka Kähkipuro, "IT strategy in the era of digital transformation: Case higher education", *European Journal of Higher Education IT*, no. 1, 2019.
- [12] M. Elhoseny, N. Metawa, and A. E. Hassani, "An automated information system to ensure quality in higher education institutions", in *12th Int. Computer Engineering Conf. (ICENCO)*, Cairo, 2016, pp. 196-201.
- [13] A. A. Tymchenko, and A. A. Rodionov, *Fundamentals of computer science system design objects of new equipment*. Kiev: Nauk. dumka, 1991 [in Russian].
- [14] M. Z. Zgurovsky, and N. D. Pankratova, *System analysis. Problems, methodology, applications*. Kiev: Nauk. dumka, 2005 [in Russian].
- [15] *Programming Languages Rating 2020*. Available: <https://dou.ua/lenta/articles/language-rating-jan-2020/>
- [16] J. Sutherland, *Scrum the Art of Doing Twice the Work in Half the Time*. New York: Random House, 2014.

References

- [1] Navitas Ventures, *Digital Transformation in Higher Education*, 2017. Available: https://www.navitasventures.com/wp-content/uploads/2017/08/HE-Digital-Transformation-Navitas_Ventures_EN.pdf
- [2] Mykhailo Topuzov, "Information and educational environment of educational institutions. Design in accordance with the requirements of modern society", *Dyrektor shkoly*, no. 9-10 (825-826), pp. 17-25, 2018. Available: <http://lib.iitta.gov.ua/710963/1/dyg-2018-009-block-17-25.pdf>
- [3] A. A. Tymchenko, Yu. V. Tryus, I. V. Stetsenko et al., *Information-analytical system of control and evaluation of university students academic achievements*: monograph. Cherkasy: McLaut, 2010 [in Ukrainian].
- [4] Yu. Tryus, I. Stetsenko, and I. Herasymenko, "Information-analytical learning management system universities", *Information Technologies in Education*, no. 29, pp. 15-30, 2016.
- [5] N. V. Bugas, and O. O. Kovalenko, "Information system as a condition for effective management decisions", *Efektivna ekonomika*, no. 12, 2016. Available: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5313>
- [6] O. V. Spivakovsky, Ya. B. Fedorova, O. O. Glushchenko, and N. A. Kudas, *Management by information technologies of higher educational institutions*. Kherson: Ailant, 2010 [in Ukrainian].

- [17] Roman Pichler, *Product Management in Scrum. Agile Methods for Your Business*, In A. Korobeinikova, Transl. from Eng. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber, 2017 [in Russian].
- [18] Regulations on the procedure for forming an individual curriculum for a higher education applicant at Cherkasy State Technological University. Cherkasy, 2020. Available: <https://docs.google.com/file/d/1UYGhcf6Kqau7ErcDOTgA4R6q5WHZjVZw/view>
- [19] Regulations on the order, preparation, issuance and accounting of documents on higher education. Cherkasy, 2019. Available: <https://drive.google.com/file/d/0B9liSQ0oKS8XdDlFZEVZcTI2QzVwV2cwODNEd1ITdjMxZlZF/view>

Yu. V. Tryus, *Doctor of Pedagogical Science, professor*,
e-mail: tryus@chdtu.edu.ua

H. O. Zaspа,
e-mail: g.zaspa@chdtu.edu.ua

O. S. Kozhemiakin,
e-mail: a.kozhemiakin71@gmail.com

A. V. Ashyrova
e-mail: a.ashyrova@chdtu.edu.ua

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

INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR EDUCATIONAL ACTIVITIES SUPPORT OF STRUCTURAL DIVISIONS OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

The article is devoted to the problems of development and implementation of information systems to support educational activities of higher education institutions in the context of digital transformation. It is shown that the current scientific and practical problem for higher education institutions consists in the creation of web-based information-analytical systems to support educational activities of structural units of higher education institutions as integrated systems able to solve a wide range of information processing and decision-making problems and interact with them in real time.

Based on the analysis of domestic and foreign experience, technical and functional requirements for such systems are determined, the need for integrated use of system, process and design approaches in their design, creation and implementation is substantiated.

The research goal is the automation of information processing related to the organization of the educational process by university educational units, unification of electronic document management processes at the university, ensuring its statistical reporting and support of management decisions based on students performance data analysis by developing web-oriented information-analytical system within the framework of concentric information technology.

The paper proposes a model of filling the system database with information for the formation of initial documentation on student educational activities, in particular European standard diploma supplements. The business processes taking place in the university educational environment are also modeled and designed.

The key stages of information-analytical system of educational activities of higher education institutions structural divisions and its basic modules support creation, such as: modeling, designing and development, and also features of their implementation by university itself with involvement of IT companies professionals as moderators, are considered.

On the basis of purposeful and complex use of modern approaches and design and programming technologies the basic modules of the web-oriented information-analytical system for educational activities support of higher education institution which are introduced in the activities of structural divisions of Cherkasy State Technological University are created.

Keywords: digital transformation, higher education, web-oriented information system, modeling, design, system approach.

УДК 004.023

[0000-0002-2180-0969] Р. Л. Пташкін,
[0000-0001-5320-3432] О. О. Гожий,
[0000-0002-7451-8772] Ю. Ю. Обруч,
[0000-0002-4937-747X] В. В. Павлов,
[0000-0003-0008-741X] Р. А. Калініченко
e-mail: ndekc.ck@gmail.com

Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України
вул. Пастерівська, 104, м. Черкаси, Україна

АНАЛІЗ ОПЕРАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ ЯК ОДИН ІЗ МЕТОДІВ ПРОВЕДЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ТЕХНІЧНИХ КРИМІНАЛІСТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Підходи та методи сучасної комп'ютерної криміналістики зазвичай оминають такий напрям досліджень, як аналіз оперативної пам'яті. Варто зауважити, що інформаційний вміст оперативної пам'яті працюючої операційної системи є досить цікавим об'єктом дослідження, оскільки може містити не тільки інформацію про роботу системи чи окремих процесів, а й відомості про авторизаційні дані чи ключі шифрування інформації.

Аналіз системної пам'яті як окремих метод криміналістики загалом вимагає вирішення деяких проміжних питань, зокрема вибору інструменту для отримання її вмісту та засобу для дослідження створеного знімка. Ця робота має на меті вирішення зазначених питань. Аби аргументовано здійснити вибір того чи іншого засобу, в роботі проведено деяку апробацію програмного забезпечення та аналіз отриманих результатів.

Ключові слова: віртуалізація, VirtualBox, дамп пам'яті, RAM, volatility.

Вступ. У сучасному світі невинно зростає вплив цифрових технологій на повсякденне життя – наразі під керуванням операційних систем знаходяться не тільки персональні комп'ютери чи спеціалізоване обладнання, а й пристрої звичного нам побуту.

Наприклад, таке звичне нам обладнання, як телевізор за допомогою персонального комп'ютера базового рівня, операційної системи сімейства Linux та програмного засобу на кшталт Kodi можна перетворити на повноцінний медіацентр. Також як окремих приклад можна розглянути використання в системах розумного будинку одноплатних комп'ютерів на кшталт Raspberry Pi.

В обох випадках навіть мінімальні апаратні засоби знаходяться під керуванням повноцінної операційної системи сімейства Linux, яка зазвичай не має кардинальних відмінностей від систем, що застосовуються на більш «серйозному» обладнанні.

Разом зі значним розповсюдженням як операційних систем загалом, так і окремих програмних засобів значно збільшилася кількість випадків неправомірного втручання в їх роботу [1], [2]. Дедалі частіше судовим експертам за напрямом комп'ютерно-технічних досліджень потрібно проводити

дослідження специфічних програмних засобів, що зазвичай класифікуються як шкідливі чи небезпечні.

Деякі програмні засоби в ході своєї роботи можуть породжувати певні процеси, створювати файли чи записи реєстру, встановлювати додаткові бібліотеки чи навіть окреме програмне забезпечення [3]. Зазвичай така інформація не зберігається в енергонезалежну пам'ять, а натомість записується в тимчасову. Іноді після виконання необхідних операцій навіть безпосередні програмні засоби самознищуються чи кардинально модифікують себе [4]. Такі дії виконуються з єдиною метою – значно ускладнити проведення аналізу роботи певних засобів, приховати комп'ютерну програму загалом чи певні її функціональні можливості [5].

Проведення дослідження програмного забезпечення, яке або самовидається, або розміщується в тимчасовій пам'яті, вимагає від судового експерта застосування кардинально нових методів дослідження. Адже класичні методи, як-от дослідження образу носія цифрової інформації, зазвичай не містять інформації про роботу певних програмних засобів. Прямим дослідженням інформаційного вмісту носія інформації іноді можливо встановити

лише факт наявності програмних засобів, але не факт їхнього використання.

Криміналістичні методи дослідження передбачають спочатку виконання процедур з отримання знімків даних, а потім їх опрацювання в автономному режимі. Зазвичай знімки енергонезалежних даних називають образами носіїв цифрової операції, а знімки системної пам'яті – дампами оперативної пам'яті.

Під автономним режимом варто розуміти можливість проведення аналізу та опрацювання інформації в тому чи іншому вигляді на будь-якому іншому обладнанні без наявності джерела цієї інформації.

Дослідження оперативної пам'яті дає можливість не тільки отримати доступ до даних, які не зберігаються на енергонезалежних носіях інформації, а й провести дослідження «в динаміці». Тобто, по чергово створюючи дампи пам'яті, можна проаналізувати, як змінюється та чи інша інформація.

Однак створення дампа оперативної пам'яті не є тривіальним завданням. Варто взяти до уваги той факт, що досліджуване програмне забезпечення зазвичай має функції захисту від аналізу – якщо в системі буде виявлено активний програмний засіб для аналізу (ProcMon, Wireshark тощо), то процес може як зупинити своє виконання, так і зупинити операційну систему загалом. Тобто застосування спеціалізованого програмного забезпечення, яке створює дампи оперативної пам'яті системи, виконуючись у цій же системі, фактично є нецільовим.

Доцільніше розміщувати образ досліджуваного носія інформації у віртуальному середовищі та запускати систему в рамках віртуальної машини. Використання окремої віртуальної машини дасть можливість здійснити дослідження оперативної пам'яті системи без інсталяції додаткових інструментів аналізу та нівелювати майже будь-який захист від здійснення аналізу [7].

У процесі підготовки до проведення аналізу дампа пам'яті варто враховувати той факт, що деякі дані можуть знаходитися в області віртуальної пам'яті – своєї. Адже менеджер віртуальної пам'яті працює таким чином, що на диск потрапляє та інформація, котра не вимагає негайної обробки. Тобто аналіз лише дампа оперативної пам'яті не гарантує повноти й об'єктивності такого дослідження, оскільки недослідженою залишиться інформація про процеси, для яких

було встановлено низький пріоритет [8]. Однак ця проблема загалом вирішується в процесі налаштування віртуального середовища. Щоб система не використовувала своїх, достатньо виділити віртуальній машині достатню кількість оперативної пам'яті [10].

Наступним питанням, що виникне після отримання дампа оперативної пам'яті, є питання вибору інструменту для проведення аналізу та узагальнення отриманих даних. Вирішення цього питання може бути ключовим для всього дослідження, адже вибір інструменту аналізу повністю залежить від досліджуваної системи та поставленого завдання.

Аналіз останніх досліджень. Аналізуючи останні дослідження за напрямом отримання знімків та безпосереднього дослідження оперативної пам'яті, варто виділити роботи Abhijit Mohanta [4], Reginald Wong [7], Bruce Dang [9], Майкла Сікорські [10], Монаппи [11] та Michael Hale Ligh [15] як найбільш інформативні та різносторонні. Науковцями запропоновано різні програмні засоби як для прямого отримання дампов оперативної пам'яті, так і за допомогою середовища віртуалізації. Також розглянуто деякі програмні рішення для здійснення аналізу отриманих знімків.

У роботі Abhijit Mohanta [4] детально розглянуто програмні рішення для отримання доступу до оперативної пам'яті з гостьової операційної системи. Натомість у роботах Reginald Wong [7] та Майкла Сікорські [10] надано важливі зауваження щодо можливого спотворення дампа оперативної пам'яті при прямому дослідженні, адже деяке програмне забезпечення може фіксувати роботу засобів аналізу та маскуватися чи припиняти свою роботу. Дослідження, описані в роботі Michael Hale Ligh [15], дають змогу повною мірою ознайомитися з деякими засобами аналізу оперативної пам'яті.

Спираючись на роботи [4], [7] та [15], можна стверджувати, що оперативна пам'ять містить структури даних та відомості про процеси, які працюють у системі, – віртуальну пам'ять усіх процесів, віртуальну пам'ять ядра, дескриптори, мережеві з'єднання та інші ресурси, які нині використовуються активними процесами.

З роботи [6] відомо, що для здійснення повного та об'єктивного криміналістичного аналізу судовому експертові необхідно мати

доступ як до енергонезалежної пам'яті, так і до тимчасової. Тут важливо зазначити, що під тимчасовою пам'яттю варто розуміти не тільки тимчасові файлові системи, що зазвичай розміщуються в оперативній пам'яті, а оперативну пам'ять загалом, як це зазначено в [4] та [8].

Загалом інформація, отримана з вищезазначених робіт, вимагає узагальнення та формування на її основі певного єдиного алгоритму чи методики дослідження оперативної пам'яті для їх застосування в комп'ютерній криміналістиці.

Метою дослідження є висвітлення питання криміналістичного аналізу оперативної пам'яті як одного з методів пошуку та виявлення відомостей, цінних у комп'ютерній криміналістиці, оскільки саме системна пам'ять іноді містить критично важливі відомості, як-от ключі шифрування енергонезалежних носіїв інформації чи виконувани фрагменти коду тощо. Опрацювання алгоритму фіксування пам'яті системи та аналізу її вмісту може стати безцінним ресурсом серед можливостей цифрової криміналістики.

До основних завдань роботи варто віднести опрацювання питання створення дампу оперативної пам'яті та питання вибору й застосування програмних засобів аналізу отриманої інформації.

Виклад основного матеріалу необхідно розпочати з вирішення питання створення дампа оперативної пам'яті. Як вже раніше зазначалось у вступній частині, аби мінімізувати вплив внутрішніх процесів операційної системи чи її програмного забезпечення, доцільно розмістити образ досліджуваного носія інформації у віртуальному середовищі та здійснювати завантаження у рамках віртуальної машини.

Загалом поняття віртуалізації – це надання набору обчислювальних ресурсів або їх логічного об'єднання, абстрагованих від апаратної реалізації, та водночас таких, що забезпечують логічну ізоляцію обчислювальних процесів, які виконуються на одному фізичному ресурсі.

Також визначимо поняття гіпервізора – комп'ютерної програми, що забезпечує одночасне і паралельне виконання декількох віртуальних машин на одному фізичному комп'ютері [6]. Саме гіпервізор забезпечує взаємну ізоляцію операційних систем, що виконуються на віртуальних машинах, шля-

хом розділення фізичних та логічних пристроїв між декількома віртуальними машинами.

Враховуючи вищезазначені поняття, можна визначити, що віртуальною машиною є модель обчислювальної машини, створеної шляхом віртуалізації обчислювальних ресурсів: процесора, оперативної пам'яті, пристроїв зберігання та вводу і виводу інформації. Віртуальна машина, на відміну від програми емуляції певного пристрою, забезпечує повну емуляцію фізичної машини.

Обираючи гіпервізор, важливо мати уявлення про різні наявні платформи та орієнтуватися в їхніх функціональних можливостях. Така необхідність продиктована, насамперед, тим, що деякі середовища віртуалізації перед здійсненням запуску системи вимагають проведення спеціальних підготовчих процедур або зберігають знімки пам'яті віртуальних машин у власних форматах тощо.

Спираючись на роботи Сікорські [10], Монаппи [11] та приклад практичного застосування засобів віртуалізації [12], авторами в цій роботі буде використано середовище віртуалізації Oracle VM VirtualBox – програмний продукт є безкоштовним та відкритим. Його функціональні можливості гарантують стабільну роботу на найбільш поширених архітектурах – Intel x86 та AMD64. Також серед своїх функціональних можливостей Oracle VM VirtualBox містить засоби зупинки виконання віртуальної машини, збереження її стану, повернення до раніше збереженого стану та створення дампа оперативної пам'яті в некодovanому форматі raw.

Перед створенням і запуском віртуальної машини варто зауважити, що образу носія інформації в форматі raw не достатньо для того, щоб приєднати його до віртуальної системи. Програмний засіб Oracle VM VirtualBox не використовує формат даних raw як носія інформації, натомість застосовуються деякі спеціалізовані формати: VMDK, VDI, VHD тощо [13], [14]. Проте зазначене середовище віртуалізації комплектується утилітами для конвертування образів носіїв інформації з одного формату в інший, що дає можливість перетворити образ з формату raw у формат VMDK. Для цього необхідно виконати команду «VBoxManage convertdd», передаючи їй такі параметри: шлях до файлу з raw-образом, шлях, де необхідно розміщувати перекодований образ, формат даних, в який необхідно

здійснити конвертацію. Після завершення процедури конвертації у вихідний файл буде збережено перекодований образ, який можна приєднати до віртуальної машини.

Створюючи віртуальну машину, варто пам'ятати про те, що замалий об'єм системної пам'яті призведе до запису даних у своп (за його наявності), а зовеликий об'єм може значно збільшити кількість часу, яка необхідна для здійснення аналізу.

В разі необхідності дослідження різних ситуаційних властивостей певного процесу, перед створенням дампа варто спочатку виконати необхідні дії, наприклад запуск певної команди чи програми, підключення стороннього пристрою, ініціювання процедур копіювання чи створення файлів тощо. Так, для прикладу, авторами в рамках середовища операційної системи, що виконується на віртуальній машині, активовано повноекранний додаток, який в подальшому буде досліджено (рисунки 1).

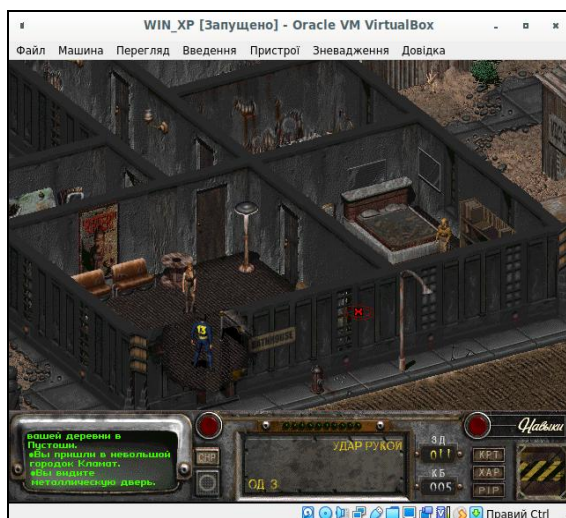


Рисунок 1 – Віртуальна машина з активованим повноекранним процесом

Після створення та запуску віртуальної машини, виконання необхідних підготовчих дій з активації певних процесів можна безпосередньо виконати процедуру створення дампа оперативної пам'яті. Це можливо здійснити через командний рядок середовища віртуалізації (VirtualBox Debugger), виконавши команду «pgmphysfile» [7]. Зазначеній команді варто передати один параметр – адресу файлу, в який буде записано дмп оперативної пам'яті (рисунки 2).

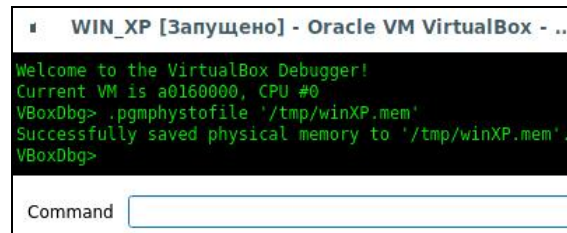


Рисунок 2 – Приклад створення дампа оперативної пам'яті віртуальної машини

За необхідності проведення дослідження в динаміці, варто створити декілька дамів оперативної пам'яті віртуальної машини.

Безпосереднє дослідження створеного дампа чи декількох дамів можливе лише після вибору інструменту для аналізу й узагальнення отриманих даних.

Аналізуючи сучасні напрацювання в галузі аналізу оперативної пам'яті, особливо книг таких авторів, як Монаппа [11] та Michael Hale Ligh [15], встановлено, що найбільш актуальним інструментом для дослідження вмісту оперативної пам'яті операційних систем є програмний засіб «volatility».

Фактично, «volatility» – це безкоштовна інфраструктура програмних рішень (фреймворк) для криміналістичного аналізу інформаційного вмісту оперативної пам'яті. Проаналізувавши його можливості, встановлено, що основна потужність засобу базується на його модульності – фреймворк «volatility» дає змогу підключати величезну кількість плагінів, кожен з яких вирішує певне мінімальне завдання.

Програмний засіб написаний мовою програмування «Python» і підтримує структуру пам'яті, притаманну операційним системам сімейств Windows, Mac OS та Linux. Відкритість вихідних кодів дає можливість аналізувати алгоритм роботи наявних плагінів та, за необхідності, створювати свої, адаптуючи їх під вирішення тих чи інших завдань.

Дослідженням деяких можливостей фреймворку «volatility» встановлено, що найбільш функціональними можливостями можна скористатися лише для аналізу оперативної пам'яті операційних систем сімейства Windows. Можливості для аналізу системної пам'яті операційних систем OS X чи Linux є значно меншими.

Насамперед, це продиктовано тим фактом, що «volatility» не має повного каталогу всіх версій Linux-подібних операційних систем [15]. Це обумовлено тим, що для створен-

ня профілів розпізнавання операційних систем використовується специфічний файл, який містить символічну таблицю адресних функцій та процедур, що використовуються ядром операційної системи Linux. Тобто надзвичайно велика кількість різних дистрибутивів операційних систем разом з надзвичайно великою кількістю версій кожної системи значно ускладнює створення каталогу профілів Linux-подібних систем для фреймворку «volatility». На відміну від Linux-систем, операційні системи сімейства Windows достатньою мірою узагальнені.

Загалом керування програмним засобом «volatility» здійснюється шляхом його запуску з командного рядка з певними параметрами. В обов'язковому випадку через ключ «-f» (наприклад «-f/tmp/dump.mem») варто передавати шлях до файлу з дампом пам'яті. Ще одним параметром, який не зазначається лише при початковому аналізі, а в інших випадках є обов'язковим є профіль досліджуваної операційної системи. Передається він через ключ «--profile», наприклад «--profile=Win7SP1x86». Після зазначених параметрів вказується назва модуля, котрий варто використати, та керуючі ключі цього модуля.

З метою початкового аналізу створеного раніше дампа оперативної пам'яті застосуємо засіб «volatility» і визначимо інформацію про досліджувану операційну систему та назву її профілю в середовищі фреймворку. Для виконання цього завдання необхідно, як зазначено вище, передати ключі зі шляхом до файлу з дампом та зазначити назву модуля «imageinfo» (рисунк 3).

```

mrgauss@ck:/$ volatility -f /tmp/mem.raw imageinfo
Volatility Foundation Volatility Framework 2.6
INFO: volatility.debug : Determining profile based on KDBG se
Suggested Profile(s): WinXPSP2x86
AS Layer1: IA32PagedMemoryPae (Kernel AS)
AS Layer2: VirtualBoxCoreDumpElf64 (Unnamed AS)
AS Layer3: FileAddressSpace (/tmp/mem.raw)
PAE type: PAE
DTB: 0x33b000L
KDBG: 0x8054d2e0L
Number of Processors: 1
Image Type (Service Pack): 3
KPCR for CPU 0: 0xfffff000L
KUSER_SHARED_DATA: 0xfffff000L
Image date and time: 2020-10-02 12:43:43 UTC+0000
Image local date and time: 2020-10-02 15:43:43 +0300
mrgauss@ck:/$

```

Рисунок 3 – Дослідження дампа оперативної пам'яті засобом «volatility»

В результаті виконання програмний засіб проаналізує дамп пам'яті, визначить та виведе на екран інформацію про досліджувану операційну систему, де буде зазначено її

назву та версію. Та найголовнішою буде інформація стосовно назви профілю.

В подальшому спробуємо дослідити процес, який було запущено на етапі підготовки до створення дампа пам'яті. Для цього виконаємо засіб «volatility» з керуючими ключами, які визначатимуть шлях до файлу з дампом, профіль системи та назву модуля – «pslist» чи «pstree». Кожен з цих модулів виведе на екран інформацію про активні процеси, різниця полягає лише у форматі виводу – «pstree» сформує результат у вигляді дерева, що корисно для аналізу дочірніх процесів певного процесу (рисунк 4).

```

root@ck:~# volatility -f /tmp/mem.raw --profile=WinXPSP2x86 pstree
Volatility Foundation Volatility Framework 2.6
Name                               Pid  PPid  Thds  Hnds  Time
-----
0x819ca7f8:system                   4      0    56   257  1970-01-01 00:00:00 UTC+0000
... 0x81709000:smss.exe               368     4     3    19  2020-10-02 12:01:36 UTC+0000
... 0x817087e8:winlogon.exe          616    368   19   531  2020-10-02 12:01:37 UTC+0000
... 0x817bda00:lsass.exe              672    616   25   359  2020-10-02 12:01:37 UTC+0000
... 0x816fba00:services.exe          660    616   14   262  2020-10-02 12:01:37 UTC+0000
... 0x8194b020:VBoxService.exe       848    660    9   115  2020-10-02 12:01:37 UTC+0000
... 0x81733300:svchost.exe           896    660   20   219  2020-10-02 12:01:37 UTC+0000
... 0x816d8c18:alg.exe               1024    660   5   103  2020-10-02 12:01:52 UTC+0000
0x81423828:explorer.exe            1560   1500    9   319  2020-10-02 12:01:38 UTC+0000
... 0x817c45d0:VBoxTray.exe          1104   1560   12   117  2020-10-02 12:01:53 UTC+0000
... 0x8175bda0:fallout2.exe          1468   1560    5   175  2020-10-02 12:02:14 UTC+0000
... 0x817b4c00:ctfmon.exe           1144   1560    1    84  2020-10-02 12:01:53 UTC+0000
root@ck:~#

```

Рисунок 4 – Частина списку процесів, виявлених програмним засобом «volatility»

В отриманих даних особливу цінність має ідентифікатор процесу – Pid – числовий номер у порядку запуску. Саме ідентифікатор процесу необхідний для його подальшого дослідження, оскільки є обов'язковим параметром при використанні інших модулів фреймворку «volatility».

Отримавши ідентифікатор необхідного процесу, можливо здійснити його безпосереднє дослідження. Наприклад, використовуючи модуль «dlllist» фреймворку «volatility», можна отримати інформацію про динамічно приєднувані бібліотеки, що були завантаженими й використаними певним процесом (рисунк 5).

```

root@ck:~# volatility -f /tmp/mem.raw --profile=WinXPSP2x86 dlllist -p 1468
Volatility Foundation Volatility Framework 2.6.1
*****
fallout2.exe pid: 1468
Command line : "C:\Program Files\1C\Fallout2\fallout2.exe"
Service Pack 3

Base      Size  LoadCount  Path
-----
0x80400000 0x2f0000 0xffff C:\Program Files\1C\Fallout2\fallout2.exe
0x7c900000 0xb4000 0xffff C:\WINDOWS\system32\ntdll.dll
0x7c800000 0xf7000 0xffff C:\WINDOWS\system32\kernel32.dll
0x77f10000 0x4a000 0xffff C:\WINDOWS\system32\GDI32.dll
0x77e41000 0x91000 0xffff C:\WINDOWS\system32\USER32.dll
0x76b40000 0x2d000 0xffff C:\WINDOWS\system32\WINMM.dll
0x77dd0000 0x9b000 0xffff C:\WINDOWS\system32\ADVAPI32.dll
0x77e70000 0x93000 0xffff C:\WINDOWS\system32\RPCRT4.dll
0x77fe0000 0x11000 0xffff C:\WINDOWS\system32\Secur32.dll
root@ck:~#

```

Рисунок 5 – Список динамічних бібліотек, виявлених програмним засобом «volatility»

Оскільки динамічні бібліотеки можуть містити програмний код, дані чи ресурси в будь-яких комбінаціях, інформація про них може бути досить цінною, аби мати загальне розуміння про можливу функціональність досліджуваного процесу.

Проте іноді програмним засобом вдається приховати деякі з завантажених бібліотек, в такому випадку варто застосувати плагін «ldrmodules» фреймворку «volatility», який проаналізує дампи пам'яті та спробує відобразити всі модулі, що фактично були завантажені процесом, незалежно від методу завантаження [4].

Також, маючи в своєму розпорядженні ідентифікатор процесу, програмним засобом «volatility» можливо виконати експорт процесу в файл. Для цього, за аналогією з попередніми командами, необхідно звернутися до фреймворку «volatility», передаючи ключі з розташуванням дампа пам'яті, профілю системи, ідентифікатором процесу та модулем «procdump» (рисунок 6).

```
root@ck:~# \
> volatility -f /tmp/mem.raw \
> --profile=winXPSP2x86 \
> procdump -p 1468 -D /tmp
Volatility Foundation Volatility Framework 2.6.1
Process(V) ImageBase Name Result
-----
0x81758da0 0x00400000 fallout2.exe OK: executable.1468.exe
root@ck:~#
```

Рисунок 6 – Приклад експорту процесу в файл

Отримання файлу з дампом процесу дає можливість його подальшого дослідження вже іншими методами – дизасемблюванням та аналізом програмного коду. Такі методи дають змогу не тільки детально вивчити алгоритм роботи програмного засобу, а й дослідити його на предмет наявності ключів шифрування чи доступу до інформації.

Однак процедури дизасемблювання, аналізу програмного коду та його можлива подальша декомпіляція є завданнями, які потребують проведення подальших досліджень, зокрема аналізу й опрацювання наявних як наукових, так і практичних рішень і напрацювань.

Результати проведеного дослідження повною мірою задовольняють поставлену мету, що полягала в опрацюванні питання криміналістичного аналізу оперативної пам'яті, а саме: в завданнях вибору програмних інструментів і апробації алгоритмів для

створення дамів оперативної пам'яті та подальшого її аналізу.

В результаті дослідження встановлено, що достатнім засобом для віртуалізації досліджуваної системи та створення дампа оперативної пам'яті є середовище віртуалізації Oracle VM VirtualBox. Його функціональні можливості дозволяють як створювати віртуальну машину, так і зберігати в файл її системну пам'ять.

Окрім того, програмний засіб «volatility», який було апробовано в рамках цієї роботи, також є достатнім та перспективним засобом для здійснення аналізу дамів оперативної пам'яті.

Результати досліджень та їх аналіз.

Обговорюючи результати дослідження, спочатку варто виділити той факт, що запропоновані та застосовані в роботі програмні засоби є безкоштовними й розповсюджуються з відкритим вихідним кодом, тобто є вільними у використанні. Цей факт є важливим у перспективі, оскільки подальші навчання й підготовка фахівців не будуть потребувати придбання додаткових копій програмних засобів чи його ліцензування.

Запропоноване середовище віртуалізації Oracle VM VirtualBox загалом є достатньо універсальним засобом і може бути використане для більш широкого кола завдань при проведенні комп'ютерно-технічних досліджень. Функціональна можливість створення дамів оперативної пам'яті є достатньою для проведення її аналізу.

Стосовно ж фреймворку «volatility», цей програмний засіб є досить перспективним у вирішенні питань аналізу оперативної пам'яті. Суттєвий потенціал програмного рішення ґрунтується на його модульності, а отже, можливості адаптації функціональності під нестандартні завдання.

Досліджуючи ефективність засобу «volatility», було проаналізовано дампи оперативної пам'яті таких операційних систем сімейства Windows, як: XP, Server 2003, Vista, 7, Server 2008 R2 та 8.1. В середовищі кожної операційної системи було запущено один і той же повноекранний додаток. В кожному дослідженому випадку «volatility» правильно розпізнав операційну систему та дав змогу здійснити експорт виконаного файлу.

Як окремі випадки позитивного досвіду застосування тандему «Oracle VM VirtualBox» та фреймворку «volatility» можна навести практику працівників Черкаського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру МВС України. Функціональні можливості «volatility» дали змогу відстежити приховані процеси (malware) в операційних системах сімейства Windows, експортувати виконувані файли для їх подальшого аналізу та дизасемблювання.

Загалом розглянута послідовність виконання процедур дає можливість успішно створити знімок оперативної пам'яті віртуальної машини і здійснити його дослідження на предмет активних процесів, завантажених динамічних бібліотек тощо. Цей факт дає змогу розглядати аналіз оперативної пам'яті як один із методів цифрової криміналістики за експертною спеціальністю 10.9 «Дослідження комп'ютерної техніки та програмних продуктів».

Висновки. В роботі розглянуто та висвітлено питання аналізу оперативної пам'яті як одного з методів пошуку та виявлення відомостей, що мають цінність у розрізі комп'ютерної криміналістики.

Дослідженням запропоновано для застосування середовище віртуалізації та інструмент для аналізу вмісту оперативної пам'яті. Середовище віртуалізації, насамперед, необхідне для реалізації можливості створення знімків (дампів) системної пам'яті віртуальних машин, оскільки дає змогу здійснювати запуск операційних систем у контрольованому середовищі. Як такий засіб запропоновано програмне забезпечення Oracle VM VirtualBox. Окрім того, застосування цього засобу дає можливість здійснювати не тільки статичний аналіз, а й динамічний – по чергове створення знімків пам'яті дає змогу відстежувати зміну її вмісту та проаналізувати роботу певних програмних засобів.

Безпосередньо ж для проведення аналізу вмісту знімків оперативної пам'яті запропоновано використання програмного засобу «volatility», який фактично є модульною платформою для виконання базових модулів. Модульна архітектура засобу дає змогу розділити глобальне завдання аналізу на дрібніші проміжні завдання, що, в свою чергу, робить алгоритм загального дослідження більш повторюваним і стійким до нестандартних ситуацій.

Тандем запропонованих засобів може дати змогу судовим експертам за напрямом комп'ютерно-технічних досліджень здійснювати аналіз оперативної пам'яті та отримувати відомості, які є недоступними при застосуванні класичних методів дослідження.

Вищезазначені засоби та підходи відкривають шлях для проведення подальших досліджень. Обумовлено це, насамперед, універсальністю та модульністю програмного забезпечення й можливістю реалізації власних програмних модулів для вирішення специфічних завдань комп'ютерної криміналістики. Загалом же метод аналізу оперативної пам'яті є досить широким поняттям і вимагає подальшого вивчення та розділення на більш конкретизовані напрями.

Список використаних джерел

- [1] T. Holt, A. Bossler, and K. Seigfried-Spellar, *Cybercrime and Digital Forensics*. NY, USA: Routledge, 2018. ISBN: 978-1-138-23872-5.
- [2] Рада національної безпеки і оборони України (2016, січ. 27). *Рішення "Про Стратегію кібербезпеки України"*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/96/2016#Text>. Дата звернення Жовт. 23, 2020.
- [3] Ю. Диогенес, и Э. Озкая, *Кибербезопасность: стратегии атак и обороны*, пер. с англ. Д. Беликова. Москва, Россия: ДМК Пресс, 2020.
- [4] A. Mohanta, and A. Saldanha, *Malware Analysis and Detection Engineering. A Comprehensive Approach to Detect and Analyze Modern Malware*. California, USA: Apress Media, 2020. ISBN-13: 978-1-4842-6192-7.
- [5] D. Yurichev, "Reverse Engineering for Beginners". [Online]. Available: <https://beginners.re/RE4B-EN.pdf>. Accessed on: Oct. 23, 2020.
- [6] X. Zhang, *Digital Forensic Education. An Experiential Learning Approach*. Switzerland: Springer, 2020.
- [7] R. Wong, *Mastering Reverse Engineering*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd, 2018. ISBN 978-1-78883-884-9.
- [8] A. Arnes, *Digital Forensics*. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.

- [9] B. Dang, A. Gazet, and E. Bachaalany, *Practical Reverse Engineering: x86, x64, ARM, Windows® Kernel, Reversing Tools, and Obfuscation*. Indianapolis, IN: Wiley, 2014.
- [10] М. Сикорски, и Э. Хониг, *Вскрытие покажет! Практический анализ вредоносного ПО*. Санкт-Петербург: Питер, 2018. ISBN 978-5-4461-0641-7.
- [11] К. Монаппа, *Анализ вредоносных программ*, пер. с англ. Д. Беликова. Москва, Россия: ДМК Пресс, 2019. ISBN 978-5-97060-700-8.
- [12] В. В. Павлов, "Практика завантаження операційної системи, що міститься на цифровому носії інформації в середовищі віртуальної машини", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 27-33, 2020.
- [13] Oracle VM VirtualBox. User Manual. [Online]. Available: <https://www.virtualbox.org/manual/UserManual.html>. Accessed on: Oct. 23, 2020.
- [14] В. Столлингс, *Операционные системы: внутренняя структура и принципы проектирования*, 9-е изд., пер. с англ. Санкт-Петербург: Диалектика, 2020.
- [15] M. Hale Ligh, A. Case, J. Levy, and A. Walters, *The Art of Memory Forensics: Detecting Malware and Threats in Windows, Linux, and Mac Memory*. Hoboken, NJ: Wiley, 2018. ISBN: 978-1-118-82509-9.
- [4] A. Mohanta, and A. Saldanha, *Malware Analysis and Detection Engineering. A Comprehensive Approach to Detect and Analyze Modern Malware*. California, USA: Apress Media, 2020. ISBN-13: 978-1-4842-6192-7.
- [5] D. Yurichev, "Reverse Engineering for Beginners". [Online]. Available: <https://beginners.re/RE4B-EN.pdf>. Accessed on: Oct. 23, 2020.
- [6] X. Zhang, *Digital Forensic Education. An Experiential Learning Approach*. Switzerland: Springer, 2020.
- [7] R. Wong, *Mastering Reverse Engineering*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd, 2018. ISBN 978-1-78883-884-9.
- [8] A. Arnes, *Digital Forensics*. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [9] B. Dang, A. Gazet, and E. Bachaalany, *Practical Reverse Engineering: x86, x64, ARM, Windows® Kernel, Reversing Tools, and Obfuscation*. Indianapolis, IN: Wiley, 2014.
- [10] M. Sikorski, and A. Honig, *Practical Malware Analysis*. California, USA: No Starch Press, 2018. ISBN 978-1-59327-290-6.
- [11] K. Monappa, *Learning Malware Analysis*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd., 2018. ISBN: 978-1-78839-250-1.
- [12] V. V. Pavlov, "Practice of downloading the operating system on digital media in virtual machine environment", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 1, pp. 27-33, 2020. [in Ukrainian].
- [13] Oracle VM VirtualBox. User Manual. [Online]. Available: <https://www.virtualbox.org/manual/UserManual.html>. Accessed on: Oct. 23, 2020.
- [14] W. Stallings, *Operating Systems: Internals and Design Principles*, 9th ed. Pearson, 2018.
- [15] M. Hale Ligh, A. Case, J. Levy, and A. Walters, *The Art of Memory Forensics: Detecting Malware and Threats in Windows, Linux, and Mac Memory*. Hoboken, NJ: Wiley, 2018. ISBN: 978-1-118-82509-9.

References

- [1] T. Holt, A. Bossler, and K. Seigfried-Spellar, *Cybercrime and Digital Forensics*. NY, USA: Routledge, 2018. ISBN: 978-1-138-23872-5.
- [2] National Security and Defense Council of Ukraine (2016, Jan. 27). The decision "On the Cyber Security Strategy of Ukraine". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/96/2016#Text>. Accessed on: Oct. 23, 2020.
- [3] Yu. Diogenes, and E. Ozkaya, *Cybersecurity: Attack and Defense Strategies*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd., 2018. ISBN 978-1-78847-529-7. [in Russian].
- [4] A. Mohanta, and A. Saldanha, *Malware Analysis and Detection Engineering. A Comprehensive Approach to Detect and Analyze Modern Malware*. California, USA: Apress Media, 2020. ISBN-13: 978-1-4842-6192-7.
- [5] D. Yurichev, "Reverse Engineering for Beginners". [Online]. Available: <https://beginners.re/RE4B-EN.pdf>. Accessed on: Oct. 23, 2020.
- [6] X. Zhang, *Digital Forensic Education. An Experiential Learning Approach*. Switzerland: Springer, 2020.
- [7] R. Wong, *Mastering Reverse Engineering*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd, 2018. ISBN 978-1-78883-884-9.
- [8] A. Arnes, *Digital Forensics*. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [9] B. Dang, A. Gazet, and E. Bachaalany, *Practical Reverse Engineering: x86, x64, ARM, Windows® Kernel, Reversing Tools, and Obfuscation*. Indianapolis, IN: Wiley, 2014.
- [10] M. Sikorski, and A. Honig, *Practical Malware Analysis*. California, USA: No Starch Press, 2018. ISBN 978-1-59327-290-6.
- [11] K. Monappa, *Learning Malware Analysis*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd., 2018. ISBN: 978-1-78839-250-1.
- [12] V. V. Pavlov, "Practice of downloading the operating system on digital media in virtual machine environment", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 1, pp. 27-33, 2020. [in Ukrainian].
- [13] Oracle VM VirtualBox. User Manual. [Online]. Available: <https://www.virtualbox.org/manual/UserManual.html>. Accessed on: Oct. 23, 2020.
- [14] W. Stallings, *Operating Systems: Internals and Design Principles*, 9th ed. Pearson, 2018.
- [15] M. Hale Ligh, A. Case, J. Levy, and A. Walters, *The Art of Memory Forensics: Detecting Malware and Threats in Windows, Linux, and Mac Memory*. Hoboken, NJ: Wiley, 2018. ISBN: 978-1-118-82509-9.

R. L. Ptashkin,
O. O. Hozhyi,
Yu. Yu. Obruch,
V. V. Pavlov,
R. A. Kalinichenko

e-mail: ndekc.ck@gmail.com

Cherkasy scientific research forensic centre MIA of Ukraine
Pasterivska st., 104, Cherkasy, 18000, Ukraine

RAM ANALYSIS AS ONE OF THE METHODS FOR COMPUTER FORENSICS

Modern methods of computer forensics usually do not use RAM analysis. This is due to the significant complexity of this task. But at the same time, RAM is an interesting object of research. RAM contains the data structures, the data related to processes running on the system, and the kernel. This includes virtual memory of all processes, virtual memory of the kernel, handles, mutexes, network connections, and other resources that are currently being used by all processes and the kernel. All these data and data structures are available in the memory dump. Other than that, RAM can contain a data about decryption keys. Such information will be valuable for computer forensics.

RAM analysis, as a separate method of computer forensics, generally requires to find solutions for some intermediate questions. The task of memory acquisition involves capturing the contents of RAM using a memory capture tool, which creates a memory dump file. The second step, memory analysis or forensics, involves an analysis of this memory dump file.

The base aim of this article is finding and testing tools for RAM forensics. We have analyzed the most respected forensics books and latest scientific papers to perform these tasks. After this we have made own research and tests of some software.

Forensics starts with data acquisition. Since we want to look at the memory, we need to use memory acquisition tools such as virtual environment. Using tools of virtual environment, we can take a complete dump of RAM, which includes both the user-mode memory space for all the processes and the kernel-mode memory as well. The best tool, according to the authors, is the Oracle VM VirtualBox, because it's useful, simple and free tool.

Analyzing the latest scientific works in the field of computer forensics, for the memory analysis the authors choose a tool, such as "volatility". "Volatility" is one of the popular pieces of open source software used. It is able to read suspended states of virtual machines. The advantage of such tools is that malware, such as rootkits, that try to hide themselves from user domains, can be extracted using memory forensic tools.

The proposed tools allow experts to make forensics analysis of RAM and obtain information that is not available from classical research methods. In this research we have tested functionality of virtual environment and various volatility plugins, that allow to get an idea of the events taking place in the operating system and the activities of some software. These methods and algorithms will be useful for the computer forensics in government forensic centers or for cybersecurity workers.

Keywords: virtualization, VirtualBox, memory dump, RAM, volatility.

[0000-0002-0247-4125] **Л. П. Оксамитна**, к.т.н., доцент,

e-mail: l.oksamytna@chdtu.edu.ua

О. В. Свіржевський

e-mail: svrzhevskijj@rambler.ru

Черкаський державний технологічний університет,

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18000, Україна

ПРОЄКТУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ ВЕБ-ОРІЄНТОВАНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО СЕРВІСУ З ОБМІНУ ВАЛЮТ

У роботі представлено результати дослідження засад проєктування та створення веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют зі зручним інтерфейсом та відповідною базою різноманітних і якісних фінансових послуг. Проаналізовано складові валютного ринку крізь призму інформаційних засад його ефективного функціонування на світовому ринку фінансових послуг. Визначено коло основних завдань в контексті вирішення проблеми вибору оптимального курсоутворення гривні для стабільного забезпечення економічного розвитку, обґрунтовано вибір засобів програмної реалізації для розробки веб-сервісу. Цей вибір обумовлений можливістю розробникам створювати великі веб-застосунки. В ході дослідження виявлено, що впровадження такого сервісу дасть можливість забезпечити у фінансових та нефінансових установах якісне й ефективне проведення обмінних валютних операцій.

Ключові слова: фінансові послуги, бібліотеки, функціональні можливості, ринок валют, процеси, верифікація, автентифікація, користувач.

Вступ. На сьогодні ринок фінансових послуг містить широкий спектр послуг та є найважливішою і невід'ємною складовою ринкової економіки України, оскільки забезпечує умови для економічного зростання країни. Його роль у структурі фінансового ринку є надзвичайно важливою. На цьому ринку відбувається обмін грошима, надаються кредити і проходить мобілізація капіталу [1].

Вирішальне значення тут мають фінансові послуги. Завдяки ним грошові потоки спрямовуються від власників до позичальників. Одним із найважливіших секторів ринку фінансових послуг є валютний ринок. Сучасний валютний ринок є розгалуженою системою механізму, функціонування якого має забезпечити купівлю і продаж національної грошової одиниці й іноземної валюти з метою їх використання для обслуговування міжнародних платежів [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналізуючи останні дослідження ринку фінансових послуг, ми визначили, що попри численні дослідження проблем розвитку структури фінансового ринку та його послуг, в Україні наявна недостатня кількість досліджень, присвячених саме значущості і перспективам впровадження ІТ технологій на ринку фінансових послуг.

Сутність та зміст фінансових послуг у сучасних умовах (як банківських, так і небанківських фінансових установ), їх значення в сучасному економічному розвитку країни визначали багато дослідників. Серед них варто відзначити досягнення в цій галузі таких науковців, як: В. Базилевич, Л. Бакаєв [2], З. Васильченко [3], Н. Внукова [4], О. Вовчак, А. Гальчинський, В. Геєць, А. Герасимович, Л. Горбач, В. Зимовець, О. Каун [5], Д. Дема [6], О. Дзюблюк, С. Еш [7, 8], В. Корнєєв, М. Коваленко [9], Н. Костіна, С. Маслова, С. Міщенко [10], А. Мороз, С. Науменкова [10], Є. Сич, М. Савлук, А. Старостіна [11] та багато інших вчених.

Також ряд науковців досліджували теоретичні та практичні аспекти проблем розвитку ринку фінансових послуг в інформаційному суспільстві, проводили їх порівняльний аналіз, класифікацію та ін. Серед вітчизняних науковців можна відзначити: Б. І. Адамова, Л. М. Волощенко, О. В. Захарчика, В. І. Куценко, Ж. П. Лисенко, І. О. Лютого, А. Ф. Мельника, М. Г. Чумаченка та ін. [2].

Науковими дослідженнями проблем функціонування фінансових послуг, його закономірностей і державного регулювання, нових методів та моделей вивчення фінансового ринку займалися також зарубіжні вчені: Г. Александер, Дж. Бейлі, Дж. Долан,

Дж. Кейнс, А. Маршалл, П. Самуельсон, Д. Ліндсей, Д. Норт, О. Вільямсон, Дж. Тобін, П. Ллойд, У. Шарп, Т. Уорен, С. Фіндлей [11].

Як підсумок викладеного вище, варто зазначити, що, хоча багато науковців займалися дослідженнями ринкової економіки, вивченням методів та моделей фінансового ринку, але на цей час недостатньо уваги приділено саме методологічним та інноваційним підходам щодо розробки онлайн-сервісів з надання фінансових послуг.

Таким чином, проведений аналіз останніх публікацій різних науковців з питань розвитку фінансового ринку свідчить про необхідність досліджень, спрямованих на сучасні підходи до розробки нових інформаційних сервісів надання якісних фінансових послуг клієнтам з обміну валют.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Ринок фінансових послуг – це сфера діяльності учасників ринків фінансових послуг з метою надання та споживання певних фінансових послуг [2]. З організаційної точки зору, ринок фінансових послуг – це сукупність фінансових установ, що забезпечують рух коштів від власників фінансових ресурсів до їх користувачів [2].

Сьогодні в країні серед усіх поточних завдань не менш важливим є питання фінансового ринку, ефективної системи надання фінансових послуг клієнтам.

Сучасний фінансовий ринок характеризується зростаючими потребами учасників фінансових послуг, наданням різноманітних та якісних послуг.

Безумовно, що з впровадженням сучасних ІТ-технологій, появою новітніх фінансових інструментів і форм взаємодії між людьми фінансові послуги набувають іншої значимості, що пояснюється досить високою динамікою фінансових потоків.

Актуальними стають нефінансові установи, які надають високотехнологічні фінансові послуги. В зв'язку з цим помітні конкуренція та перерозподіл клієнтської бази, що вимагає вивчення нових теоретичних і практичних підходів щодо формування системи надання фінансових послуг. В сучасних умовах в Україні, як і в інших країнах, імідж фінансових та нефінансових установ значною мірою залежить від якості та ефективності надання фінансових послуг клієнтам.

Застосування інформаційних сервісів у фінансових та нефінансових установах на-

буває дедалі більшої популярності. Інформаційні технології роблять операції організації та управління установою ефективнішими і легшими. Тому актуальним стає створення якісних інформаційних онлайн-сервісів на базі сучасних веб-технологій, які в клієнтів знаходять альтернативи для одержання належних фінансових послуг з обмінних валютних операцій. Вони дають змогу проводити комплексну систему моніторингу курсу валюти фінансової установи та швидко і зручно переглядати інформацію про всі фінансові послуги щодо обміну валют.

Варто зазначити, що питаннями розробки таких сервісів зацікавлюються не лише науковці-економісти, але й розробники програмного забезпечення, тому що нині серед існуючих тенденцій програмних рішень значно збільшилась частка мережево-віддалених продуктів та веб-орієнтованих рішень. Це пояснюється меншою вартістю їх експлуатації та покращенням якості каналів зв'язку і зниженням їх вартості.

Проте, незважаючи на різноманіття сучасних технологій і платформ для створення інформаційних сервісів, єдиного підходу до застосування тих чи інших засобів для їх проектування та створення не існує.

Тому актуальність дослідження, що розглядається в роботі, обумовлюється впровадженням сучасних веб-технологій у діяльність фінансових та нефінансових установ з регулювання обмінних валютних операцій.

Метою статті є підвищення ефективності функціонування валютного ринку за рахунок розробки веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют.

Виклад основного матеріалу. Перш ніж досліджувати аспекти проектування та створення веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют, розглянемо основні поняття і складові сучасного валютного ринку та вплив інформаційних технологій на розвиток фінансових послуг.

Однією з основних складових фінансового ринку є валютний ринок, на якому здійснюється обіг валюти та операції з нею. Окремі ринки, розміщені в різних точках світу, центрах міжнародної торгівлі і валютно-фінансових операцій, утворюють валютний ринок світового масштабу [1].

Поняття валютного ринку широко застосовується в науковій літературі. Проте єдиного та однозначного трактування його

поняття не існує. Наведемо визначення понять «валютного ринку», «валюти», «фінансової операції», «фінансової послуги», які представлені в науковій літературі.

Валютний ринок – це сукупність економічних та організаційних форм, що пов'язані з купівлею або продажем валюти різних країн [11]. Предметом торгівлі на валютному ринку є іноземна валюта, об'єктом – валютні операції з продажу й обміну національної та іноземної валюти.

Валюта – це грошова одиниця, що використовується як світові гроші, тобто як міжнародна розрахункова одиниця, засіб обігу і платежу [11].

Виділяють п'ять резервних світових валют: долар США, євро, японська єна, британський фунт стерлінгів та швейцарський франк [12]. Усі вони є вільно конвертованими валютами.

Аналізуючи ці поняття, слід зазначити, що у вітчизняному та зарубіжному законодавстві існують певні розбіжності з приводу тлумачення термінів «фінансова операція» та «фінансова послуга». Розглянемо також їх особливості та види.

Фінансова операція – це будь-яка операція, пов'язана зі здійсненням або забезпеченням здійснення платежу суб'єктом фінансового моніторингу [13].

Відповідно до Закону України «Про фінансові послуги та державне регулювання ринків фінансових послуг» від 12 липня 2001 року № 2664-III *фінансові послуги* – операції з фінансовими активами, що здійснюються в інтересах третіх осіб за власний рахунок чи за рахунок цих осіб, а у випадках, передбачених законодавством, – і за рахунок залучених від інших осіб фінансових активів з метою отримання прибутку або збереження реальної вартості фінансових активів [14].

Фінансові послуги, як будь-які види послуг, мають певні особливості, а саме [11]:

- фінансова послуга сприймається як діяльність особи (юридичної чи фізичної), яка надає послугу;
- фінансова послуга не має матеріально-речової форми вираження;
- абстрактна форма фінансової послуги набуває конкретного вираження на основі договірних відносин або в процесі купівлі-продажу цінних паперів;

- корисний ефект фінансової послуги виявляється в процесі її надання;
- час надання та споживання фінансової послуги здебільшого збігається.

У процесі реалізації валютних операцій професійними учасниками валютного ринку надаються такі види фінансових послуг [11]:

- відкриття та обслуговування рахунків в іноземній валюті;
- випуск платіжних документів, платіжних карток в іноземній валюті та їх обслуговування;
- переказ валютних цінностей по Україні та за кордон та їх одержання з України і з-за кордону;
- забезпечення міжнародних розрахунків;
- купівля-продаж (обмін) валютних цінностей за дорученням клієнтів на міжбанківському ринку та міжнародному валютному ринку;
- конверсія валютних цінностей однієї держави на валютні цінності іншої держави;
- надання кредитів в іноземній валюті.

Фінансові послуги валютного ринку поділяються на такі групи: розрахункові, торговельні й конверсійні, кредитні, депозитні, гарантійні та довірчі.

Отже, валютний ринок виступає одним із найважливіших сегментів фінансового ринку, оскільки всі його операції тісно пов'язані із загальним станом грошового ринку в країні.

Сьогодні в Україні актуальною є проблема вибору оптимального курсоутворення гривні для стабільного забезпечення економічного розвитку. Джерела [1,2, 5-7, 9-11] свідчать про зростаючий вплив інформаційних технологій на розвиток ринку фінансових послуг протягом останніх 15 років. З огляду на зазначене далі пропонується розглянути основні аспекти щодо розробки веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют.

Для цього вирішимо наступні завдання:

- дослідження предметної області;
- аналіз існуючих інформаційних сервісів надання фінансових послуг клієнтам;
- проєктування бази даних;
- вибір та обґрунтування програмно-технічних засобів;
- проєктування і створення онлайн сервісу з обміну валют на базі сучасних веб-технологій;
- тестування розробленого сервісу.

Нині існує велика кількість інформаційних ресурсів, призначених для надання фінансових послуг, проаналізуємо деякі з них.

Для проведення аналізу інформаційних сервісів надання фінансових послуг клієнтам деяких фінансових установ України обрано сайти «MyChange», «LEVELAPP», «BIT-EXCHANGE», «Ua4Bit» та визначено критерії: зручність використання сайту; дизайн і функціонал сайту [15].

Першим для порівняння за значимістю критерієм оцінювання вибрано зручність використання сайту. Важливим є розміщення на сайті саме того матеріалу, який корисний користувачу. Хоча серед сайтів можна побачити такі, що містять великий обсяг контенту, але користуватися ними просто і легко. Протилежністю їм є такі сайти, що містять небагато розділів, але вони не зрозумілі для сприйняття.

Варто зауважити, що розробка веб-дизайну для сайту чи сервісу вимагає його великої функціональності. Це означає, що всі елементи дизайну, в першу чергу, мають вирішувати завдання при забезпеченні продажу певної валюти чи послуг. Для цього потрібні фахівці з дизайну. Функціональний дизайн призначений саме для рішення прикладних завдань.

Функціональність гарантує більшу надійність, адже кожний модуль веб-сайту виконує лише одну функцію з мінімумом управління на інших модулях ресурсів. Функціонально-спроектований дизайн у майбутньому буде легше змінювати, оскільки кожна його частина відповідає лише тому, для чого вона призначена.

Функціональність – це простота, і вона стає вирішальною перевагою, тому що робить сайт легким для розуміння та змін. Час працездатності функціонального веб-сайту значно більший. Ще одна важлива перевага функціональності полягає в тому, що вона легша у реалізації і відповідно менш вартісна в проектуванні та впровадженні.

Отже, авторами проаналізовано переваги та недоліки розглянутих аналогів і визначено найкращі особливості, які будуть враховані при проектуванні інформаційного сервісу з обміну валют для надання фінансових послуг клієнтам.

Беручи до уваги розглянуті аналоги сервісів з обміну валют, варто звернути увагу на такі аспекти при проектуванні:

- зручність, зрозумілість, привабливість інтерфейсу сервісу;
- швидкість завантаження має перевищувати середню серед зазначених оцінок;
- можливість онлайн-діалогу та відстеження курсу валют;
- відображення новин і відгуків клієнтів про сервіс;
- наявність партнерської програми.

Веб-орієнтований інформаційний сервіс з обміну валют, що розглядається в роботі, повинен бути орієнтованим на звичайного користувача з мінімальним досвідом роботи з Інтернетом, простим у супроводженні й користуванні, а також мати зручний інтерфейс та велику базу фінансових послуг.

Як відомо, етап проектування бази даних (БД) вважається одним із найскладніших етапів проектування. В роботі пропонується наступний підхід до проектування бази даних.

На рисунку 1 зображено основні зв'язки між групами таблиць: таблиці профілю користувача, таблиці заявок на обмін, таблиці валют, таблиці служби підтримки, таблиці сповіщень.



Рисунок 1 – Основні групи таблиць БД

Виконуючи проектування та побудову бази даних веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют, створено 18 таблиць, серед яких 9 таблиць спроектовано самим фреймворком.

Доцільним є короткий опис назв таблиць та їх призначення:

BackEnd_profile – таблиця авторизованого користувача;

BackEnd_currencies – таблиця, створена для збереження інформації про типи валют, які використовуються у сервісі;

BackEnd_currenciessource – таблиця, створена для збереження інформації про валюти, які використовуються в сервісі;

BackEnd_order – таблиця, створена для збереження інформації про замовлення, які використовуються в сервісі;

BackEnd_news – таблиця, створена для збереження інформації про новини, які відображаються на відповідній сторінці;

account_emailconfirmation – таблиця, створена для збереження інформації про електронну пошту;

BackEnd_feedback – таблиця, створена для збереження інформації про відгуки користувачів;

BackEnd_faq – таблиця інформації про часті питання;

BackEnd_ticket – таблиця, створена для збереження інформації про відповіді на питання користувачів;

BackEnd_ticketnote – таблиця інформації про відповіді на питання користувачів;

BackEnd_ticketstatus – таблиця, створена для збереження інформації про типи запитань користувачів;

BackEnd_ticketstatus – таблиця інформації про типи запитань користувачів.

При розробці бази даних використано зв'язування таблиць за допомогою первинних та зовнішніх ключів, що забезпечує цілісність даних та чітке розділення функцій збереження та відображення даних. Саме такий підхід дає змогу легко модифікувати логіку роботи програми на сервері і виключає необхідність внесення модифікацій у програму, з якою безпосередньо працює користувач.

На сьогоднішній день використання веб-технологій помітно зростає в усіх сферах людського життя, в тому числі й у секторі ринку фінансових послуг. Однією з причин такої популярності виступає зручність і простота наявних інструментів для пошуку та використання веб-ресурсів. Звісно, існує безліч засобів та платформ для створення веб-орієнтованих інформаційних сервісів. Для досягнення поставленої мети авторами роботи запропоновано використання бібліотеки React, сервісу Amazon Cognito, платформ CoinMarketCap та TradingView.

Опишемо обґрунтованість цього вибору. Перш за все, розглянемо *бібліотеку React*, яка стала однією з найулюбленіших і затребуваних технологій, а також найбільш трендовою технологією на StackOverflow. За даними дослідження The State of JS 2019, в якому взяло участь понад 20 000 розробників, React лідирує в категорії «фронтенд-фреймворки

і бібліотеки» [16]. React застосовують з метою відтворення компонентів для користувача інтерфейсу. Також бібліотека може повністю управляти фронтендом. В цьому випадку React використовують з бібліотеками для управління станом і роутингу, наприклад, Redux і React Router. Бібліотека React також дає можливості розробникам для створення великих веб-застосунків, що використовують дані, змінюються в часі, з відсутністю перезавантаження сторінки.

Одною з ключових особливостей React є її універсальність. Цю бібліотеку можна використовувати на сервері та на мобільних платформах за допомогою React Native [15]. Варто зазначити, що не менш важливими є також її швидкість, простота та масштабованість.

Amazon Cognito – це продукт веб-служб Amazon (AWS), який контролює автентифікацію користувачів і доступ для мобільних додатків на підключених до Інтернету пристроях [17]. Послуга зберігає та синхронізує дані кінцевих користувачів, що дозволяє розробнику додатків зосередитись на написанні коду замість створення й управління внутрішньою інфраструктурою. Це може прискорити процес розробки мобільних додатків.

Servic Amazon Cognito дає змогу швидко й просто додавати можливості реєстрації, авторизації та контролю доступу користувачів у додатки. За допомогою розширених можливостей безпеки Amazon Cognito забезпечує захист облікових записів користувачів додатків [17]. Ці можливості включають адаптивну автентифікацію, що ґрунтується на аналізі ризику, і захист від використання викрадених облікових даних для доступу.

Крім того, Amazon Cognito дає можливість зберігати дані локально на пристроях користувачів, дозволяючи програмам працювати навіть тоді, коли пристрої перебувають у режимі офлайн. Потім можна синхронізувати дані на пристроях користувачів, щоб їх робота з програмами залишалася незмінною, незалежно від пристрою, яким користуються.

Платформа CoinMarketCap [18] створена для відстеження капіталізації різних криптовалют, кількості торгів, які ними користуються, та поточної ціни, перетвореної у фіатні валюти. В основі запропонованого веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют лежить досить зручна в користуванні платформа технічного аналізу ринку валют

TradingView [19]. Вона може відображати графіки, що базуються на даних технічних індикаторів.

Щоб представити функціонал веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют, що розглядається в роботі, доцільно дослідити наступні процеси [15]:

- процес реєстрації користувача на сервісі;
- процес верифікації користувача на сервісі;
- процес автентифікації користувача на сервісі;
- процес використання інформації;
- процес створення заявки на обмін валюти.

Безумовно, процес реєстрації користувача на сервісі є одним із найголовніших процесів інформаційного сервісу з обміну валют. Для реєстрації користувач повинен: ввести дані; перевірити їх на валідність; зареєструватися (рисунк 2).

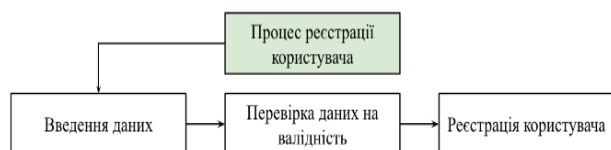


Рисунок 2 – Діаграма процесу реєстрації користувача

На рисунку 3 зображено сторінку реєстрації користувача онлайн-сервісу з обміну валют. Під час реєстрації користувачу потрібно ввести email, пароль, обрати країну і ввести номер телефону. Тут також передбачено можливість зміни даних, введених під час реєстрації та зміни основної валюти сервісу і налаштування повідомлень.

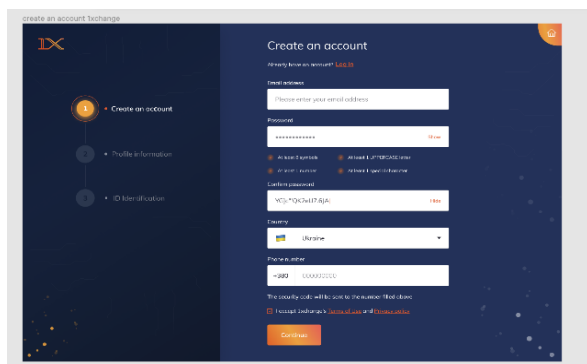


Рисунок 3 – Сторінка реєстрації користувача на сервісі

Процес верифікації користувача на сервісі є не менш важливим із зазначених процесів функціоналу сервісу, це спосіб підтвер-

дження особистості та надійний захист від ботів. Цим самим користувач дає згоду на одержання рекламної чи інформаційної розсилки.

Користувачу потрібно пройти верифікацію номера телефону та email. Після цього відбувається верифікація його особи одним із зазначених способів (паспорт, ІД-картка, посвідчення водія) на сервісі.

На рисунку 4 зображено сторінку проходження верифікації користувача на сервісі.

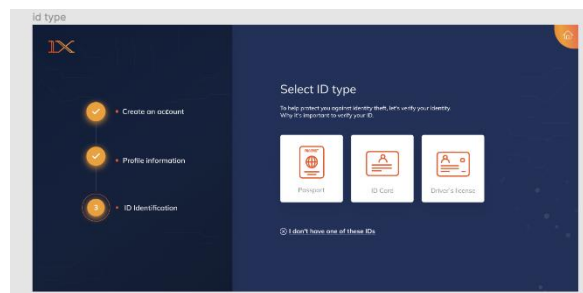


Рисунок 4 – Сторінка проходження верифікації користувача на сервісі

Автентифікація – перевірка, чи є хтось тим, за кого себе видає. Зазвичай вона має на увазі введення логіна і пароля, але також можуть бути використані й інші засоби, такі як використання смарт-картки, відбитків пальців та ін. Її не слід плутати з авторизацією (процедурою надання користувачу певних прав) та ідентифікацією (процедурою розпізнавання користувача за його ідентифікатором). Також у розробленому сервісі з обміну валют існує можливість підключення 2-факторної автентифікації, як показано на рисунку 5.

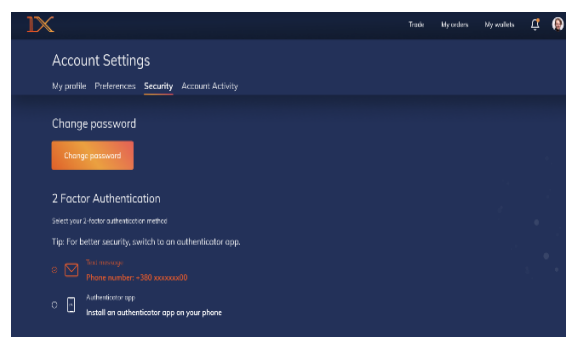


Рисунок 5 – Сторінка підключення 2-факторної автентифікації

Більшу частину веб-орієнтованого сервісу займають графіки ціни. Тут надана можливість вибору валютних пар і типу графіків.

Доступні такі види графіків: лінійний, стовпчикова діаграма, японські свічки.

Крім графіків, веб-сервіс з обміну валют має списки всіх купівель, виконаних користувачем (рисунк 6), та підключених гаманців користувача (рисунк 7).

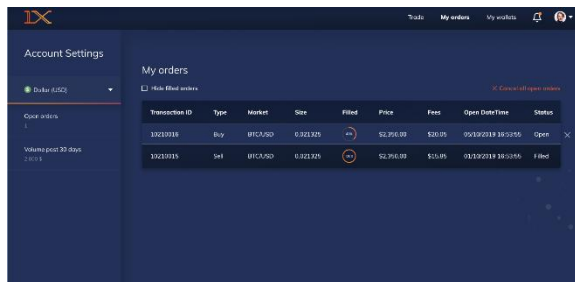


Рисунок 6 – Сторінка списку всіх купівель

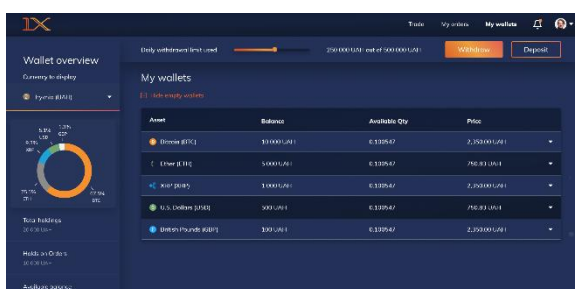


Рисунок 7 – Сторінка списку підключених гаманців користувача

Результати досліджень. Провівши тестування розробленого веб-орієнтованого інформаційного сервісу надання фінансових послуг клієнтам з обміну валют на кросбраузерність та за допомогою інструмента для тестування веб-додатків Lighthouse, варто зазначити, що суттєвих відхилень від норм тестування виявлено не було. Тому можна вважати, що сервіс пройшов цей етап тестування та готовий до впровадження.

Висновки. Розглянуто компоненти валютного ринку та основні аспекти розробки веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют. Проведено деталізований огляд інформаційних сервісів і технологій, що використовуються для розробки веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют. Згідно з проведеними дослідженнями можна дійти висновку, що якість та ефективність надання фінансових послуг клієнтам значною мірою залежать від застосування сучасних веб-сервісів, у тому числі пропонованого, у контексті вирішення проблеми вибору оптимального курсоутворення гривні для стабільного забезпечення економічного розвитку.

Наукова новизна полягає в застосуванні найефективніших сучасних програмних засобів, інформаційних технологій та платформ для створення зручних веб-орієнтованих інформаційних сервісів, що використовуються для розроблення веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют.

Практична значущість одержаних результатів полягає в застосуванні зручних у користуванні платформ технічного аналізу ринку валют CoinMarketCap та TradingView.

Перспективи подальших досліджень. Описані в роботі основні аспекти до розробки веб-орієнтованого інформаційного сервісу з обміну валют забезпечать підвищення ефективності прийняття рішень у процесі регулювання обмінних валютних операцій та оперативності обліку валюти й можуть бути впроваджені у фінансові установи для моніторингу курсу валюти й криптовалюти.

Список використаних джерел

- [1] В. М. Шелудько, *Фінансовий ринок*. Київ: Знання, 2015.
- [2] Л. О. Бакаєв, Е. О. Соколова, І. П. Шиндирук, та Л. П. Грознецька, *Ринок фінансових послуг*. Київ: ДЕДУТ, 2014.
- [3] З. Васильченко, "Методологічні аспекти дослідження сутності банківських установ як фінансових посередників", *Банківська справа*, № 4, с. 11-23, 2008.
- [4] Н. М. Внукова, *Розвиток ринків фінансових послуг в умовах європейської інтеграції*. монографія. Харків: ТО Ексклюзив, 2014.
- [5] Л. М. Горбач, та О. Б. Каун, *Ринок фінансових послуг*: навч. посіб. Київ: Кондор, 2006.
- [6] Д. І. Дема, та І. В. Абрамова, *Ринок фінансових послуг*: навч. посіб. Київ: Алерта, 2013.
- [7] С. М. Еш, *Ринок фінансових послуг*: підручник. Київ: Центр учбової літератури, 2015.
- [8] С. М. Еш, "Формування фінансового посередництва на ринку фінансових послуг", *Вісник Одеського національного університету. Економіка*, т. 18, вип. 2 (1), с. 226, 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vopu_econ_2013_18_2\(1\)_53](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vopu_econ_2013_18_2(1)_53). Дата звернення: Жовт. 21, 2020.

- [9] В. В. Корнєєв, *Фінансові посередники як інститути розвитку*: монографія. Київ: Основа, 2007.
- [10] С. В. Науменкова, та С. В. Міщенко, *Ринок фінансових послуг*: навч. посіб. Київ: Знання, 2010.
- [11] Є. М. Сич, В. П. Ільчук, та Н. І. Гавриленко, *Ринок фінансових послуг*: навч. посіб. Київ: ЦУЛ, 2012.
- [12] О. Береславська, "Курсоутворення гривні в контексті змін у світовій валютній системі", *Вісник НБУ*, № 3, с. 10-16, 2014.
- [13] Закон України "Про запобігання та протидію легалізації (відмиванню) доходів, одержаних злочинним шляхом". [Чинний від 2002-11-28], № 249-IV, с. 1.
- [14] Закон України "Про фінансові послуги та державне регулювання ринків фінансових послуг". [Чинний від 2001-07-12], № 2664-III, с. 1.
- [15] О. В. Свіржевський, та Л. П. Оксамитна, "Веб-орієнтований інформаційний сервіс з обміну валют", на *V Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології в освіті, науці і техніці (ІТОНТ-2020)*: тези доп. Черкаси: ЧДТУ, 2020, с. 50-51.
- [16] Библиотека React – обязательный инструмент для современного веб-разработчика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://webformyself.com/react-obязatelnyj-instrument-veb-razrabotchika/>. Дата обращения: Септ. 18, 2020.
- [17] Amazon Cognito. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://searchaws.techtarget.com/definition/Amazon-Cognito>. Дата обращения: Сент. 20, 2020.
- [18] CoinMarketCap. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://coinmarketcap.com/ru/>. Дата обращения: Сент. 23, 2020.
- [19] TradingView. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.tradingview.com/>. Дата обращения: Сент. 23, 2020.
- [2] L. O. Bakaev, E. A. Sokolova, I. P. Shindyruk, and L. P. Groznetskaya, *Financial services market: a textbook*. Kyiv: DETUT, 2014. [in Ukrainian].
- [3] Z. Vasilchenko, "Methodological aspects of the research of the essence of banking institutions as financial intermediaries", *Bankivska sprava*, no. 4, pp. 11-23, 2008. [in Ukrainian].
- [4] N. M. Vnukova, *Development of financial services markets in the conditions of European integration: a monograph*. Kharkiv: TO Exclusive, 2014. [in Ukrainian].
- [5] L. M. Gorbach, and O. B. Kaun, *Financial services market: a textbook*. Kyiv: Condor, 2006. [in Ukrainian].
- [6] D. I. Dema, and I. V. Abramova, *Financial services market: a textbook*. Kyiv: Alerta, 2013. [in Ukrainian].
- [7] S. M. Esh, *Financial services market: a textbook*. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury, 2015. [in Ukrainian].
- [8] S. M. Esh, "Formation of financial intermediation in the market of financial services", *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Ekonomika*, vol. 18, iss. 2 (1), p. 226, 2013. [Online]. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vonu_econ_2013_18_2\(1\)_53](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vonu_econ_2013_18_2(1)_53). Accessed on: Oct. 21, 2020. [in Ukrainian].
- [9] V. V. Kornieiev, *Financial intermediaries as institutions of development: a monograph*. Kyiv: Osнова, 2007. [in Ukrainian].
- [10] S. V. Naumenkova, and S. V. Mishchenko, *Market of financial services: a textbook*. Kyiv: Znannia, 2010. [in Ukrainian].
- [11] E. M. Sych, V. P. Ilchuk, and N. I. Gavrilenko, *Market of financial services: a textbook*. Kyiv: TsUL, 2012. [in Ukrainian].
- [12] O. Bereslavska, "Exchange rate of hryvnia in the context of changes in the world currency's system", *Visnyk NBU*, no. 3, pp. 10-16, 2014. [in Ukrainian].
- [13] The Law of Ukraine "On prevention and counteraction to legalization (laundering) of proceeds from crime" [Effective from 2002-11-28], no. 249-IV, p. 1. [in Ukrainian].
- [14] The Law of Ukraine "On financial services and state regulation of financial services markets". [Effective from 2001-07-12], no. 2664-III, p. 1. [in Ukrainian].
- [15] O. V. Svirzhevsky, and L. P. Oksamytna, "Web-oriented currency exchange

References

- [1] V. M. Sheludko, *Financial market: a textbook*. Kyiv: Znannia, 2015. [in Ukrainian].

- information service", in *V Int. Sci.-Pract. Conf. Information Technologies in Education, Science and Technology (ITONT-2020)*: abstracts. Cherkasy: ChDTU, 2020, pp. 50-51. [in Ukrainian].
- [16] React library is a must-have tool for the modern web developer. [Online]. Available: <https://webformyself.com/react-obyzatelnyj-instrument-veb-razrabotchika/>. Accessed on: Aug. 18, 2020.
- [17] Amazon Cognito. [Online]. Available: <https://searchaws.techtarget.com/definition/Amazon-Cognito>. Accessed on: Sept. 20, 2020.
- [18] CoinMarketCap. [Online]. Available: <https://coinmarketcap.com/ru/>. Accessed on: Sept. 23, 2020.
- [19] TradingView. [Online]. Available: <https://ru.tradingview.com/>. Accessed on: Sept. 23, 2020.

L. P. Oksamytna, *Ph.D., associate professor*,

e-mail: l.oksamytna@chdtu.edu.ua

O. V. Svirzhevsky

e-mail: svrzhevskijj@rambler.ru

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

DESIGN AND DEVELOPMENT OF WEB-ORIENTED CURRENCY EXCHANGE INFORMATION SERVICE

Today, the financial services market covers a wide range of services and is one of the important and integral components of the modern market economy of Ukraine. The purpose of this work is to review the components of the foreign exchange market and the main aspects of developing a web-based information service for currency exchange. The service should be aimed at a simple user with minimal experience with the Internet, and should have a user-friendly interface and include a large database of financial services for currency exchange. Right now the task belongs to the class of current problems of today. Achieving this goal has necessitated the solution of the following tasks: to explore the subject area in order to create an online currency exchange service; to analyze the existing services providing financial services to clients; to determine their content from the point of view of the average user, potential customer and potential partner; to explore their functionality; to develop a database; to choose software and hardware for the task; to design an online currency exchange service based on modern web technologies. To implement our own development, we offer the use of: React library, Amazon Cognito service, CoinMarketCap platform. The paper considers an overview of the components of the foreign exchange market and the main aspects of developing a web-based information service on currency exchange. According to the research, it can be concluded that the quality and efficiency of financial services to customers largely depend on the use of modern web services. The scientific novelty is the use of the most effective modern software, information technologies and platforms to create convenient web-based information services used to develop a web-based information service for currency exchange. The practical significance of the obtained results is the application of trend platforms of technical analysis of the currency market CoinMarketCap and TradingView.

Keywords: financial services, libraries, functionality, currency market, processes, verification, authentication, user.

УДК 007:004.056

[0000-0002-3121-4517] **Н. М. Баландіна¹**, старший викладач кафедри кібербезпеки,
e-mail: nataliabalandina2103@gmail.com

[0000-0002-8555-5712] **М. Д. Василенко¹**, д.ф.-м.н., д.ю.н., професор,
в.о. завідувача кафедри кібербезпеки,
e-mail: nvas08@ukr.net

[0000-0002-6082-981X] **В. М. Слатвінська¹**, аспірантка кафедри господарського права та процесу,
e-mail: slatvinskaya_valeriya@ukr.net

[0000-0002-0009-337X] **С. В. Сисоєнко²**, к.т.н., старший викладач кафедри
інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
e-mail: s.sysoienko@gmail.com

¹Національний університет «Одеська юридична академія»
Фонтанська дорога, 23, м. Одеса, 65009, Україна

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

ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКОВИХ ПРОЯВІВ У СОЦІАЛЬНОМУ ІНЖИНІРИНГУ В ІНТЕРЕСАХ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Стаття покликана стимулювати інтерес до особливостей підходів до моделювання поведінки людини в інформаційному середовищі та соціальному інжинірингу з метою забезпечення безпеки інформації в інформаційному кіберсередовищі. Розглянуто проблеми побудови кількісної теорії людських систем. З огляду на те, що поведінка людини не піддається математичному моделюванню, жодна зі створених моделей не може бути застосована для здійснення поведінкового аналізу. Доведено потребу в новому методологічному підході до побудови моделі поведінки людини в цифровій сфері, спрямованій на захист інформації в соціальному інжинірингу. Запропоновано синергійно-криптографічний підхід до побудови моделі поведінкових проявів в умовах соціального інжинірингу та в інтересах захисту інформації.

Ключові слова: методологія, моделювання, інжиніринг, поведінка, захист інформації.

Вступ. Інформатизація радикально змінила середовище суспільства, а зміни, що відбуваються, прямим чином стосуються людини та її місця в інформаційному світі. Людина змінюється відповідно до змін в інформаційно-технічних характеристиках суспільства, виступаючи суб'єктом інформаційної реальності, виходячи далеко за інформаційно-технічні параметри.

Інформатизація та інформаційне поле людського буття змінили поведінкові стандарти й ціннісні орієнтації особистості. Не викликає сумнівів, що перед тим, як почати якісь дії, необхідно провести певну роботу зі збирання та перероблення інформації, її осмислення й аналізу і, нарешті, відшукування найраціональнішого рішення. Для цього потрібна обробка великих обсягів інформації, що може виявитися не під силу людині без залучення спеціальних технічних засобів і знань. Від людини вимагається здатність до творчості, що збільшує попит на знання. Водночас в інформаційній небезпеці важливішим ком-

понентом залишається саме людський чинник. Теоретична картина інформаційного суспільства поступово набуває зримих контурів: відбувається прогнозоване перетворення всього світового простору в єдину комп'ютеризовану й інформаційну спільноту людей та інформаційних машин, інформаційна діяльність яких викликає найбільше питань, тому що в результаті такої діяльності під загрозою опинилася сама людина, яка, на відміну від інших істот і технічних об'єктів, наділена розумом. Саме нові інформаційні технології відкривають перспективу для колосального посилення таких фундаментальних особливостей людини, як схильність до маніпуляції і переконання, когнітивні упередження, для їх застосування в не бачених раніше масштабах. Соціальна інженерія передбачає прояв непрофесіоналізму в екстремальних умовах використання та непрофесіоналізму персоналу для отримання доступу до інформації сторонніми особами. В сучасних умовах набули суттєвого розвитку інтелектуальні інформа-

ційні технології, на яких базується вирішення глобальної проблеми штучного інтелекту. Математичне моделювання фактично являє собою потужну методологію дослідження складних систем, включаючи і такі, на яких базуються й системи штучного інтелекту. Спираючись на можливості сучасних обчислювальних методів та інформаційних технологій, методологія забезпечує повніше й глибше дослідження об'єктів і процесів для отримання нових знань, які стають основою для забезпечення прийняття ефективних інноваційних рішень. На сьогодні існують певні типи моделей, які успішно застосовуються для розв'язання складних завдань у різних галузях людської діяльності. Однак водночас важко говорити про прояви поведінки людини, особливо в умовах соціального інжинірингу, і важко піддавати її математичному моделюванню. У зв'язку з цим постала необхідність у розробці нової методології побудови моделі людської поведінки у кіберсфері.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті [1] обговорено модель, коли визначається стан людини як системи з її характеристиками, правилами взаємодії підсистем і параметри, які визначають ступені спроможності для прийняття рішень. Це дає змогу змоделювати динаміку стану системи як результат взаємодії складових. Перевага методу полягає в тому, що зникає необхідність розв'язання складної системи рівнянь, замість цього розв'язок задається безпосередньо за допомогою предикатів. Особливості поведінки людини у стресових (екстремальних) ситуаціях завжди були у центрі уваги науковців. До сьогодні було виконано велику кількість емпіричних досліджень окремих аспектів стресу, складних ситуацій. Однак, попри поширеність виявлення стресу, багато аспектів залишаються недостатньо висвітленими. У роботі [2] проаналізовано реакції людини в умовах стресової ситуації та запропоновано сформулювати окрему галузь «стресологію» як систему дослідження та управління стресами на виробництві. Встановлено, що на різних людей по-різному впливають подразники під час робочої зміни, оскільки не менш важливу роль відіграють зовнішні джерела стресу, тобто ті, що формуються поза межами виробництва, і суб'єктивне ставлення працівника до ситуації загалом. У праці [3] розглядаються прийоми, які застосовуються соціальними інженерами найбільш часто і успішно

в спробах маніпулювання, йдеться, зокрема, про авторитетність, уміння розташувати до себе, взаємність, відповідальність, соціальну належність до авторизованих користувачів, обмежену кількість «безкоштовного сиру». У роботі [4] досліджуються підходи до поведінки соціального інженера, здатного витягувати контакти власника акаунта і відправляти шкідливий контент від його імені, користуючись репутацією та соціальними зв'язками, приписуваними викраденому акаунту. У [5] звернуто увагу на модель порушника інформаційної безпеки та циклічну модель забезпечення безпеки інформації. У [6] розглядається модель поведінки порушника, який здійснює несанкціонований доступ до будь-якої частини збереженої, оброблюваної та переданої інформації, яка потребує захисту. З огляду на те, що поведінка людини не піддається математичному моделюванню, нами вперше звернуто увагу на те, що є потреба в новому методологічному підході до побудови моделі поведінкових проявів у цифровому кіберсередовищі з метою захисту інформації в соціальному інжинірингу.

Метою статті є розробка методологічного підходу до побудови моделі поведінкових проявів у соціальному інжинірингу для захисту інформації.

Виклад основного матеріалу. Атаки соціальної інженерії являють собою значну загрозу кібербезпеці, піддаючи ризику окремих осіб та організації [7]. Соціальна інженерія використовує людську поведінку замість технічних заходів для дослідження систем, різних даних, речей, які можуть принести будь-яку користь [8].

Людська поведінка являє собою послідовність окремих дій, що мають на меті локальні цілі. А діяльність людей, як відомо, це сукупність їх окремих дій і рішень, що приймаються відповідно до цілей, які мають на меті. Внаслідок випадковості навколишнього середовища, випадковості дій людей та випадковості стану самих людей, всі їхні дії та діяльність мають імовірнісний характер. Тому математична теорія людських систем являє собою кількісне представлення дій та діяльності людей в умовах невизначеності.

Сферами застосування соціального інжинірингу є загальна дестабілізація роботи організації з метою зниження її впливу та можливістю подальшого повного руйнування організації: проникнення в мережу організації

для дестабілізації роботи основних вузлів мережі з якою-небудь метою; фінансові махінації в організаціях; фішинг та інші методи крадіжки паролів з метою доступу до персональних банківських даних; конкурентна розвідка: інформація про маркетингові плани організації; інформація про найбільш перспективних співробітників з метою їх подальшого «переманювання» до своєї організації; загальна інформація про організацію, її слабкі та сильні сторони з метою подальшого руйнування організації тим чи іншим способом; крадіжка клієнтських баз [9].

Загальновідомо, що «захист інформації – це комплекс заходів, проведених власником інформації, по огороженню своїх прав на володіння й розпорядження інформацією, створенню умов, що обмежують її поширення, що й виключають або істотно ускладнюють незаконний доступ до інформації з обмеженим доступом і її носіїв» [5]. Водночас досягти необхідного рівня захищеності можна тільки за рахунок певних принципів захисту інформації, до яких належать комплексне використання наявних методів і засобів захисту, безперервна реалізація заходів із захисту інформації, необхідність та достатність комплексу засобів і заходів, адекватність витрат на захист вартості можливої шкоди внаслідок реалізації загрози.

Традиційний підхід до захисту інформації передбачає застосування стандартних механізмів захисту: ідентифікацію та аутентифікацію, механізми обмеження доступу до інформації згідно з правами суб'єкта і криптографічні механізми [10]. Однак наразі слід переглянути наявний методологічний підхід.

Проблеми побудови кількісної теорії людських систем

Традиційні якісні методи управління суспільними процесами, що базуються на досвіді та інтуїції людей, потребують перегляду в бік більшого залучення кількісних методів, для розв'язання нагальних проблем сучасності. Це пов'язано з необхідністю прийняття швидких і адекватних рішень в умовах революційних змін, у житті суспільства, і, перш за все, в умовах глобалізації політики, економіки, проблем безпеки та комунікації між людьми.

Безвідносно того, в якій сфері діяльності людини приймаються зазначені рішення, центром усього цього процесу є деяка людська система (Human system). Це може бути індивід, група людей, колектив, організація

і т.ін. Діяльність людських систем у будь-якій конкретній сфері зводиться до прагнення збільшення ймовірності її успіху, супроводжуючи все це мінімізацією необхідних ресурсів для її виконання.

Ця обставина створює необхідні передумови для побудови кількісної теорії людських систем, поведінка яких може бути описана фундаментальними законами абсолютно так само, як це робиться в теоретичній фізиці, математичній біології, математичній економіці та в інших галузях знань.

Вдалими прикладами побудови подібних кількісних теорій у соціальних і організаційних науках є кількісна соціодинаміка та динаміка систем. Головною метою досліджень обох цих наукових напрямів є залежності характеристик людських систем від часу, тобто, по суті, ці напрями сфокусовані на динамічній стороні поведінки людських систем.

Однак величезна кількість проблем, які пов'язані з діяльністю людських систем, не можуть бути представлені, описані та вирішені методами кількісної соціодинаміки (тобто статистичної фізики) або динаміки систем, оскільки ці проблеми інваріантні щодо часу.

Річ у тім, що суть реалізації будь-якої дії та діяльності людей – це знаходження компромісу між цілями й вартістю цієї діяльності, засобами виконання і тривалістю чергової дії в життєвому процесі, всілякими ризиками при її виконанні та якістю кінцевого результату.

Якщо ж параметри людей та параметри розв'язуваних ними завдань і проблем не залежать від часу або ця залежність слабка, то при дослідженні подібних завдань і проблем потреба у використанні динамічного підходу відпадає, бо варто робити статичні розрахунки. Зрозуміло, що життя людей – це послідовність дій, кожна з яких може характеризуватися величиною (або розміром, або масштабістю) W і труднощами виконання D .

Кожна дія людей характеризується також своєю сукупною складністю Cd , яка визначається її розміром і складністю за наступним виразом: $Cd = W \times D$ [11].

Люди, залежно від своїх здібностей та маючи різні рівні навичок і знань, можуть подолати складність дії Cd , частково або повністю, забезпечуючи водночас різні якості виконання.

Таким чином, люди, маючи продуктивність P (яка є відображенням їх навичок

і знань) і споживаючи зусилля E , можуть подолати деяку частину C_s складності C_d , яка визначається як $C_s = E \times P$.

Тобто, з одного боку, для забезпечення нормального перебігу життєвого процесу є потреба у діях людей, а з другого боку, тобто з боку людей, у вигляді відповіді на вимоги життя маємо їхні реальні дії, які є відображенням їх здібностей і вмінь.

Як було сказано вище, успішне виконання дій людьми має на увазі певний баланс, або рівновагу, між складністю дії C_d та здатністю людей C_s долати цю складність.

Найпростіший випадок зазначеного балансу – це рівність зазначених складнощів, тобто $C_s = C_d$, або $E \times P = W \times D$, що являє собою умову рівноваги життя і діяльності людей. Зусилля людей E визначається як [11]

$$E = N \times T,$$

де N – кількість людей, що беруть участь у дії (або діяльності), T – тривалість зусиль людей.

Таким чином, умова рівноваги діяльності людей набуде вигляду [11]

$$N \times T \times P = W \times D.$$

Сенс цієї рівності полягає в тому, що група людей, яка складається з N осіб, діючи з продуктивністю P протягом відрізка часу T , може здійснити дію, або діяльність, яка має величину W і труднощі D .

Це також означає, що, якщо розглядати діяльність людей як систему, то на високому рівні таку систему можна описати п'ятьма параметрами, або системними змінними N , T , P , W і D . Між цими параметрами, або системними змінними існують функціональні зв'язки фундаментального характеру. Наприклад, збільшення труднощі D деякої діяльності людей призводить до зменшення їх продуктивності P .

Також зменшення планової тривалості робіт T призводить до збільшення кількості виконавців N , що, в свою чергу, призводить до зменшення продуктивності людей P через збільшення часу контактів між людьми для комунікації і координації їх зусиль і т. д.

Зміна значення кожного із зазначених параметрів породжує ланцюжок нелінійних змін значень інших параметрів людської системи. Кожному набору чисельних значень зазначених параметрів відповідає певний стан системи, що просто означає, що умова рівноваги діяльності людей $N \times T \times P = W \times D$

являє собою типове рівняння стану (в сенсі відомих рівнянь стану у фізиці).

Чудовою особливістю цих рівнянь є те, що вони в неявному вигляді містять усі можливі функціональні зв'язки між параметрами відповідних систем (включаючи фізичні, біологічні та соціальні системи).

Для отримання функціональних зв'язків між параметрами досліджуваних систем, поряд з рівнянням стану, потрібні деякі додаткові умови у вигляді сталості значень частини параметрів або у вигляді інших обмежень.

Приклад практичного застосування – рівняння стану для планування діяльності заданої складності C_d (тобто для діяльності людей з $C_d = W \times D = \text{Constant}$).

З урахуванням цієї умови рівняння стану людської системи набуде вигляду

$$N \times T \times P = C_d = \text{Constant} [11].$$

Таким чином, спільне рішення рівняння стану дає можливість вивести функціональні залежності між параметрами людської системи аналітичним шляхом.

Пошук оптимального методологічного підходу до захисту інформації в соціальному інжинірингу

Як відомо, «методологічні дослідницькі підходи» ґрунтуються на висновках світоглядних ідей, які в межах тієї чи іншої наукової парадигми визначають для науковця особливості виявлення, добору та систематизації досліджуваних фактів, а також їх інтерпретації й оцінки» [12].

Водночас реалізація безперервного процесу захисту інформації можлива тільки на основі систем концептуального підходу й промислового виробництва засобів захисту, впровадження надійних механізмів захисту й забезпечення їх сталого функціонування та високої ефективності, провадження відповідних робіт тільки фахівцями високої кваліфікації в сфері захисту інформації [13].

Створення сучасних систем інформаційної безпеки на практиці може задовольнятися трьома формальними методами побудови моделей: кібернетичним підходом, системною динамікою і теоретично-множинним підходом [14]. Проте, на нашу думку, в умовах та інтересах захисту інформації відбувається певна взаємодія чинників впливу на отримання даних. Йдеться про виникнення нової багатоваріантності, що створює нову якість на новому рівні розвитку системи, що і реалізується

в інтересах захисту інформації. Водночас проблема невизначеності системи залишається. Однак принциповим залишається те, що відбувається синергія. Система характеризується синергійними процесами та має енергійну функцію.

Авторами детально розглядаються «синергія», «синергетика», «синтез», «синергетичний ефект» та синергетичний підхід у праві [15]. Вважаємо, що у кіберсфері під час процесу захисту даних можливо застосовувати комплексний підхід. Тож спробуємо сформулювати авторське бачення до методологічних підходів.

Пропонуємо застосувати *синергетично-криптографічний підхід* до побудови моделі в умовах соціального інжинірингу та захисту інформації. Свого часу в телекомунікаційних системах сформувався захист інформації, пов'язаний з криптологією, яка, в свою чергу, поділяється на два напрями: криптографію та криптоаналіз. Мета цих напрямів прямо протилежна. Якщо криптографія займається пошуком та дослідженнями математичних методів перетворення інформації, то криптоаналіз досліджує можливості розшифрування інформації без використання ключів. Криптографія включає такі напрями: симетричні криптосистеми, системи електронного підпису, криптосистеми з відкритим ключем та й, фактично, управління ключами. Реально криптографія дає можливість перетворювати інформацію таким чином, що після кодування її можна відновити тільки при наявності знань щодо ключа системи. Як інформація, що підлягає

шифруванню та дешифруванню, розглядаються тексти, побудовані на деяких кінцевих множинах знаків, використаних для кодування інформації. Питання криптографічного розуміння про підходи моделювання та визначення їх особливостей виникли тому, що своїми можливостями їх можна розглядати як багатоваріантні.

Свого часу розробники глобальних комп'ютерних мереж, а також при створенні телекомунікаційних систем мали на увазі тільки технічний захист. Водночас не передбачалася багатоваріантність людського фактора. В той же час криптографічне розуміння, якщо не забезпечує запобігання людському фактору, то надає технічну реалізацію деяких ймовірностей щодо перетворень інформації таким чином, що її відновлення можливе лише за допомогою ключа, а сам процес відображається достатньо простою схемою (рисунком 1), на якій зображено відомі процеси шифрування і дешифрування даних. Однак у разі дії внутрішніх і зовнішніх факторів недостатньо одних криптографічних рішень, що й було спонуканням до створення та запровадження синергійно-криптографічного підходу до моделі поведінкових проявів у соціальному інжинірингу в інтересах захисту інформації. Отже, в нашому випадку маємо справу з більш складними процесами, ніж ті, які були відомі раніше, звертаючи увагу на складність рішень, що пов'язано як з внутрішнім, так і зовнішнім людським фактором, який залишається до кінця не визначеним.

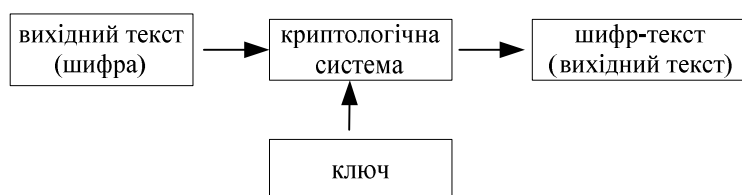


Рисунок 1 – Процес шифрування (дешифрування) даних [16]

Відзначимо ще раз результати нашої роботи щодо синергійної дії в зазначених системах, коли в результаті узгодженої спільної дії елементів виникає нова якість, яка не може бути досягнутою кожним окремим елементом [15]. У нашому контексті можна відзначити відому модель системи таємного зв'язку К. Шеннона, яка запропонована в його роботі

«Теорія зв'язку в секретних системах», опублікованій у 1949 р. [16-17]. Прийнято вважати, що ця робота стала початком ери наукової криптографії. У цій роботі К. Шеннон, зокрема, розглядає поняття стійкості шифру в рамках відповідної моделі і вводить загальне поняття практичної стійкості шифрів. За К. Шенноном, криптографічна система є сі-

мейством обернених (рисунок 2) відображень безлічі можливих повідомлень у безліч криптограм. Кожне відображення $T(k)$ є шифруванням. Вибір відображення проводиться за допомогою випадкового секретного параметра k , званого ключем. Ключ також дає змогу вибрати зворотне перетворення (розшифрування). Реально він використовується як параметр в обчисленнях при шифруванні і розшифруванні. Ключ обов'язково має бути доступним відправнику та одержу-

вачу в необхідний момент. Така система секретного зв'язку має назву симетричної криптосистеми (симетрія користувачів щодо знання секрету). У цій системі питання про розподіл ключів фактично виноситься К. Шенноном за рамки моделі. Важливим моментом є модель противника, якому доступний перехоплення шифр-тексту і якого відомий алгоритм шифрування та його параметри, за винятком ключа (принцип відкритості, загальнодоступності системи).

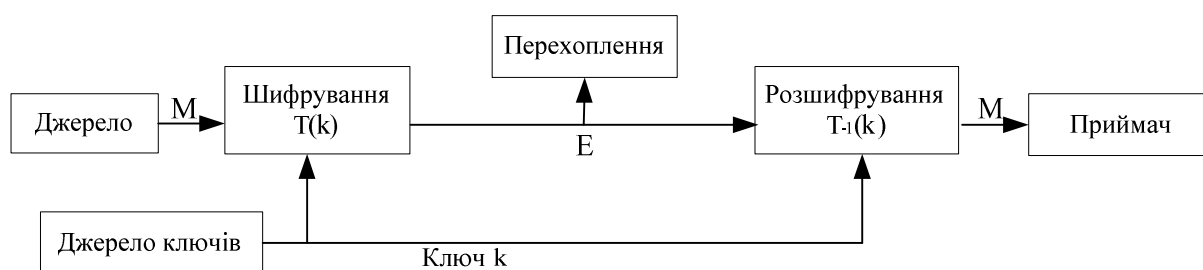


Рисунок 2 – Модель Шеннона секретного зв'язку [16]

Однак у рамках нашого дослідження ця модель може не спрацювати, а скоріше – зовсім не спрацює, бо за цей час сталося багато обмежень та з'явилися багатоваріантність і велика невизначеність, про які йшлося вище.

Крім того, принциповим є те, що функція захисту інформації покладена на звичайних користувачів мережі Internet. Підкреслимо, що захист інформації в комп'ютерних системах має низку специфічних особливостей, пов'язаних із тим, що інформація не є жорстко пов'язаною з носієм, може легко та швидко копіюватися і передаватися по каналах зв'язку [17].

Будь-які загрози витоку інформації – явища, тенденції та чинники, що унеможливають чи ускладнюють або можуть унеможливити чи ускладнити реалізацію інтересів власника даних та збереження цінності й достовірності інформації. Відома дуже велика кількість загроз інформації, які можуть бути реалізовані як з боку зовнішніх порушників, так і з боку внутрішніх порушників. Радикальне вирішення проблем захисту електронної

інформації може бути отримано тільки на базі використання криптографічних методів, які дають можливість вирішувати найважливіші проблеми захищеної автоматизованої обробки та передачі даних.

Поведінка порушників в інформаційному кіберсередовищі видозмінюється відповідно до рівня обізнаності щодо методів захисту інформації та залежить від поведінки власників інформації. Отже, відбувається взаємодія «порушників» (соціальних інженерів) та власників інформації – користувачів мережі Internet шляхом досягнення єдиної мети – отримання чи збереження інформації. Ця синергія відбувається за конкретних обставин та у певний час. В результаті відбувається поліпшення якісних показників методів захисту інформації.

На рисунку 3 структурно зображено розуміння синергійно-криптографічного підходу до моделювання поведінкових проявів у соціальному інжинірингу в інтересах захисту інформації.

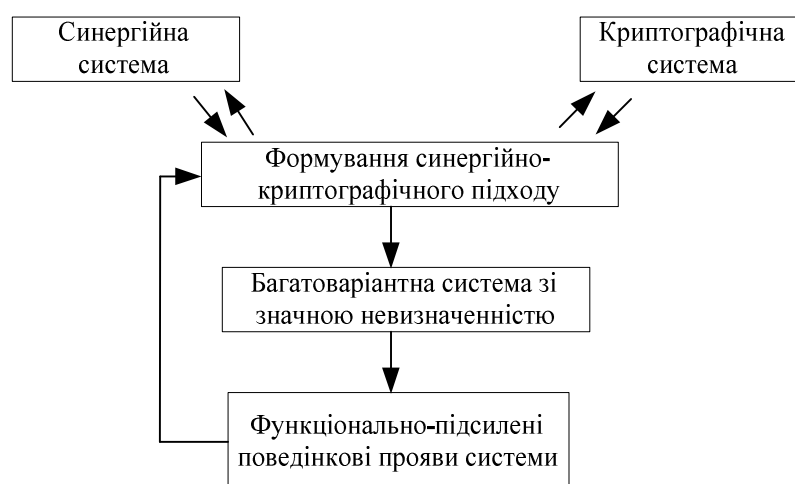


Рисунок 3 – Структурне відображення синергійно-криптографічного підходу до моделювання поведінкових проявів

Описати структурну побудову синергійно-криптографічного підходу можна наступним чином: в основі синергійної та криптографічної систем, які взаємовпливають на багатоваріантну систему зі значною невизначеністю, лежать функціонально-підсилені поведінкові прояви системи, які в сукупності приводять до формування синергійно-криптографічного ефекту та відповідного підходу. Водночас існують підсилювальні прояви системи на кінцевій стадії рішення з сильним зворотним зв'язком, що впливає на саму формуючу систему.

Таким чином, синергійно-криптографічний підхід до побудови моделі можна сформулювати як складний, що має дві складові, одна з яких є багатоваріантною з невизначеності, друга – криптографічною, яка в умовах багатоваріантності неспроможна відображати кількісні характеристики при загальному посиленні системи з можливими збоями при захисті інформації. В результаті цього відбулося створення принципово нового підходу до розв'язування задач у системах соціального інжинірингу.

Висновки і перспективи подальшого розвитку. Досліджено кількісну теорію людських систем на прикладі систем кількісної соціодинаміки (динаміки систем) та виявлено проблеми при її побудові. Наукова новизна полягає в тому, що авторами вперше розроблено й обґрунтовано синергійно-криптографічний підхід для забезпечення моделювання поведінкових проявів у соціальному інжинірингу з метою вирішення задач захисту інформації.

Важливість отриманих результатів обумовлюється тим, що в умовах багатоваріантності, коли існують багатофакторні обмеження, виникає принципова невизначеність. Виникає складність у проведенні кількісного аналізу наявних методичних підходів. В умовах соціального інжинірингу поведінка людини не піддається математичному моделюванню. Представлений у роботі синергійно-криптографічний підхід дає можливість вивчати поведінку людини в соціальному інжинірингу з метою забезпечення безпеки інформації в інформаційному кіберсередовищі.

Перспективою подальших досліджень є проведення дослідження імовірнісної інтерпретації рівнянь стану людської системи та аналізу тривалості дій людей у соціальному інжинірингу в умовах захисту інформації. Крім того, доцільно провести аналіз ефективності застосування ймовірнісного підходу до обраної теми дослідження.

Список використаних джерел

- [1] А. Л. Белкарян, и А. С. Акопов, "Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов", *Бизнес-информатика*, № 1 (31), с. 69-77, 2015.
- [2] Л. І. Мочурад, Н. І. Бойко, та М. В. Яцків, "Моделювання стресової ситуації людини в автоматизованих системах управління технологічними процесами", *Науковий вісник НЛТУ України*, т. 30, № 1, с. 152-157, 2020.
DOI: 10.36930/40300126

- [3] Р. Чалдини, *Психология влияния: учебник для вузов*. Санкт-Петербург, Россия: Питер, 2008.
- [4] A. Dalton et al. "Active defense against social engineering: The case for human language technology", in *Proc. First Int. Workshop on Social Threats in Online Conversations: Understanding and Management*, 2020, pp. 1-8.
- [5] Г. М. Гулак, *Методологія захисту інформації. Аспекти кібербезпеки: підручник*. Київ, Україна: Вид-во НА СБ України, 2020.
- [6] С. М. Сергєєв, "Модель поведінки порушника", на XXXVII наук.-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України: зб. тез, (м. Київ, 15 трав. 2019 р.) / ПІМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2019, с. 37-38.
- [7] Adam Dalton, Alan Zemel, Amirreza Masoumzadeh et al., "Modeling social engineering risk using attitudes, actions, and intentions reflected in language use", in *Conf. FLAIRS-32*, FL, US Project: PAN-ACEA, 2019, pp. 509-520. [Online]. Available: https://www.flairs-32.info/program#h.p_ngc7nAzybVbQ
- [8] Neetu Bansla, Swati Kunwar, and Khushboo Gupta, "Social engineering: A technique for managing human behavior", *Journal of Information Technology and Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 18-22, 2019. DOI: 10.5281/zenodo.2580822
- [9] М. В. Кузнецов, *Социальная инженерия и социальные хакеры: учеб.-метод. пособие*. Санкт-Петербург, Россия: БХВ-Петербург, 2010.
- [10] О. В. Ямковий, та А. Б. Качинський, "Пошук аномалій в поведінці користування Інтернет-ресурсами за допомогою алгоритмів кластеризації машинного навчання", на I наук.-практ. конф. Інформаційна безпека: сучасний стан, проблеми та перспективи, (м. Київ, 20 верес. 2019 р.) / упоряд.: В. М. Фурашев, С. Ю. Петраєв, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". Київ: Політехніка, с. 69-74, 2019.
- [11] П. Барсегян, *Елементи математичної теорії діяльності людських систем*, ч. 1. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://iarex.ru/insimsgs/d468ea43f597f6f.pdf>
- [12] Т. С. Перун, "Адміністративно-правовий механізм забезпечення інформаційної безпеки в Україні", дис.. канд. юр. наук за спец. 12.00.07 "Адміністративне право і процес; фінансове право; інформаційне право", Нац. ун-т "Львівська політехніка", Львів, 2019.
- [13] А. Дмитренко, та В. Мирошниченко, "Сутність потенційних та реальних загроз інформації", на III Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених, студентів і курсантів *Захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах*: зб. тез доп., (м. Львів, 28 листоп. 2019 р.). Львів, 2019, с. 4-6.
- [14] Н. М. Баландіна, та М. Д. Василенко, "Деякі нотатки щодо математичних можливостей в моделюванні захисту інформації", на II Всеукр. наук.-практ. конф. *Кібербезпека в сучасному світі* (м. Одеса, 20 листоп. 2020 р.) / за ред. О. В. Дикого; уклад.: Н. І. Логінова, В. Д. Бойко, та М. О. Флюнт. Одеса: Гельветика, 2020, с. 124-128.
- [15] М. Д. Василенко, та В. М. Слатвінська, "Сила синергії у проявах правової науки: міждисциплінарне дослідження", *Наукові праці Національного університету "Одеська юридична академія"*, т. 24 / гол. ред. Ю. В. Цуркан-Сайфуліна; МОН України, НУ "ОЮА". Одеса: Гельветика, с. 18-26, 2019. DOI: 10.32837/npnuola.v24i0.650
- [16] К. Шеннон, "Теория связи в секретных системах", в *Работы по теории информации и кибернетике*. Москва, Россия: Иностран. лит., 1963.
- [17] *Введение в криптографию* / под общ. ред. В. В. Ященко, 3-е изд., доп. Москва, Россия: МЦНМО: "ЧеРо", 2000.
- [18] О. В. Виноградов, "Актуальні питання захисту інформації в автоматизованих системах", на Наук.-практ. конф. *Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави*: зб. тез наук. доп., (м. Київ, 4 квіт. 2019 р.). [Електрон. вид.]. Київ: Нац. акад. СБУ, 2019, с. 286-287.

References

- [1] A. L. Belkarian, and A. S. Akopov, "Modeling of crowd behavior based on intellectual dynamics of interacting agents", *Biznes-informatika*, no. 1 (31), pp. 69-77, 2015. [in Russian].

- [2] L. I. Mochurad, N. I. Boyko, and M. V. Yatskiv, "Modelling of human stress situation in automated control systems of technological processes", *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, vol. 30, no. 1, pp. 152-157, 2020. DOI: 10.36930/40300126 [in Ukrainian].
- [3] R. Cialdini, *Psychology of influence: a textbook for universities*. Saint Petersburg, Russia: Peter, 2008. [in Ukrainian].
- [4] A. Dalton et al. "Active defense against social engineering: The case for human language technology", in *Proc. First Int. Workshop on Social Threats in Online Conversations: Understanding and Management*, 2020, pp. 1-8.
- [5] G. M. Gulak, *Methodology of information protection. Aspects of cybersecurity: a textbook*. Kyiv, Ukraine: Vyd-vo NA SB Ukrainy, 2020. [in Ukrainian].
- [6] S. M. Sergeev, "The model of violator's behavior", in *XXXVII Sci. and Tech. Conf. of young scientists and specialists of H. Ye. Pukhov Institute of modeling problems in the energy sector of the National Academy of Sciences of Ukraine: abstracts*, (Kyiv, May 15, 2019), 2019, pp. 37-38. [in Ukrainian].
- [7] Adam Dalton, Alan Zemel, Amirreza Masoumzadeh et al., "Modeling social engineering risk using attitudes, actions, and intentions reflected in language use", in *Conf. FLAIRS-32*, FL, US Project: PANACEA, 2019, pp. 509-520. [Online]. Available: <https://www.flairs-32.info/program#h.pngc7nAzybVbQ>
- [8] Neetu Bansla, Swati Kunwar, and Khushboo Gupta, "Social engineering: A technique for managing human behavior", *Journal of Information Technology and Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 18-22, 2019. DOI: 10.5281/zenodo.2580822
- [9] M. V. Kuznetsov, *Social engineering and social hackers: a textbook*. Saint Petersburg, Russia: BKhV-Peterburg, 2010. [in Ukrainian].
- [10] O. V. Yamkovy, and A. B. Kaczynski, "The search for anomalies in the behavior of Internet resources use with the help of machine learning clustering algorithms", in *First Sci. and Pract. Conf. Information Security: Current State, Problems and Prospects*, (Kyiv, Sept. 20, 2019) / V. M. Furashev, and S. Yu. Petryaev, Comp., National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Politehnika, 2019, pp. 69-74. [in Ukrainian].
- [11] P. Barseghyan, *Elements of mathematical theory of human systems activities*, part 1. [Online] Available: <https://iarex.ru/insimg/d468ea43f597f6f.pdf>.
- [12] T. S. Perun, "Administrative and legal mechanism for ensuring information security in Ukraine", Ph.D. thesis in specialty 12.00.07 "Administrative law and process; Financial Law; Information Law", National University "Lviv Polytechnic", Lviv, 2019. [in Ukrainian].
- [13] A. Dmytrenko, and V. Miroshnichenko, "The essence of potential and real threats to information", in *III All-Ukr. Sci. and Pract. Conf. of young scientists, students and cadets Information protection in information and communication systems: abstracts*, (Lviv, Nov. 28, 2019). Lviv, 2019, pp. 4-6. [in Ukrainian].
- [14] N. M. Balandina, and M. D. Vasilenko, "Some notes on mathematical possibilities in information security modeling", in *II All-Ukr. Sci. and Pract. Conf. Cybersecurity in the modern world* (Odessa, Nov. 20, 2020) / A. V. Dykyy, Ed.; N. I. Loginova, V. D. Boyko, and M. O. Flunt, Comp. Odessa: Helvetika, 2020, pp. 124-128. [in Ukrainian].
- [15] M. D. Vasilenko, and V. M. Slatvinska, "The power of synergy in the manifestations of legal science: An interdisciplinary study", *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu "Odeska yurydychna akademiia"*, vol. 24 / Yu. V. Tsurkan-Sayfulina, Chief Ed.; Ministry of education and science of Ukraine, NU "UIA". Odessa: Helvetika, pp. 18-26, 2019. DOI: 10.32837/npnuola.v24i0.650 [in Ukrainian].
- [16] K. Shannon, "The theory of communication in secret systems", in *Works on the theory of information and cybernetics*, Moscow, Russia: Inostr. lit., 1963. [in Russian].
- [17] *Introduction to Cryptography* / under the general editorship of V. V. Yashchenko, 3rd ed., add. Moscow, Russia: MTsNMO: "CheRo", 2000. [in Russian].
- [18] O. V. Vynohradov, "Actual issues of information protection in automated systems", in *Sci. and Pract. Conf. Actual problems of information security in automated systems: abstracts*, (Kyiv, Apr. 4, 2019). [Online]. Kyiv: Nats. akad. SBU, 2019, pp. 286-287. [in Ukrainian].

N. M. Balandina¹, senior lecturer of the department of cybersecurity,
e-mail: nataliabalandina2103@gmail.com

M. D. Vasilenko¹, Dr.Phys.-Math.Sc., Doctor of Law, professor,
acting head of the department of cybersecurity,
e-mail: nvas08@ukr.net

V. M. Slatvinska¹, postgraduate student of the department of economic
law and process,
e-mail: slatvinskaya_valeriya@ukr.net

S. V. Sysoienko², PhD, senior lecturer of the department of information
security and computer engineering
e-mail: s.sysoienko@gmail.com

¹National university «Odessa Law Academy»
Fontanskaya doroga, 23, Odessa, 65009, Ukraine

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

APPROACH TO MODELING OF BEHAVIORAL MANIFESTATIONS IN SOCIAL ENGINEERING IN THE INTERESTS OF INFORMATION PROTECTION

The article is devoted to the peculiarities of approaches to modeling of human behavior in the information environment and social engineering to ensure information security in the information cyber environment.

The meanings of the concepts "mathematical theory of human systems", "human activities" and "information protection" are considered. The areas of application of social engineering in the process of information protection are clarified. The attention is drawn to the existing traditional approach to ensuring the security of data storage in the information cyber environment.

Furthermore, the problems of constructing a quantitative theory of human systems are considered. It is proved that since human behavior is not amenable to mathematical modeling, none of the created models can be used for behavioral analysis.

Moreover, we emphasize that the authors for the first time have drawn attention to the fact that there is a need for a new methodological approach to building a model of human behavior in the digital sphere aimed at protecting information in social engineering.

A synergistic and cryptographic approach to constructing a model of behavioral manifestations in the context of social engineering and information security interests is proposed. The essence of the authors' methodological approach is manifested in the fact that as a result of the synergistic interaction of "violators" (social engineers) and information owners – internet users, aimed at achieving a single goal, the possession of information that occurs under specific circumstances and at a certain time, the quality indicators of information protection methods improve.

Finally, it is emphasized that to study human behavior in social engineering for further information protection, it is possible only by changing the methodological approach.

Keywords: methodology, modeling, engineering, behavior, information protection.

УДК 621.397.335.1

[0000-0002-2046-481X] **Е. В. Фауре**, *д.т.н., професор*,
e-mail: e.faure@chdtu.edu.ua

[0000-0001-9360-5460] **В. В. Швидкий**, *к.т.н., доцент*,

[0000-0002-3049-3497] **А. І. Щерба**, *к.ф.-м.н., доцент*,

[0000-0003-1791-6755] **О. О. Харін**, *д.філос.*,

[0000-0002-3185-8427] **Б. А. Ступка**

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

МЕТОД ЦИКЛОВОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ПЕРЕСТАНОВОК

У роботі розроблено та досліджено метод циклової синхронізації приймальної та передавальної станцій телекомунікаційних систем передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням в умовах впливу в каналі зв'язку завад високої інтенсивності. Розроблений метод базується на використанні як синхрокомбінації перестановки чисел, її поділу на префіксну та суфіксну частини, а також на мажоритарній обробці прийнятих фрагментів. Теоретично визначено та досліджено ймовірнісні показники розробленого методу: ймовірність правильно-го встановлення синхронізму та ймовірність хибного встановлення синхронізму. Розроблено структурну схему пристрою циклової синхронізації. Побудовано програмну модель передавання даних, в якій реалізовано розроблений алгоритм встановлення циклового синхронізму. Оцінено експериментально отримані ймовірнісні характеристики розробленого методу. Підтверджено їх відповідність теоретичним показникам.

Ключові слова: факторіальне кодування, синхрокомбінація, ймовірність встановлення синхронізму, коефіцієнт накопичення, завада високої інтенсивності.

Вступ. Процедура циклової синхронізації є невід'ємною частиною всіх стандартних протоколів мережевої взаємодії [1-3]. Під час встановлення з'єднання до процедури перенесення призначених для користувача даних вона реалізує пошук меж синхрокомбінації (роздільника).

У цій роботі розглядаються телекомунікаційні системи з нероздільним факторіальним кодуванням. У роботах [4-8] висвітлено базові принципи побудови нероздільних факторіальних кодів та їх характеристики, проте не приділено уваги питанню встановлення циклового синхронізму. Таким чином, на сьогоднішній момент відсутні методи циклової синхронізації для подібних систем передавання даних.

Серед робіт, присвячених процедурам циклової синхронізації, можна виділити роботи [9-13]. Для підвищення ефективності встановлення циклового синхронізму вони, зокрема, передбачають використання підсумовування за модулем два синхрокомбінації з потоком інформаційних даних. Це дає можливість скоротити обсяг службової інформації, переданої каналом зв'язку, для циклової синхронізації повідомлень і більш ефективно ви-

користовувати ресурси каналу зв'язку. Разом з тим, телекомунікаційні системи з блоковим, зокрема факторіальним, кодом [14], на відміну від систем передавання даних з поточним, наприклад згортковим, кодом [15-16], не дають змоги використовувати такий підхід, оскільки накладення на інформаційний блок синхрокомбінації призводить до катастрофічних деформацій блоку даних і безповоротної втрати інформації. Це виключає можливість застосування зазначеного підходу циклової синхронізації в системах з факторіальним кодуванням.

Метою дослідження є забезпечення входження в цикловий синхронізм телекомунікаційних систем передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням в умовах впливу в каналі зв'язку завад високої інтенсивності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити метод і алгоритм встановлення циклового синхронізму для телекомунікаційних систем передавання інформації з нероздільним факторіальним кодуванням;

- визначити ймовірність встановлення циклового синхронізму для завад різної інтенсивності;
- побудувати модель, яка реалізує розроблений алгоритм встановлення циклового синхронізму;
- виконати порівняння ймовірнісних показників входження в синхронізм для завад різної інтенсивності.

Виклад основного матеріалу. Основною ідеєю для запропонованого в цій роботі методу встановлення циклової синхронізації є наступне:

- синхрокомбінацією є перестановка π ;
- конструкція синхрокомбінації поділяється на префіксну частину, що визначає межі її символів, і суфіксну частину, що визначає межі синхрокомбінації-перестановки;
- підвищення достовірності передавання синхрокомбінації забезпечується її багаторазовим повторенням і мажоритарною обробкою прийнятих фрагментів.

Опис методу встановлення циклової синхронізації на основі перестановок

Метод встановлення циклової синхронізації передбачає такі кроки:

- 1) синхрокомбінацією є перестановка π довжини M символів. Символи перестановки π кодується рівномірним двійковим кодом таким чином, щоб перший символ записувався послідовністю, що складається тільки з нулів, а другий – тільки з одиниць. Крім того, третій символ синхрокомбінації в двійковому записі повинен починатися нулем, а останній символ повинен закінчуватися двійковою одиницею. Решта символів повинна містити максимальну кількість переходів з одиниці в нуль і навпаки (для мінімізації витрат часу на синхронізацію біт) і не повинна містити комбінації $10\dots 01\dots 10$;
- 2) під час старту процедури пошуку синхронізму в накопичувач приймача записуються три послідовні фрагменти отриманої з каналу послідовності біт. Довжина кожного з фрагментів дорівнює довжині синхрокомбінації $n = M \cdot l_r = M \lceil \log_2 M \rceil$;
- 3) за прийнятими фрагментами формується уточнена послідовність R . Кожний

біт цієї послідовності обчислюється за мажоритарним принципом на основі відповідних біт прийнятих фрагментів. Таким чином, якщо i -ті біти фрагментів містять більше «одиниць», i -тому біту уточненої послідовності присвоюється значення «одиниці», в іншому випадку – «нуля»;

- 4) в уточненій послідовності R з урахуванням її циклічного зсуву перевіряється наявність комбінації $10\dots 01\dots 10$.

$$l_r \quad l_r$$

Якщо її знайдено, причому вона одна, уточнену послідовність R циклічно зсувають таким чином, щоб вона починалася з префікса $0\dots 01\dots 1$;

$$l_r \quad l_r$$

- 5) уточнена послідовність R порівнюється з еталоном π . Якщо вона збігається з еталоном синхрокомбінацією з точністю до одного з її символів, то процедура підстроювання циклової фази припиняється, циклічним зсувом компенсується фазова неузгодженість і формується сигнал «Пошук циклової фази завершений». Цей сигнал відправляється на станцію передавання даних і є командою на перехід до процедури передавання даних користувача;

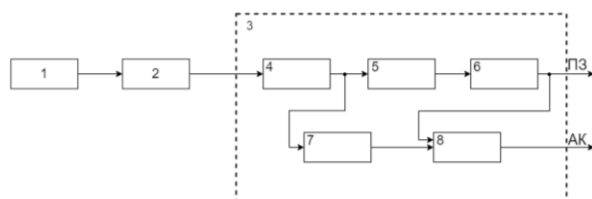
- 6) якщо комбінацію $10\dots 01\dots 10$ в уточне-

$$l_r \quad l_r$$

ній послідовності R не знайдено, знайдено таких комбінацій дві та більше, а також, якщо суфікс уточненої послідовності R відрізняється від суфікса еталонової синхрокомбінації π більше, ніж на один символ, то додатково приймаються ще два фрагменти, тим самим збільшуючи їх кількість до п'яти. Знову повторюються всі операції виявлення синхрокомбінації, починаючи з п. 3;

- 7) кількість накопичених фрагментів може послідовно збільшуватися до деякого, наперед заданого порогу. Після досягнення цього порогу кількість накопичених фрагментів не змінюється. Процес пошуку синхронізму триває, поки або не буде знайдений синхронізм, або не закінчиться ліміт часу на виконання пошуку синхронізму. В останньому випадку процедура пошуку синхронізму завершується, а на вихід системи видається сигнал «Аварія каналу».

Метод встановлення циклової синхронізації можна реалізувати за допомогою пристрою, наведеного на рисунку 1.



1 – джерело синхροкомбінації; 2 – канал зв'язку;
3 – приймач синхροкомбінації; 4 – накопичувач синхροкомбінації; 5 – пристрій пошуку префікса;
6 – пристрій пошуку суфікса; 7 – лічильник кількості циклів; 8 – вирішальний пристрій;
ПЗ – сигнал «пошук синхронізму завершений»;
АК – сигнал «Аварія каналу»

Рисунок 1 – Структурна схема пристрою циклової синхронізації

Пояснювати принцип побудови системи циклової синхронізації, що реалізує запропонований метод, будемо на прикладі використання як синхροкомбінації перестановки π довжини $M=8$ (послідовності десяткових символів множини $\{0,1,2,3,4,5,6,7\}$).

Кожний символ цієї множини кодується рівномірним двійковим кодом, наприклад, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Схема кодування символів перестановки

Десятковий запис	0	1	2	3	4	5	6	7
Двійковий запис	000	001	010	011	100	101	110	111

Сконструюємо синхροкомбінацію з префіксом, що виявляє межі символів. Таким префіксом може бути комбінація, складена з першого та останнього символів множини $\{0,1,2,3,4,5,6,7\}$ – символів 0 і 7. Останній символ синхροкомбінації повинен закінчуватися одиницею, а перший символ суфікса повинен починатися нулем. Решта символів обираються таким чином, щоб кількість знакозмін (змін двійкової одиниці на двійковий нуль або навпаки – нуля на одиницю) було максимальним.

Діаграму розподілу кількості перестановок з повної множини перестановок довжини $M=8$, символи яких закодовано відповідно до схеми таблиці 1, залежно від кількості знакозмін зображено на рисунку 2.

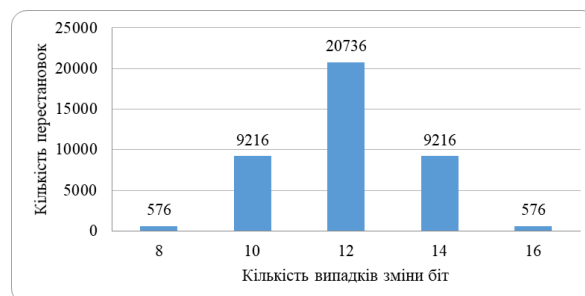


Рисунок 2 – Діаграма розподілу кількості перестановок залежно від кількості знакозмін

З рисунка 2 видно, що найбільша можлива кількість переходів з 0 в 1 та з 1 в 0 дорівнює 16. Виконаємо пошук перестановок, де перші символи – 0 і 7, останній символ закінчується двійковою одиницею, перший символ суфікса починається двійковим нулем, а сама перестановка містить 16 знакозмін. Знайдені експериментальним шляхом такі перестановки наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Перелік перестановок довжини $M=8$ для використання як синхροкомбінації

№	Десятковий запис	Двійковий запис
1	(0,7,1,2,4,6,5,3)	(000,111,001,010,100,110,101,011)
2	(0,7,1,2,6,4,5,3)	(000,111,001,010,110,100,101,011)
3	(0,7,1,3,2,4,6,5)	(000,111,001,011,010,100,110,101)
4	(0,7,1,3,2,6,4,5)	(000,111,001,011,010,110,100,101)
5	(0,7,2,4,6,5,1,3)	(000,111,010,100,110,101,001,011)
6	(0,7,2,4,6,5,3,1)	(000,111,010,100,110,101,011,001)
7	(0,7,2,6,4,5,1,3)	(000,111,010,110,100,101,001,011)
8	(0,7,2,6,4,5,3,1)	(000,111,010,110,100,101,011,001)
9	(0,7,3,1,2,4,6,5)	(000,111,011,001,010,100,110,101)
10	(0,7,3,1,2,6,4,5)	(000,111,011,001,010,110,100,101)
11	(0,7,3,2,4,6,5,1)	(000,111,011,010,100,110,101,001)
12	(0,7,3,2,6,4,5,1)	(000,111,011,010,110,100,101,001)

Одна з наведених у таблиці 2 послідовностей записується в постійний запам'ятовувальний пристрій (ПЗП), який стане джерелом синхροкомбінації передавальної станції.

Розглянемо процедури, реалізовані на приймальній станції.

Перш за все, зазначимо, що в приймач надходить синхροкомбінація, уражена дією завади в каналі зв'язку і зсунута за фазою що-

до положення ковзного вікна (виконаного у вигляді регістра зсуву). Водночас ні інтенсивність завади, ні зсув ковзного вікна (величина фазової неузгодженості циклів передавача та приймача) апріорно невідомі. Тому першим завданням системи циклової синхронізації є підвищення достовірності прийнятих даних, а другим – визначення та компенсація фазової неузгодженості.

Підвищення достовірності прийнятих даних досягається багаторазовим повторенням синхрокомбінації та накопиченням результату. Так, коефіцієнтом накопичення, який дорівнює кількості накопичуваних фрагментів отриманої з каналу послідовності біт, довжина кожного з яких дорівнює довжині синхрокомбінації, обирається з ряду непарних чисел 3, 5, 7.... Очевидно, що чим вищий коефіцієнт накопичення, тим більша ймовірність правильного рішення (тобто менша ймовірність помилкової синхронізації) та більший час входження в синхронізм. У запропонованому методі циклової синхронізації виконується адаптивний підбір коефіцієнта накопичення (чим гірший канал зв'язку, тим більшим встановлюється коефіцієнт накопичення). Це досягається тим, що прийнята з каналу зв'язку послідовність біт записується в буферний накопичувач (блок 4 рисунка 1) загальною ємністю, наприклад, 11 синхрокомбінацій. Під час старту процедури пошуку синхронізму встановлюється мінімальне значення коефіцієнта накопичення $l=3$, після чого в буферний накопичувач записуються три фрагменти прийнятої послідовності, довжина кожного з яких дорівнює довжині синхрокомбінації. Циклічний зсув прийнятої послідовності випадковий. За цими трьома фрагментами мажоритарно обчислюється уточнена послідовність R , в якій частину помилок (якщо вони є) виправлено – зазначеною процедурою виправляються всі помилки кратністю до $\frac{l-1}{2}$ включно,

які виникають у відповідних бітах прийнятих фрагментів. Відповідно, максимальна загальна кількість бітових помилок, яку здатна виправити мажоритарна обробка, становить $\frac{l-1}{2}n = \frac{l-1}{2}M \lceil \log_2 M \rceil$ з прийнятих ln біт. Наприклад, для $M=8$ і $l=3$ це значення дорівнює 24 бітові помилки з прийнятих 72 біт. Для $M=8$ і $l=5$ – збільшується до 48 зі 120 біт.

У накопичувачі 4 виконується побітовий циклічний зсув уточненої послідовності R , за яким дешифратор префікса 5 після виконання кожного зі зсувів перевіряє, чи виявлено префікс синхрокомбінації. Якщо префікс виявлено, то перевіряється і суфікс (блок 6). Якщо обидві перевірки завершено позитивно, то процедуру адаптації коефіцієнта накопичення до якості каналу зв'язку завершено, а синхронізм встановлено. У цьому випадку дешифратор суфікса 6 видає сигнал «Пошук синхронізму завершений» (ПЗ). Він відправляється зворотним каналом на передавальну станцію, а канал даних переходить зі стану встановлення з'єднання в стан перенесення призначених для користувача даних.

Якщо дешифратором префікса 5 не виявлено префікса синхрокомбінації або дешифратором суфікса 6 не підтверджено цілісність синхрокомбінації, тобто для визначеного значення коефіцієнта накопичення синхрокомбінацію не визначено, то в накопичувач 4 додатково записуються два фрагменти отриманої з каналу послідовності біт. Після цього обчислюється уточнена після мажоритарної обробки п'яти фрагментів послідовність, за якою дешифратор префікса 5 і дешифратор суфікса 6 виконують виявлення синхрокомбінації. Якщо і ця спроба виявити префікс і суфікс синхрокомбінації блоками 5 і 6 є невдалою, то коефіцієнт накопичення збільшується ще на два. Збільшення коефіцієнта накопичення триває доти, поки не буде досягнуто його граничне значення, рівне, наприклад, 11. Далі пошук синхронного стану триває або до завершення процедури пошуку, або до вичерпання ліміту часу на пошук синхронізму. Для цього система циклової синхронізації містить лічильник кількості циклів 7, вхід якого підключений до виходу накопичувача 4, а вихід – до першого входу вирішального пристрою 8. Другий вхід вирішального пристрою підключений до виходу дешифратора суфікса 6, який виводить сигнал ПЗ. Якщо після закінчення ліміту часу, відведеного на пошук синхронізму, він не знайдений, то вирішальний пристрій 8 формує сигнал «Аварія каналу». Процедура пошуку припиняється.

Імовірнісні показники встановлення циклового синхронізму

Теоретично визначимо один з основних показників системи циклової синхронізації – ймовірність встановлення циклового синхронізму за l прийнятими фрагментами,

$l = 3, 5, \dots$, залежно від імовірності бітової помилки p_0 у каналі зв'язку.

Імовірність бітової помилки в уточненій послідовності R після мажоритарної обробки l прийнятих фрагментів

$$p_0^* = \sum_{i=(l+1)/2}^l C_l^i p_0^i (1-p_0)^{l-i}. \quad (1)$$

Помилка в символі перестановки виникає тоді, коли хоча б один біт у його двійковому представленні в уточненій послідовності R визначено неправильно. Імовірність такої події

$$p_{\text{symp}} = \sum_{i=1}^{l_r} C_{l_r}^i (p_0^*)^i (1-p_0^*)^{l_r-i} = 1 - (1-p_0^*)^{l_r}. \quad (2)$$

Система циклової синхронізації прийме правильне рішення про встановлення циклового синхронізму, якщо:

- 1) перші два символи (двійкове представлення яких містить усі нулі та всі одиниці) уточненої послідовності R буде визначено без помилки;
- 2) третій символ уточненої послідовності R буде починатися з двійкового нуля;
- 3) останній символ уточненої послідовності R буде закінчуватися двійковою одиницею;
- 4) не більше одного з групи від третього до останнього символів уточненої послідовності R визначено неправильно.

Імовірність першої події

$$P_1 = (1-p_{\text{symp}})^2. \quad (3)$$

Імовірність того, що одночасно відбудуться друга, третя та четверта події,

$$P_{2-4} = (1-p_{\text{symp}})^{M-2} + 2 \left((1-p_0^*) \left(1 - (1-p_0^*)^{l_r-1} \right) \right) \times (1-p_{\text{symp}})^{M-3} + (M-4) p_{\text{symp}} (1-p_{\text{symp}})^{M-3}. \quad (4)$$

Тоді ймовірність встановлення правильного циклового синхронізму за l прийнятими фрагментами

$$P_{\text{true}} = P_1 P_{2-4}. \quad (5)$$

Підставляючи вирази (3) і (4) для P_1 і P_{2-4} до (5), отримаємо

$$P_{\text{true}} = (1-p_{\text{symp}})^{M-1} \times \left[1 + 2 \left((1-p_0^*) \left(1 - (1-p_0^*)^{l_r-1} \right) \right) + (M-5) p_{\text{symp}} \right]. \quad (6)$$

Імовірність встановлення хибного циклового синхронізму за l прийнятими фрагментами визначається ймовірністю виникнення події, за якої уточнена послідовність R буде циклічно зсунутою синхрокомбінацією з точністю до символу суфікса за умови, що перший і останній його біти змінені не будуть. Таким чином, ця ймовірність залежить від розподілу відстаней Хеммінга від синхрокомбінації до її циклічних зсувів. Такий розподіл для перестановок, наведених у таблиці 2, представлений у таблиці 3.

Таблиця 3 – Розподіл відстаней Хеммінга від синхрокомбінації до її циклічних зсувів

№ перестановки в таблиці 2	Відстань Хеммінга t						
	6	8	10	12	14	16	18
1	0	1	4	12	0	6	0
2	2	2	2	7	2	8	0
3, 5	0	2	4	6	8	3	0
4, 7	2	0	4	11	0	2	4
6, 9	2	2	2	5	6	6	0
8, 10	0	2	4	7	6	4	0
11	0	4	2	7	4	6	0
12	2	2	2	6	4	7	0

Імовірність того, що уточнена послідовність R буде циклічно зсунутою синхрокомбінацією, дорівнює

$$P_{\text{shift}} = \sum_{t=1}^n f(t) (p_0^*)^t (1-p_0^*)^{n-t}, \quad (7)$$

де $f(t)$ – кількість помилок кратності t в уточненій послідовності R , які призводять до циклічного зсуву синхрокомбінації. Розподіл значень $f(t)$ якраз і наведено в таблиці 3. Значення $f(t) \equiv 0$ для всіх t , відсутніх у цій таблиці.

Розроблений метод передбачає можливість неправильного розпізнавання одного символу суфікса синхрокомбінації. Тому кратність помилки в уточненій послідовності R , яка призводить до циклічного зсуву синхрокомбінації, може відрізнитися на відстань Хеммінга від оригінального символу синхрокомбінації до пошкодженого символу уточненої послідовності R . Оскільки вага кожного

символу помилки, яка переводить синхрокомбінацію до її циклічного зсуву, невідома, її ймовірність можна оцінити зверху виразом $(1 - p_0^*)^{l_r}$. Кількість можливих помилок ваги t збільшується в кількість разів, що відповідає кількості всіх варіантів бітових помилок для кожного з символів суфікса – добутку суми комбінацій помилок символу на кількість символів суфікса. Таким чином, ймовірність встановлення хибного циклового синхронізму за l прийнятими фрагментами можна оцінити зверху наступним чином:

$$P_{false} \leq \sum_{t=1}^n f(t) \left((M-4) \sum_{j=0}^{l_r} C_{l_r}^j \times \left(p_0^* \right)^{|t-l_r|} \left(1 - p_0^* \right)^{n-|t-l_r|} + 2 \sum_{j=0}^{l_r-1} C_{l_r-1}^j \times \left(p_0^* \right)^{|t-l_r+1|} \left(1 - p_0^* \right)^{n-|t-l_r+1|} \right) \quad (8)$$

Результати досліджень. Для перевірки ефективності роботи розробленого методу встановлення циклового синхронізму побудовано програмну модель передавання даних. Алгоритм роботи системи циклової синхронізації моделі зображено на рисунку 3.

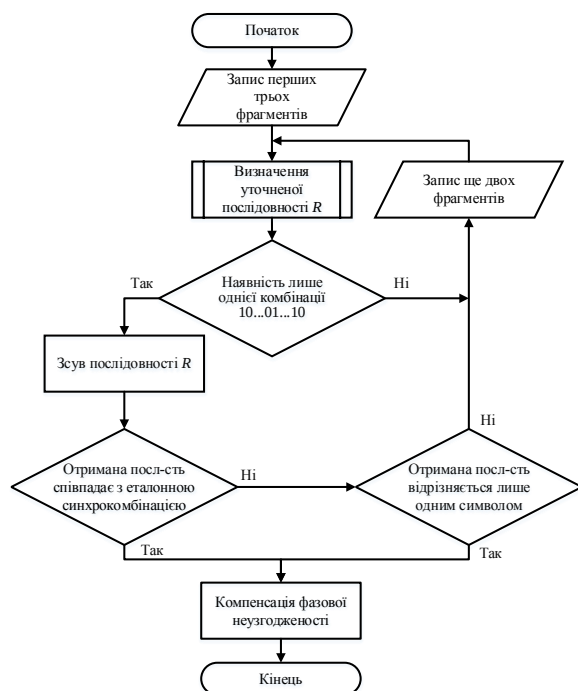


Рисунок 3 – Алгоритм роботи системи циклової синхронізації

Як синхрокомбінацію використано перестановку 3 з таблиці 2.

Графік експериментально визначеної на 10000 випробуваннях залежності відносної частоти встановлення циклового синхронізму від фіксованого значення коефіцієнта накопичення l для ймовірності бітової помилки $p_0 \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$ зображено на рисунку 4.

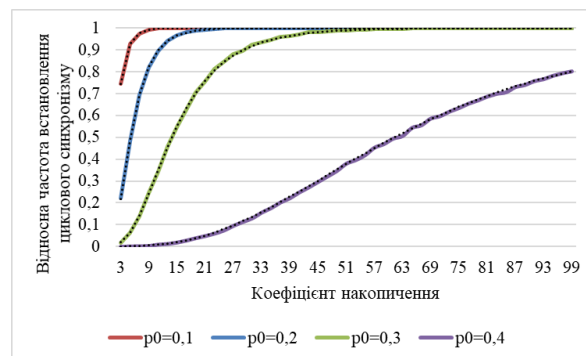


Рисунок 4 – Графік залежності відносної частоти встановлення циклового синхронізму від фіксованого значення коефіцієнта накопичення

На рисунку 4 пунктиром показано також відповідні графіки теоретичних залежностей P_{true} від l відповідно до виразу (6).

Графік експериментально визначеної на 10000 випробуваннях залежності відносної частоти встановлення циклового синхронізму від коефіцієнта накопичення l для розробленого алгоритму й ймовірності бітової помилки $p_0 \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$ зображено на рисунку 5.

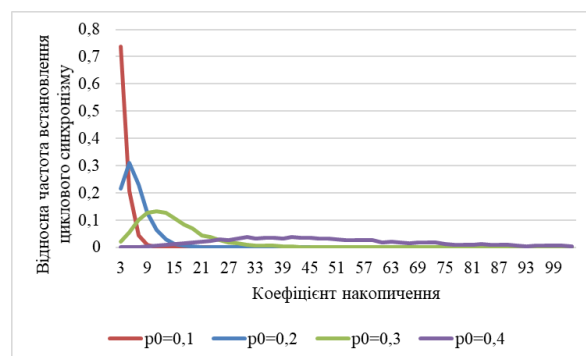


Рисунок 5 – Графік залежності відносної частоти встановлення циклового синхронізму від коефіцієнта накопичення

На рисунку 6 зображено графік експериментально визначеної інтегральної функції часу входження в синхронізм (ймовірності

встановлення циклового синхронізму за l прийнятими фрагментами), побудованої на основі зображеної на рисунку 5 залежності відносної частоти встановлення циклового синхронізму від коефіцієнта накопичення l .

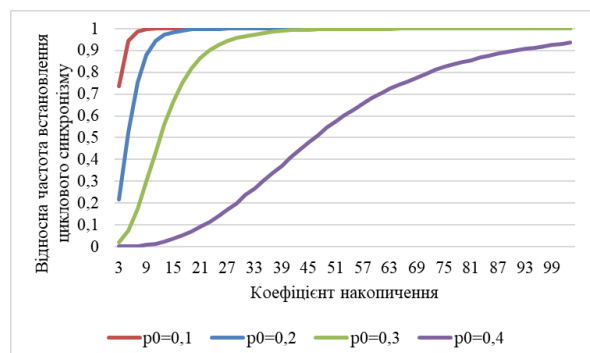


Рисунок 6 – Графік залежності ймовірності встановлення циклового синхронізму від коефіцієнта накопичення

Графіки залежностей оцінок зверху ймовірності встановлення хибного циклового синхронізму від кількості прийнятих фрагментів для синхрокомбінації 1 з таблиці 2 для ймовірності бітової помилки $p_0 \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$ зображено на рисунку 7.

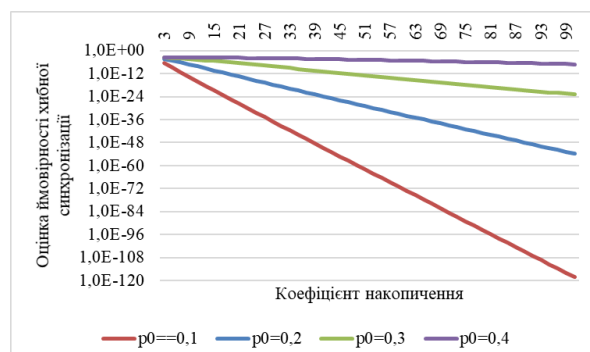


Рисунок 7 – Графіки залежностей оцінок зверху ймовірності встановлення хибного циклового синхронізму від коефіцієнта накопичення

Під час експериментального дослідження розробленого методу для перестановки 3 з таблиці 2 та значень ймовірності бітової помилки $p_0 \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$ випадків встановлення хибного циклового синхронізму не виявлено для 10000 випробувань.

Зауважимо, що за показником ймовірності встановлення хибного циклового синхронізму, зважаючи на показники з таблиці 3, найбільш ефективним є використання перестанов-

ки 1 з таблиці 2. Як підтвердження на рисунку 8 зобразимо графіки залежностей оцінок зверху ймовірності встановлення хибного циклового синхронізму від кількості прийнятих фрагментів для синхрокомбінацій 1, 2, 3, 11 з таблиці 2 для ймовірності бітової помилки $p_0 = 0.4$.

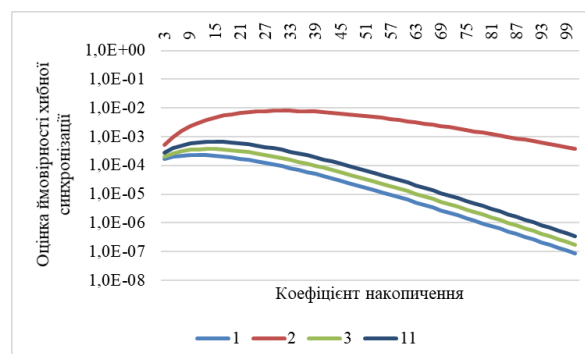


Рисунок 8 – Графіки залежностей оцінок зверху ймовірності встановлення хибного циклового синхронізму від коефіцієнта накопичення для ймовірності помилки $p_0 = 0.4$

Обговорення результатів. У першу чергу, зауважимо, що зображені на рисунку 4 теоретичні й експериментальні залежності узгоджуються між собою за критерієм Пірсона з близькими до одиниці досягнутими рівнями значущості (p-value), інтерпретованими згідно з викладеною в [17] методологією. Це свідчить про коректність побудови програмної моделі.

Пояснимо відмінності залежностей, продемонстрованих на рисунках 4 і 6. На рисунку 4 показано відносну частоту встановлення циклового синхронізму за умови, якщо значення коефіцієнта накопичення є фіксованим і не змінюється в процесі роботи системи циклової синхронізації. Рисунок 5 демонструє відносну частоту встановлення циклового синхронізму за умови, що коефіцієнт накопичення поступово збільшує своє значення залежно від результату пошуку на попередньому етапі. Як можна бачити з графіків 4 і 6, ці відносні частоти не є однаковими, а значення P_{true} , обчислене за (6) для заданих коефіцієнта накопичення встановлення циклового синхронізму l_{def} і ймовірності бітової помилки p_0 , менше за суму зображених на рисунку 5 відносних частот встановлення циклового синх-

ронізму для $l \leq l_{def}$. Ця ситуація обумовлена тим, що множина подій, за яких відбувається циклова синхронізація за фіксованого значення коефіцієнта накопичення l_{def} , не складається з множин подій, за яких відбувається циклова синхронізація під час поступового збільшення коефіцієнта накопичення $l \leq l_{def}$. Так, наприклад, пошкодження біта в уточненій послідовності R , обчислений за l фрагментами, за умови, що в обчислений за $(l-2)$ фрагментами уточненій послідовності бітові помилки відсутні, породжує ситуацію, коли таку подію враховано у відносній частоті встановлення циклового синхронізму для коефіцієнта накопичення $(l-2)$, проте не враховано для коефіцієнта накопичення l .

Висновки. У роботі розроблено метод циклової синхронізації для систем зв'язку з нероздільним факторіальним кодуванням, який за рахунок використання як синхрокомбінації перестановки заданої довжини, її поділу на префіксну та суфіксну частини, а також мажоритарної обробки прийнятих фрагментів дає можливість досягти циклової синхронізації в умовах впливу в каналі зв'язку завад високої інтенсивності. Метод може бути використаний для зменшення часу входження в синхронізм і підвищення стійкості телекомунікаційної системи в умовах впливу завад.

Розроблено та реалізовано алгоритм, що реалізує запропонований метод.

Технічним результатом, на який спрямовано застосування запропонованого методу в телекомунікаційній системі, є зменшення втрати часу сеансу зв'язку на виконання функції встановлення з'єднання і, отже, збільшення часу в сеансі на передавання даних користувача і, як наслідок, на збільшення пропускної здатності каналу зв'язку.

Разом з тим, розроблений метод може бути ефективним для реалізації не тільки в системах з нероздільним факторіальним кодуванням. Це питання є предметом подальших досліджень.

Подяка. Роботу виконано в рамках науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Розробка мобільної системи захищеного інформаційного обміну для військових і цивільних підрозділів державних структур» (№ ДР 0120U102607).

Список використаних джерел

- [1] D. Hercog, *Communication Protocols. Principles, Methods and Specifications*. Springer International Publishing, 2020.
- [2] H. König, *Protocol Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [3] M. Popovic, *Communication Protocol Engineering*. 2nd ed., CRC Press, 2018.
- [4] Э. В. Фауре, "Факториальное кодирование с восстановлением данных", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 33-39, 2016.
- [5] Е. В. Фауре, О. О. Харін, В. В. Швидкий, та А. І. Щерба, "Спосіб факторіального кодування з відновленням даних", *Укр. пат. 117004*, Черв. 12, 2017.
- [6] Э. В. Фауре, "Факториальное кодирование с исправлением ошибок", *Радиоелектроніка, інформатика, управління*, № 3, с. 130-138, 2017.
- [7] Е. В. Фауре, О. О. Харін, В. В. Швидкий, та А. І. Щерба, "Спосіб факторіального кодування з виявленням і виправленням помилок", *Укр. пат. 121361*, Груд. 11, 2017.
- [8] E. V. Faure, A. I. Shcherba, and A. A. Kharin, "Factorial code with a given number of inversions", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, vol. 2, pp. 143-153, 2018.
- [9] J. Massey, "Optimum frame synchronization", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 20, no. 2, pp. 115-119, April 1972.
DOI: 10.1109/TCOM.1972.1091127
- [10] R. Scholtz, "Frame synchronization techniques", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 28, no. 8, pp. 1204-1213, August 1980.
DOI: 10.1109/TCOM.1980.1094813
- [11] P. Kartaschoff, "Synchronization in digital communications networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 7, pp. 1019-1028, July 1991.
DOI: 10.1109/5.84979
- [12] Hansheng Wang, Xiaoyi Qin, Lieguang Zeng, and Fuqin Xiong, "Coding, decoding, and recovery of clock synchronization in digital multiplexing system", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 5, pp. 825-831, May 2003.
DOI: 10.1109/TCOMM.2003.811432

- [13] Б. Ф. Брегман, и В. В. Квашенников, "Способ кодовой цикловой синхронизации сообщений", *РФ. пат.* 2 459 366, 2006.
- [14] J. S. Al-Azzeh, B. Ayyoub, E. Faure, V. Shvydkyi, O. Kharin, and A. Lavdanskyi, "Telecommunication systems with multiple access based on data factorial coding", *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, vol. 10, no. 2, pp. 102-113, 2020. DOI: 10.15866/irecap.v10i2.17216
- [15] S. Lin, and D. Costello, *Error Control Coding*. 2nd ed. Prentice Hall, 2004.
- [16] J. J. Kong, and K. K. Parhi, "Interleaved convolutional code and its Viterbi decoder architecture", *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 417892, 2003. DOI: 10.1155/S1110865703309126
- [17] A. Rukhin et al., "A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications", Spec. Pub. 800-22 rev. 1a, Gaithersburg, MD, NIST, 2010.
- [8] E. V. Faure, A. I. Shcherba, and A. A. Kharin, "Factorial code with a given number of inversions", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, vol. 2, pp. 143-153, 2018.
- [9] J. Massey, "Optimum frame synchronization", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 20, no. 2, pp. 115-119, April 1972, DOI: 10.1109/TCOM.1972.1091127
- [10] R. Scholtz, "Frame synchronization techniques", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 28, no. 8, pp. 1204-1213, August 1980. DOI: 10.1109/TCOM.1980.1094813
- [11] P. Kartaschoff, "Synchronization in digital communications networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 7, pp. 1019-1028, July 1991. DOI: 10.1109/5.84979
- [12] Hansheng Wang, Xiaoyi Qin, Lieguang Zeng, and Fuqin Xiong, "Coding, decoding, and recovery of clock synchronization in digital multiplexing system", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 5, pp. 825-831, May 2003. DOI: 10.1109/TCOM.2003.811432
- [13] B. F. Bregman, and V. V. Kvashennikov, "Method of code frame synchronization of messages", *RF. Patent 2 459 366*, 2006. [in Russian].
- [14] J. S. Al-Azzeh, B. Ayyoub, E. Faure, V. Shvydkyi, O. Kharin, and A. Lavdanskyi, "Telecommunication systems with multiple access based on data factorial coding", *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, vol. 10, no. 2, pp. 102-113, 2020. DOI: 10.15866/irecap.v10i2.17216
- [15] S. Lin, and D. Costello, *Error Control Coding*. 2nd ed. Prentice Hall, 2004.
- [16] J. J. Kong, and K. K. Parhi, "Interleaved convolutional code and its Viterbi decoder architecture", *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 417892, 2003. DOI: 10.1155/S1110865703309126
- [17] A. Rukhin et al., "A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications", Spec. Pub. 800-22 rev. 1a, Gaithersburg, MD, NIST, 2010.

References

- [1] D. Hercog, *Communication Protocols. Principles, Methods and Specifications*. Springer International Publishing, 2020.
- [2] H. König, *Protocol Engineering*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [3] M. Popovic, *Communication Protocol Engineering*. 2nd ed., CRC Press, 2018.
- [4] E. V. Faure, "Factorial coding with data recovery", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 33-39, 2016. [in Russian].
- [5] E. V. Faure, O. O. Kharin, V. V. Shvydkyi, and A. I. Shcherba, "Method of factorial coding with data recovery", *Ukr. Patent 117004*, June 12, 2017. [in Ukrainian].
- [6] E. V. Faure, "Factorial coding with error correction", *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, no. 3, pp. 130-138, 2017. [in Russian].
- [7] E. V. Faure, O. O. Kharin, V. V. Shvydkyi, and A. I. Shcherba, "Method of factorial coding with error detection and correction", *Ukr. Patent 121361*, Dec. 11, 2017. [in Ukrainian].
- [8] E. V. Faure, A. I. Shcherba, and A. A. Kharin, "Factorial code with a given number of inversions", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, vol. 2, pp. 143-153, 2018.
- [9] J. Massey, "Optimum frame synchronization", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 20, no. 2, pp. 115-119, April 1972, DOI: 10.1109/TCOM.1972.1091127
- [10] R. Scholtz, "Frame synchronization techniques", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 28, no. 8, pp. 1204-1213, August 1980. DOI: 10.1109/TCOM.1980.1094813
- [11] P. Kartaschoff, "Synchronization in digital communications networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 7, pp. 1019-1028, July 1991. DOI: 10.1109/5.84979
- [12] Hansheng Wang, Xiaoyi Qin, Lieguang Zeng, and Fuqin Xiong, "Coding, decoding, and recovery of clock synchronization in digital multiplexing system", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 5, pp. 825-831, May 2003. DOI: 10.1109/TCOM.2003.811432
- [13] B. F. Bregman, and V. V. Kvashennikov, "Method of code frame synchronization of messages", *RF. Patent 2 459 366*, 2006. [in Russian].
- [14] J. S. Al-Azzeh, B. Ayyoub, E. Faure, V. Shvydkyi, O. Kharin, and A. Lavdanskyi, "Telecommunication systems with multiple access based on data factorial coding", *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, vol. 10, no. 2, pp. 102-113, 2020. DOI: 10.15866/irecap.v10i2.17216
- [15] S. Lin, and D. Costello, *Error Control Coding*. 2nd ed. Prentice Hall, 2004.
- [16] J. J. Kong, and K. K. Parhi, "Interleaved convolutional code and its Viterbi decoder architecture", *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 417892, 2003. DOI: 10.1155/S1110865703309126
- [17] A. Rukhin et al., "A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications", Spec. Pub. 800-22 rev. 1a, Gaithersburg, MD, NIST, 2010.

E. V. Faure, *Dr.Sc., professor,*
e-mail: e.faure@chdtu.edu.ua

V. V. Shvydkyi, *Ph.D., associate professor,*

A. I. Shcherba, *Ph.D., associate professor,*

O. O. Kharin, *Ph.D.,*

B. A. Stupka

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

METHOD OF CYCLIC SYNCHRONIZATION BASED ON PERMUTATIONS

The method of cyclic synchronization of receiving and transmitting stations for telecommunication systems with inseparable factorial coding is developed and investigated. The method is aimed to work in conditions of strong interference in communication channel. The main idea for the proposed method of cyclic synchronization establishing is the following. A permutation is the synchrocombination. The synchrocombination construction is divided into a prefix part that defines the boundaries of synchrocombination symbols and a suffix part that defines the boundaries of the synchrocombination-permutation. The increase in the reliability of synchrocombination transmission is provided by its multiple repeating and majority processing of the received fragments.

Probabilistic indicators of the developed method – the probability of correct synchronism establishing and the probability of incorrect synchronism establishing are theoretically determined and investigated. The block diagram of the cyclic synchronizing device is developed. The software model of data transmission, which implements the developed algorithm for establishing cyclic synchronism, is built. The experimentally obtained probabilistic characteristics of the developed method are estimated. Their compliance with theoretical indicators has been confirmed.

The technical result the proposed method is aimed at is to reduce the loss of communication session time to perform the function of establishing a connection and, therefore, to increase the session time for transmission of user data and, consequently, for increase of channel bandwidth communication.

The developed method can be effective for implementing not only in systems with inseparable factorial coding but also in classical data transmission systems where a standard delimiter is used.

Keywords: factorial coding, synchrocombination, probability of synchronism establishing, accumulation coefficient, high intensity interference.

УДК 004.891:629.735

[0000-0002-6204-0708] **Т. О. Прокопенко¹**, д.т.н., професор,
[0000-0003-1566-9260] **М. О. Можасв²**, к.т.н.,
[0000-0003-4389-1088] **С. В. Рудницький¹**, к.т.н.,
[0000-0001-6384-0523] **Ю. В. Рудницька¹**

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

²Харківський науково-дослідний інститут судових експертиз ім. засл. проф. М. С. Бокаріуса
вул. Золочівська, 8а, м. Харків, Україна

ПРОГРАМУВАННЯ РЕЖИМУ НЕНАВАНТАЖЕНОГО РЕЗЕРВУВАННЯ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Особливого значення на сьогодні в задачах підвищення ефективності використання каналів комп'ютерних систем критичного застосування набуває якісний контроль переміжних відмов, частка яких в усьому потоці відмов становить приблизно 80–90 %, а також правильна ідентифікація стану цих каналів на основі аналізу сигналів помилок за мінімальний час їх відімкнення від рішення «корисних» задач. Розробка моделей і алгоритмів аналізу послідовностей помилок, які є наслідком збоїв каналів КСКЗ з мажоритарним резервуванням, є основою програмування режиму ненавантаженого резервування. Це дасть можливість мінімізувати ймовірність недостовірної ідентифікації їхнього технічного стану. Досліджується надійність комп'ютерних систем критичного застосування, що використовують режим ненавантаженого резервування з точки зору стійкості до короточасних збоїв, і визначаються області їх доцільного використання. Отримані у статті аналітичні вирази дають змогу робити вибір ненавантажених резервованих структур КСКЗ скорочень і є основою відповідного програмного забезпечення.

Ключові слова: програмування, комп'ютерні системи критичного застосування, збій, ненавантажене резервування.

Вступ. Рівень надійності комп'ютерних систем критичного застосування (КСКЗ) залежить від інтенсивності відмов і збоїв їх елементів, досконалості засобів контролю, діагностування і рівня використаної надмірності. Забезпечення надійності КСКЗ, що не обслуговуються, в умовах обмежень на кількість резервованих каналів здійснюється шляхом використання спеціальних процедур ідентифікації збоїв при ненавантаженому резервуванні [1, 2]. Ненавантажений резерв складається з одного чи декількох резервних елементів, які перебувають у ненавантаженому стані до початку виконання ними функцій основного елемента [3]. Такі резервні елементи перебувають у вимкненому стані і до моменту їх включення не є несправними.

Основними причинами виникнення помилок контролю є недостовірні ідентифікації дієздатного стану. Особливого значення на сьогодні в роботі з підвищення ефективності використання каналів КСКЗ набуває якісний контроль переміжних відмов, частка яких в усьому потоці відмов становить приблизно 80–90 %, а також правильна ідентифікація стану цих каналів на основі аналізу сигналів

помилки за мінімальний час їх відімкнення від рішення «корисних» задач. Програмування режиму ненавантаженого резервування забезпечується застосуванням відповідних методів та алгоритмів, що сприяють підвищенню ефективності використання каналів комп'ютерних систем критичного застосування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню комп'ютерних систем критичного застосування присвячено роботи ряду авторів. Так, у роботі [4] авторами досліджується синтез архітектури сучасної комп'ютерної системи для управління складним розподіленим об'єктом, основні етапи синтезу архітектури. Автори вказують на необхідність попереднього розкладання, структурування та формалізації системи, а також наведено основні етапи ієрархічної послідовності процесу розкладання. Автори роботи [5] пропонують комплекс, що включає кілька моделей та метод; він використовує зразки трафіку з декількох сеансів як вихідні дані для виконання короточасного прогнозування трафіку. В роботах [6–8] автори акцентують свою увагу на методах розрахунку параметрів надійності та функціональної безпеки технічних систем, що

характеризуються можливістю отримання строгих формульних виразів стаціонарних параметрів безпосередньо з графіка стану системи. В [7-13] відображаються результати досліджень моделей інформаційної структури системи підтримки, що враховує потужність транзакцій системи. Це оптимізує пропускну здатність вузлів і, як результат, підтримка ефективності системи електронного навчання зростає. В роботі [13] розглядається саме структура мережі гіперконвергентної базової мережі підтримки електронного навчання як основний фактор, що впливає на якість запитів системи. В роботі [14] розглянуто метод синтезу обернених операцій для відомих прямих операцій. Цей метод забезпечує побудову оберненої операції шляхом перетворення другого операнда дворозрядної двооперандної операції строгого стійкого криптографічного кодування.

Створенню методологічного забезпечення синтезу та аналізу наборів двооперандних двобітових криптографічних операцій з точною перестановкою присвячено роботу [16]. Автори провели дослідження, що ґрунтуються на результатах обчислювального експерименту, який полягає у синтезі двооперандних двобітових криптооперацій, які базуються на однооперандних, з подальшим пошуком пар операцій прямого та коректного зворотного криптоперетворення на основі повного пошуку. В процесі обчислювального експерименту автори отримали пари двооперандних операцій, що представлені кортежами чотирьох однооперандних операцій.

Таким чином, аналіз літератури [4-20] показав необхідність розробки універсального методу для КСКЗ у різних галузях, що дає можливість обрати один із режимів ненавантаженого резервування у комп'ютерних системах критичного застосування.

Мета дослідження – розробка моделей і алгоритмів аналізу послідовностей помилок, які є наслідком збоїв каналів комп'ютерних систем критичного застосування з мажоритарним резервуванням, що дадуть змогу мінімізувати ймовірність недостовірної ідентифікації їхнього технічного стану та є основою відповідних програмних засобів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розробка програмного забезпечення для режиму ненавантаженого резервування забезпечує автоматизацію процесів у комп'ютерних системах критичного застосування. Важливими на початку перед проце-

сом програмування є дослідження та вибір відповідних моделей і розробка на їх основі відповідних алгоритмів. Моделювання оптимальної надійності представляє повний обсяг інформації та стратегій для визначення найбільш ефективних способів забезпечити відповідність систем усім необхідним вимогам до продуктивності, враховуючи графік, вартість та доцільність [19].

1. Аналіз мажоритарної структури з ненавантаженим резервуванням

Для аналізу алгоритмів і математичної моделі в роботі розглянуто дубльовану систему (ДС) з додатковим каналом, який знаходиться у ненавантаженому резерві (DCH), вмикається після відмови одного з каналів і починає втрачати надійність в момент виходу з ладу одного з працездатних каналів. Особливість цієї структури полягає в тому, що вона має три інформаційні блоки, схему порівняння і комутатор. Команду на перекомутацію каналів видає блок керування після аналізу сигналів зі схем порівняння, які контролюють всі три канали (рисунк 1).

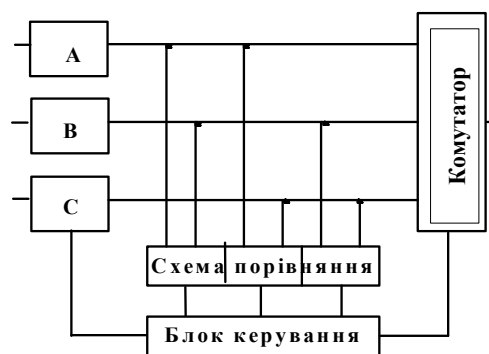


Рисунок 1 – Структурна схема DCH

При появі сигналу помилки в одному з каналів КСКЗ з ненавантаженим резервуванням ненавантажений канал вмикається, а відповідні технічні засоби здійснюють підрахунок сигналів помилок за інтервал спостереження ТС (заданий відрізок часу, підрахунок якого починається з появою першого сигналу помилки) і, якщо їхня кількість K більша заданої KZ , то контрольований канал ідентифікується як недієздатний і він вимикається від подальшого функціонування. Інтервалом безпеки ТВ будемо називати заданий відрізок часу, підрахунок якого починається з появою кожного сигналу помилки. Якщо $K < KZ$ і $ТС > ТВ$, контрольований канал КСКЗ вважається дієздатним і вмикається в роботу «за призначенням» з одночасним вимкненням одного з каналів у ненавантажений резерв після

моменту кінця спостереження ТС. Якщо $ТС < ТВ$, час спостереження збільшується на $T = ТВ - ТС$. Якщо за цей час не надійде сигнал помилки, канал вважається дієздатним. При появі сигналу помилки інтервал спостереження продовжується на величину ТВ. Якщо за час ТВ не надійде сигнал помилки, то канал вважається дієздатним. При появі L підряд сигналів помилок за час ТС контрольований канал ідентифікується як недієздатний і вимикається.

Конкретні величини ТС, ТВ, KZ, L повинні задаватися, виходячи з аналізу причин і викликаних ними послідовностей збоїв.

2. Аналітична модель надійності DCH

Розглянемо схему заміщення для системи, що працює при резервуванні заміщенням. З моменту вмикання системи в роботу спільно працюють два канали, у час τ виходу з ладу одного з них відбувається вмикання в роботу каналу С і комутація його на вихід системи. З часу τ починає витрачатися надійність каналу С. Оскільки у випадку збою одного з каналів системи за час ТС він ідентифікується і система вертається в попередній стан, то при достатньо тривалій експлуатації системи можна вважати, що до відмови система К разів вмикалася протягом часу ТС.

Нехай λZ – інтенсивність роботи одного каналу на збій, λB – на сталу відмову, $\lambda = \lambda Z + \lambda B$ – інтенсивність роботи одного каналу на збій і відмову. Приймаємо: $\lambda B = 0,1\lambda$; $\lambda Z = 0,9\lambda$. Тоді TZ – середній час напрацювання на збій двох каналів обчислюється за виразом

$$T_Z = 1/2 \cdot \lambda_Z. \quad (1)$$

Середня кількість збоїв двох каналів

$$K = t / T_Z = 2\lambda_Z t T_C. \quad (2)$$

Згідно з алгоритмом вмикання каналів після відмови двох із них відбувається перекомутація на резервний канал С, надійність якого почала витрачатися пізніше вхідних каналів:

$$\begin{aligned} P_{SS}(t) &= P_{AB}(t) + P_C(t, t + 2\lambda_C T_C t) = \\ &= e^{-0,2\lambda t} + \int_0^t T_C(t - (\tau - 2\lambda_C T_C t)) f_{AB}(\tau) d\tau = \\ &= e^{-0,2\lambda t} + e^{-\lambda(t - (\tau + 1,8T_C t\lambda))}. \end{aligned} \quad (3)$$

Частота відмов обчислюється за виразом (4). Отримані вирази підставляємо в (5).

З урахуванням безвідмовності комутатора і схеми порівняння маємо вираз (6).

$$f_{AB}(\tau) = \frac{dQ_{AB}(\tau)}{d\tau} = Q'_{AB}(\tau) = (1 - e^{-0,2\lambda\tau})' = 0,2\lambda e^{-0,2\lambda\tau}. \quad (4)$$

$$P_C(t, \tau) = \int_0^t e^{-\lambda(t - (\tau + 1,8T_C t\lambda))} \cdot 0,2\lambda e^{-0,2\lambda\tau} d\tau = \frac{e^{1,8\lambda^2 T_C t} (e^{-0,2\lambda t} - e^{-\lambda t})}{4}. \quad (5)$$

$$P_{DCH\ CK}(t) = \left[e^{-0,2\lambda t} + \frac{1}{4} e^{1,8\lambda^2 T_C t} (e^{-0,2\lambda t} - e^{-\lambda t}) \right] P_{cp}(t) P_K(t). \quad (6)$$

3. Марківська модель надійності DCH

Знаючи інтенсивності відмов і відновлення окремих елементів системи, можна побудувати граф переходів, у якому вершинами будуть стани системи, ребрами – переходи з інтенсивностями відмов і відновлень. При побудові графа переходів (рисунок 2) приймаємо такі допущення:

1. В кожному зі станів S_i водночас не може відбутися більше однієї відмови каналів.

2. Час спостереження T_H настільки малий, що під час його не може відбутися збій інших каналів.

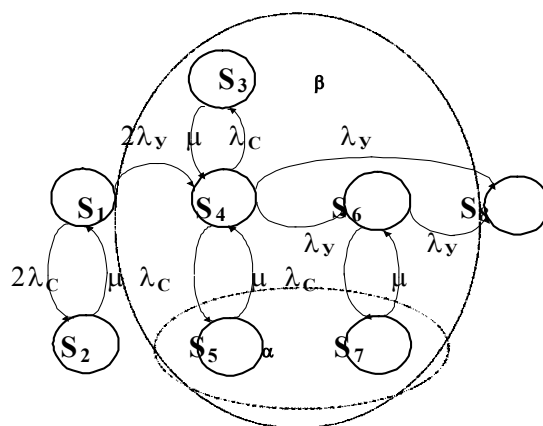


Рисунок 2 – Графи переходу станів DCH

Події S1 відповідає вхідний стан системи (два працездатні канали і один канал, який знаходиться в «холодному» резерві). Зі стану S1 система може перейти в стан S2 (збою одного з працездатних каналів) або в стан S4 (відмови одного з працездатних каналів). Зі стану S4 система може перейти в стан S3 (збою одного з працездатних каналів), водночас система залишиться в працездатному стані (оскільки алгоритм переключення каналів припускає перекомутацію на канал C, який раніше знаходився в «холодному» резерві, у разі незбігу двох каналів, що залишалися), в стан S5 (збою каналу C), водночас система знаходиться в стані часткової відмови, S6 (відмови одного з працездатних каналів), водночас система залишається працездатною (канал C дієздатний) і S8 (відмови каналу C, що призводить до відмови системи). Аналогічно зі стану S6 система переходить в стан S7 (збою каналу C, частковий збій системи, область α) або стан S8 (відмови системи). Інтенсивності відновлення каналів після збою

$$\mu = 1/T_C. \quad (7)$$

На підставі побудованого графа переходів записуємо систему диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_{S1}}{dt} &= -(2\lambda_C + 2\lambda_Y)P_{S1} + \mu P_{S2}, \\ \frac{dP_{S2}}{dt} &= -\mu P_{S2} + 2\lambda_C P_{S1}, \\ \frac{dP_{S3}}{dt} &= -\mu P_{S3} + \lambda_C P_{S4}, \\ \frac{dP_{S4}}{dt} &= -(2\lambda_C + 2\lambda_Y)P_{S4} + \mu P_{S3} + \mu P_{S5} + 2\lambda_C P_{S1}, \\ \frac{dP_{S5}}{dt} &= -\mu P_{S5} + \lambda_C P_{S4}, \\ \frac{dP_{S6}}{dt} &= -(\lambda_C + \lambda_Y)P_{S6} + \mu P_{S7} + \lambda_Y P_{S4}, \\ \frac{dP_{S7}}{dt} &= -\mu P_{S7} + \lambda_C P_{S6}, \\ \frac{dP_{S8}}{dt} &= \lambda_Y P_{S6} + \lambda_Y P_{S4}. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Для врахування безвідмовності засобів порівняння і комутації введемо додаткові переходи зі станів S1, S4, S6 в стан S8, з інтенсивностями відмови комутатора і схем порівняння системи, що дорівнюють $\lambda_{СП,К} = 0,05 \cdot \lambda_B$.

Вирішуємо систему чисельним методом [17] і одержуємо всі ймовірності станів $\{P_{1-8}(t)\}$. Знаходимо функцію готовності системи (ФГ) як суми ймовірностей станів, в яких система зберігає працездатність:

$$P_{SS}(t) = P_{S1}(t) + P_{S2}(t) + P_{S3}(t) + P_{S4}(t) + P_{S6}(t) \quad (9)$$

4. Порівняльний аналіз моделей структури

Для аналізу використаємо аналітичну модель DCH без урахування збоїв каналів, аналітичну модель DCH з урахуванням збоїв – DCH_{СК} і чисельну модель, отриману на основі марківських графів переходів. Аналітична модель DCH без урахування збоїв має вигляд

$$P_{2DCH}(t) = e^{-2\lambda t} + 2e^{-\lambda t}(1 - e^{-\lambda t}) = \\ = P(t)(2 - P(t)) = [P(t)(2 - P(t))]P_{CC}P_K(t). \quad (10)$$

Для аналізу отриманих аналітичних виразів DCH зафіксуємо змінні t , λ , λ_Z , λ_B , $\lambda_{СП}$, λ_K . Час t будемо змінювати з 0 до 3 років з кроком $\Delta t = 2160$ годин. Інтенсивність відмов λ каналів змінюється в межах $\lambda = 10^{-5} - 10^{-7}$ 1/год. Для λ_Z , λ_B , $\lambda_{СП}$, λ_K вводимо залежність від λ , де $\lambda_{СП} = m\lambda_B$, $\lambda_K = l\lambda_B$; приймаємо $m = 2 \cdot 10^{-2}$, $l = 3 \cdot 10^{-2}$. Підставляючи ці значення в отримані аналітичні вирази, аналізуємо аналітичні моделі DCH₁ з урахуванням збоїв, DCH₂ без урахування збоїв і марківські моделі DCH₁ з урахуванням збоїв. Результати аналізу показали, що для $\lambda = 10^{-5}$ 1/г моделі DCH₁ з урахуванням збоїв більш надійні, ніж DCH₂ без урахування збоїв. Це зумовлено тим, що збій в одному з каналів DCH₂ призведе до «втрати» каналу і, як наслідок цього, до деградації системи. Результати, отримані при аналітичному і чисельному дослідженні моделей DCH₁, незначно різнилися між собою, що підтверджує можливість використання цих моделей для оцінювання ненавантажених систем з різноманітними режимами вмикання каналів.

Висновки і перспективи подальшого розвитку. В результаті аналізу різних моделей DCH визначено області доцільного застосування залежно від різноманітних умов. При використанні каналів малої надійності $\lambda = 10^{-5}$ 1/год. при короткому часі функціонування системи спостерігається перевага DCH₁ з урахуванням збоїв, порівняно з DCH₂ без урахування збоїв каналів системи. Для більш надійних каналів $\lambda = 10^{-7}$ 1/год. доцільно ви-

користати DCH₂ без урахування збоїв каналів. Аналітичні вирази для структур з «холодним» резервним каналом розглянуто більш глибоко в зв'язку з тим, що це найбільш прийнятний засіб підвищення надійності КСКЗ без обслуговування при тривалому періоді експлуатації. Отримані аналітичні вирази дають можливість робити вибір ненавантажених резервованих структур КСКЗ.

Таким чином, запропоновано моделі та алгоритми, що забезпечують аналіз послідовностей помилок, які є наслідком збоїв каналів комп'ютерних систем критичного застосування з мажоритарним резервуванням. Крім того, наводяться приклади моделей систем надійності, що дасть змогу мінімізувати ймовірність недостовірної ідентифікації їхнього технічного стану. Запропоновані моделі й алгоритми є основою відповідних програмних засобів.

Список використаних джерел / References

- [1] M. Kuwaiti, N. Kyriakopoulos, and S. Hussein, "Network dependability, fault-tolerance, reliability, security, survivability: A framework for comparative analysis", in *2006 Int. Conf. on Computer Engineering and Systems, IEEE Xplore*, Cairo, Egypt, Febr. 26, 2007, INSPEC: 9232341. DOI: 10.1109/ICCES.2006.320462
- [2] Alain Villemeur, *Reliability, Availability, Maintainability and Assessment* (Vol. 1. Methods and Techniques). John Wiley&Sons, 1992.
- [3] Azianti Ismail, Won Jung, "Research trends in automotive functional safety", in *2013 Int. Conf. on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, Chengdu, China, 2013, INSPEC: 13828750. DOI: 10.1109/QR2MSE.2013.6625523
- [4] V. Mukhin, N. Kuchuk, N. Kosenko, H. Kuchuk, and V. Kosenko, "Decomposition method for synthesizing the computer system architecture", *Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC)*, vol. 938, pp. 289-300, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2_27
- [5] G. Kuchuk, A. Kovalenko, I. E. Komari, A. Svyrydov, and V. Kharchenko, "Improving big data centers energy efficiency: traffic based model and method", in *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications. Studies in Systems, Decision and Control*, V. Kharchenko, Y. Kondratenko, J. Kacprzyk, Eds., vol. 171, Springer, Cham, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-00253-4_8
- [6] V. Merlac, S. Smatkov, N. Kuchuk, and A. Nechausov, "Resources distribution method of university e-learning on the hypercovergent platform", *Conf. Proc. of 2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018*, Kyiv, May 24-27, 2018, pp. 136-140. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409114
- [7] N. Kuchuk, O. Mozhaiev, M. Mozhaiev, and H. Kuchuk, "Method for calculating of R-learning traffic peakedness", in *Proc. 2017 4th Int. Sci.-Pract. Conf. Problems of Informatics Science and Technology (PIC S and T)*, pp. 359-362, 2017. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246416
- [8] I. B. Shubinsky, and A. M. Zamyshlyaev, "Topological semimarkov method for calculation of stationary parameters of reliability and functional safety of technical systems", *Reliability: Theory & Applications*, San-Diego, USA, no. 2, 2012.
- [9] D. Wilkie, "Pictorial representation of Kendall's rank correlation coefficient", *Teaching Statistics*, vol. 2, pp. 76-78, 1980.
- [10] CENELEC EN 50126: Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), 1998.
- [11] H. Attar, M. R. Khosravi, S. I. Shmatkov, N. G. Kuchuk, and M. Alhihi, "Review and performance evaluation of FIFO, PQ, CQ, FQ, and WFQ algorithms in multimedia wireless sensor networks", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 16 (6): 155014772091323, June, 2020. DOI: 10.1177/1550147720913233
- [12] Shivendra Singh, Varshita Gupta, Anuj Grover, and Kedar Janardhan Dhoori, "Diagnostic circuit for latent fault detection in SRAM row decoder", in *21st Int. Symposium on Quality Electronic Design (ISQED)*, pp. 395-400, 2020. DOI: 10.1109/ISQED48828.2020.9136968
- [13] V. Donets, N. Kuchuk, and S. Shmatkov, "Development of software of e-learning in-

- formation system synthesis modeling process", *Advanced Information Systems*, vol. 2, no 2, pp. 117-121, 2018.
DOI: 10.20998/2522-9052.2018.2.20
- [14] V. Rudnitsky, R. Berdybaev, R. Breus, N. Lada, and M. Pustovit, "Synthesis of reverse two-bit dual-operated strictly straight cryptographic coding on the basis of another operation", *Advanced Information Systems*, vol. 3, no 4, pp. 109-114, 2019.
DOI: 10.20998/2522-9052.2019.4.16
- [15] A. Svyrydov, H. Kuchuk, and O. Tsiapa, "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", in *Proc. 2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT 2018)*, pp. 593-597.
DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409201
- [16] N. Lada, V. Dzyuba, R. Breus and S. Lada, "Synthesis of sets of non-symmetric two-operand two-bit crypto operations within the permutation accuracy", *Technology audit and production reserves*, vol. 2, no. 2 (52), pp. 28-31, 2020.
DOI: 10.15587/2706-5448.2020.202099
- [17] A. Kovalenko, and H. Kuchuk, "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 22-27, 2018.
DOI: 10.20998/2522-9052.2018.1.04
- [18] S. Semenov, O. Sira, S. Gavrylenko, and N. Kuchuk, "Identification of the state of an object under conditions of fuzzy input data", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 4 (97), pp. 22-30, 2019.
DOI: 10.15587/1729-4061.2019.157085
- [19] W. Kuo, and Z. Ming, *Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.
- [20] E. F. Moore, and C. E. Shannon, "Reliable circuits using less reliable relays - Part I", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 262, no. 3, pp. 191-208, 1956.

T. O. Prokopenko¹, *D.Tech.Sc., professor,*

M. O. Mozhaiev², *Ph.D.,*

S. V. Rudnitskyi¹, *Ph.D.,*

Yu. V. Rudnitska¹

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

²National Scientific Center «Hon. Prof. M. S. Bokarius Forensic Science Institute»,
Zolochivska St., 8a, Kharkiv, Ukraine

PROGRAMMING OF UNLOADED REDUNDANCY MODE IN COMPUTER SYSTEMS OF CRITICAL APPLICATION

Today, the quality control of intermittent failures, the share of which in the total failure rate is approximately 80-90 %, as well as the correct identification of the state of these channels based on the analysis of error signals for the minimum time of their disconnection from the solution of "useful" tasks are of particular importance today in improving the efficiency of using channels of computer systems of critical application. The purpose of the study is to develop models and algorithms for analyzing the sequences of errors that result from channel failures of computer systems for critical use with majority redundancy, which will minimize the likelihood of inaccurate identification of their technical condition and are the basis of appropriate software. In the paper for analyzing the algorithms and mathematical model a duplicated system with an additional channel, which is situated in the unloaded reserve, turns on after the fault with one of the channels and begins to lose reliability at the fault-time with one of the working channels, has been considered. Knowing the intensities of failures and recoveries of the system's individual elements, a transition graph is constructed in which the vertices will be the states of the system, the edges will be the transitions with intensities of failures and recoveries. As a result of analyzing various DCH models the areas of expedient application depending

on various conditions have been determined. When using low-reliability channels, an advantage of DCH_1 with a short-time system operation, taking into account failures, is observed compared to DCH_2 without taking into account failures of the system channels. For more reliable channels, it is advisable to use DCH_2 without taking into account channel failures. Analytical expressions for the structures with a "cold" backup channel are considered in more depth due to the fact that this is the most acceptable means of increasing the CSCA reliability without maintenance for a long operation's period. The reliability of computer systems of critical application, which use the mode of unloaded redundancy, is researched in terms of resistance to short-term failures, and the areas of their appropriate use are determined. The analytical expressions obtained in the article allow to make a choice of unloaded redundant structures of CSCA.

Keywords: software, computer systems of critical application; failure; unloaded redundancy.

[0000-0001-6896-0612] **Т. В. Смірнова**¹, к.т.н., доцент,
 [0000-0002-3783-0476] **Р. М. Минайленко**¹, к.т.н., доцент,
 [0000-0002-7625-9022] **О. П. Доренський**¹, к.т.н.,
 [0000-0002-0009-337X] **С. В. Сисоєнко**², к.т.н.,
 [0000-0002-7649-7442] **С. А. Смірнов**¹, к.т.н., доцент

¹Центральноукраїнський національний технічний університет
 просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна
 e-mail: it-kntu@ukr.net

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

ХМАРНА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Праця присвячена вирішенню завдання оптимізації технологічного процесу відновлення й зміцнення поверхонь валів зі сталі шляхом реалізації методу й узагальненої моделі ланцюга абстрактних технологічних процесів у вигляді хмарної автоматизованої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень. Означене дає можливість розв'язати задачу побудови оптимізованого ланцюга технологічного процесу відновлення й зміцнення поверхонь валів із вибором раціонального процесу серед альтернативних згідно з завданням. У роботі проаналізовано абстрактний технологічний процес, його властивості, методи переходу до конкретного технологічного процесу, інформаційну модель та методи її одержання, абстрактні експертні системи, формалізацію підмножини абстрактних експертних систем, рекомендаційних систем, а також розглянуто технологічні аспекти реалізації інтелектуальної підтримки прийняття рішень технологічного процесу як хмарного сервісу, перевірки відповідності реальних характеристик, властивостей, поведінки автоматизованої системи очікуваням.

Ключові слова: хмарний сервіс, експертна система, поверхня деталей, оптимізація, електродугове напilenня, рекомендаційна система.

Вступ. Нині практично в усіх галузях виробництва застосовуються інформаційні технології. Зокрема активно розвиваються та впроваджуються й хмарні технології, що дає можливість підвищити ефективність виробництва, у тому числі рівень його оптимізації. Зважаючи на вкрай важливу на сьогодні проблему оптимізації технологічного процесу (наприклад відновлення та зміцнення поверхонь деталей), застосування сучасних інформаційних технологій є вимогою сучасності й, очевидно, запорукою ефективності. Разом з тим, взявши до уваги широке впровадження і застосування у виробництві Інтернет-технологій, стає очевидною доцільність створення та застосування хмарних автоматизованих систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій [1-6] дає підстави стверджувати, що оптимізувати виробничий процес можливо із застосуванням хмарних сервісів. У праці [1] показано, що лінії відновлення поверхонь деталей функціонують в умовах гнучкої зміни параметрів виконання технологічних операцій;

тобто в таких умовах, коли одні технологічні процеси відновлення й зміцнення поверхонь можуть замінюватися іншими технологіями відновлення залежно від видів пошкодження матеріалів і від вимог щодо умов експлуатації кінцевого продукту [2]. Водночас бракує відповідних автоматизованих систем для розв'язку задачі синтезу оптимізованого ланцюга технологічного процесу (ТП), систем вибору оптимального ТП [3, 4]. Разом з тим, для розв'язку означених науково-технічних задач недостатньо застосовуються сучасні хмарні технології. Тож постає актуальна задача оптимізації ланцюга технологічного процесу в інформаційному забезпеченні експертних систем як хмарної АС (ХАС) інтелектуальної підтримки прийняття рішень (ІППР).

Мета дослідження, виходячи із необхідності розв'язку сформульованої науково-технічної задачі, полягає у реалізації ХАС як сервісу (SaaS) для отримання розглянутих у працях [1-2] поверхонь валів зі сталі СТ45 з заданими характеристиками на основі ком-

бінації декількох технологічних процесів. Для досягнення мети дослідження варто визначити види й область застосування експертних і рекомендаційних систем для забезпечення оптимізації ланцюга технологічних процесів. Подальші завдання проблематики побудови інформаційних технологій оптимізації комбінованих технологічних процесів відновлення й зміцнення поверхонь деталей будуть поставлені за рішенням поточного завдання реалізації хмарної рекомендаційної системи як сервісу для отримання поверхонь валів зі сталі СТ45 з заданими характеристиками на основі комбінації декількох технологічних процесів.

Виклад основного матеріалу. У праці [2] розглянуто абстрактний технологічний процес, його властивості та методи переходу до конкретного технологічного процесу, інформаційну модель технологічного процесу і методи її одержання, абстрактні експертні системи та їх складові. Тож необхідно виконати аналіз відомих експертних систем (ЕС) оптимізації технологічних процесів і привести їх до абстрактного вигляду. Пошук оптимальних рішень під час проектування технологічного процесу з кількома відновними операціями над поверхнею зношених валів має ряд особливостей. Технологічний процес повинен складатися з ланцюга окремих технологічних операцій, коли кожен із процесів внаслідок обставин може бути замінено на технологічний процес на іншій основі, але аналогічний за отриманим результатом. Тобто кожний етап обробки – підготовки поверхні, відновлення, механічної обробки, зміцнення поверхні – створює ланцюг технологічних операцій, де кожна операція має можливість бути виконаною кількома методиками. Для кожного з етапів обробки характерна технологічна спадковість, коли використання технологій обробки обмежується за рахунок обмеження, яке накладено попередньо використаною операцією. Проблема є часткова технологічна спадковість, коли кожні наступні операції частково перекривають кілька попередніх технологічних операцій, яка значно ускладнює повний граф можливих ланцюгів проведених операцій. У зв'язку з означенням оптимізація процесу відновлення деталей є неможливою до визначення повного кола обробки [2, 3].

Для оптимізації технологічної операції по ланцюгу технологічного процесу використовують експертні системи зі структурою [2],

а ЕС може бути семантичною, фреймовою, продукційною, нейрофреймовою. В ЕС експертом є фахівець з відповідної технологічної операції; інженер знань – фахівець, який формалізує знання експертів, відповідає за процес отримання знань і надання їх до бази знань експертної системи; база знань – множина доступних знань щодо обраної технологічної операції; система інтелектуального рішення – ключовий елемент експертної системи, який на основі наявних знань і вхідних параметрів поставленого завдання надає параметри ТП з оптимізацією за заданими критеріями, а інтерфейс користувача відповідає за взаємодію між комп'ютерними системами й людиною.

Синтез ЕС оптимізації ТП виконується за шість етапів: 1) визначення вхідних та вихідних даних; 2) складання словника атрибутів, які властиві обраній технологічній операції; 3) виявлення об'єктів і понять; 4) виявлення зв'язків між вхідними керованими та некерованими параметрами технологічної операції; 5) визначення цілей оптимізації; 6) визначення стратегій визначення параметрів технологічної операції для досягнення поставлених оптимізаційних задач.

У роботі [2] наведено ілюстрацію інформаційної моделі ТП на основі відновлення поверхні електродуговим покриттям. Модель дає змогу отримати інформацію для розрахунку характеристик, які отримуються в результаті обробки. Під час побудови математичної моделі ТП зазвичай обмежуються поданням об'єкта дослідження у вигляді «чорної скриньки». Тому виникає потреба у функціональному пов'язуванні вхідних даних та певних некерованих величин до параметрів, які вимагаються від ТП. Для електродугового наплення, як і для більшості технологічних процесів, така функціональна залежність буде мати такий вигляд:

$$\vec{Y} = f\left(\vec{X}, \vec{V}, \vec{Z}, \vec{R}\right), \quad (1)$$

де $\vec{X}$ – контрольовані величини процесу з обмеженнями $x_{\min j} \leq x_i \leq x_{\max j}$; $\vec{V}$ – відомі й неконтрольовані величини процесу; $\vec{Z}$ – невідомі й неконтрольовані величини; $\vec{R}$ – випадкові величини, які впливають на процес; $\vec{Y}$ – параметри, що досягаються в процесі

технологічної обробки. Випадкова складова є такою, що не контролюється. Тому в моделях часто ними нехтують, але в процесі оцінювання адекватності моделі обов'язково робиться пошук надійних інтервалів очікуваних величин з реальними результатами.

До параметрів для електродугового наплення та величин, які задають режим ТП, належать: напруга дуги x_1 , дистанція наплення x_2 , діаметр дроту x_3 , товщина покриття x_4 , тиск у камері x_5 , швидкість ковзання x_6 ; їх допустимі границі наведено у праці [2]. Багатофакторний експеримент з регресією результатів на статичний поліном дав математичну модель ТП y_2 , наприклад, для міцності зчеплення [2].

До параметрів, які необхідно отримати в результаті обробки $\vec{Y}$, належать пористість y_1 , міцність зчеплення y_2 , твердість y_3 , зносостійкість y_4 .

Для інших вихідних параметрів також маємо математичні регресійні відносини або правила їх знаходження. Множина відношень $\vec{Y}$ і за типом y_2 становлять математичну модель ТП.

Побудова ЕС вимагає наявності відношень для знаходження параметрів, які оптимізуються $G(\vec{Y}), T(\vec{Y}), E(\vec{Y}), \dots$. Ґрунтуючись на цьому, враховуючи математичну модель ТП, побудовано постійні ЕС оптимізації ТП електродугового наплення на поверхні валів з метою відновлення поверхонь валів електродугового наплення. Діаграму потоку інформації для реалізації ЕС оптимізації ТП зображено в [2]. Схема передбачає наявність ітераційного пошуку методом поступового поліпшення результату з початкового допустимого режиму роботи системи. Для надійнішого результату при наявності значної нелінійності такий процес можна проводити з кількох початкових точок.

Виконавши аналіз інформаційних потоків під час оптимізації ТП відновлення поверхонь електродуговим напленням, отримаємо такі інформаційні одиниці [2]: 1) база знань, яка містить дані експериментів, допустимі діапазони вхідних даних, список вхідних параметрів, список вихідних (вихідних) параметрів, методи і математичне забезпечення розрахунків витрат на процес; 2) система отримання вимог до результатів відновлення

і критерій (або критерії) оптимізації; 3) система пошуку екстремумів у багатовимірному просторі; 4) система перевірки на досягнення результату; 5) система виявлення «зацикленості» пошуку рішень у випадках недосяжності поставлених вимог; 6) система введення неконтрольованих вхідних параметрів; 7) система забезпечення інформаційного потоку між компонентами ЕС з урахуванням синхронізації та взаємних блокувань. Відповідно означене є складовими інформаційного забезпечення функціонування ЕС.

На основі інформаційної моделі технологічної операції електродугового наплення [2] формалізуємо й узагальнимо інформаційні моделі на більшість технологічних операцій відновлення і зміцнення сталевих поверхонь.

Нехай маємо математичну модель технологічного процесу k відновлення поверхонь:

$$\vec{Y}_k = f(\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k), \quad (2)$$

де $\vec{Y}_k \in Y$ – кількісні значення підмножини характеристик поверхонь, що отримана за результатами ТП k ; $\vec{X}_k \in X$ – кількісні значення підмножини відомих і контрольованих параметрів окремого технологічного процесу з усіх доступних.

Згідно з попередніми підмножинами позначено підмножини, які відносяться до неконтрольованих та інших вхідних параметрів (1). Оскільки в загальному випадку не відома кількість даних для побудови математичної моделі технологічного процесу, то неможливо заздалегідь визначити методи її побудови. Для цього необхідно доповнити модель додатковими даними та засобами побудови математичних моделей M .

Множина застосовних методів побудови математичних моделей процесу познача-

тиметься $\vec{M}_k \in M$ і буде залежною від наявного набору даних для побудови моделей:

$$\vec{M}_k = C[\underline{M}, \underline{y_{defY_k}}, \underline{x_{defX_k}}, \underline{v_{defV_k}}] \quad (3)$$

де def визначає операцію відбору відомих значень, які будуть використані для побудови математичної моделі.

Означене визначення вибору множини методів побудови математичної моделі спричинене тим, що при великій кількості даних можна для регресії використовувати методи на основі апроксимацій або нейронні мережі. При малому наборі даних вибір звужується до вибору між методом найменших квадратів, сплайнів або інтерполяційних операцій. Отже, операція фільтрування допустимих методів (3) є необхідною, і при доповненні бази знань методи математичного моделювання можуть змінюватися. Вибір методу з допустимих F може бути покладено на людину або виконуватися автоматично за заздалегідь внесеними пріоритетами. Тобто ЕС включатиме вкладену експертну систему математичного моделювання та алгоритми пошуку максимумів і мінімумів на ній. Результатом дії такої системи є готова математична модель:

$$f: \left[\vec{M}_k, y, x, v \right], \quad (4)$$

де f – функція з (2).

Часто ТП є складовими складних багатостадійних технологій відновлення або зміцнення поверхонь деталей. В цьому випадку поверхня під час обробки не набуває на виході значення Y_k , а відбувається перетворення

властивостей поверхні $\vec{Y}_k \rightarrow \vec{Y}_{k+1}$, водночас на результат можуть впливати вхідні властивості (як при шліфуванні) або можуть і не впливати (як при електродовому напиленні). Тож для узагальненої моделі ТП модель (2) варто доповнити вхідними параметрами поверхні, яка з урахуванням (3) й (4)

$$\vec{Y}_k = F[C[M, y, x, v] \left[\vec{X}_k, \vec{V}_k, \vec{Z}_k, \vec{R}_k, \vec{Y}_{k-1} \right)]. \quad (5)$$

Зазначені доповнення вимагають внесення змін [1] до діаграми руху інформації в ЕС.

До складу ІС підтримки прийняття рішень [4] входить ЕС оптимізації металорізальних технологічних процесів (механічної обробки різанням або обробки різанням). Її інформаційна модель [2] містить розглянуті функції-моделі металорізального процесу (обробки різанням), розрахунки параметрів, які можна включити до оптимізації, виділені вхідні й вихідні дані. Водночас до вхідних даних відносяться вимоги до результату оброблення й обмеження на ресурси, а до вихід-

них – віднесені параметри ТП і параметри отриманого виробу з витратами на його виробництво. Варто зазначити, що, якщо унікальні параметри включити до множин M , V , X , і Y , то запис у векторній формі (5) також є узагальненням і до металорізальних ТП.

На основі математичного співвідношення (5) і діаграми потоку інформації в узагальненій ЕС ТП проведено формалізацію підмножини абстрактних ЕС оптимізації ТП. Для цього використано такі позначення множин, які формують базу знань для ряду ТП, що містить операцію виділення підмножин елементів окремої технологічної операції k : 1) X_k – множина керованих параметрів ТП k ; 2) Y_k – множина параметрів деталі, які контролює чи змінює ТП k ; 3) V_k – множина параметрів, які не управляються, але які необхідно враховувати під час виконання ТП k ; 4) M_k – множина методів отримання математичної моделі ТП k ; 5) $P(m)$, $m \subset P(M_k)$ – обраний екземпляр з методів оптимізації, який можна застосувати для зазначених математичних моделей, R – операція вибору методу з множини методів (операція вибору може проводитися автоматично або за вибором розробника ЕС); 6) D_k – множина функцій розрахунку матеріальних (зокрема й часових) витрат на виконання ТП k , за якими може проводитися процес оптимізації (до неї належать і лінійні або більш складні комбінації для отримання остаточної багатофакторної вагової оптимізаційної функції); 7) G_k – множина матеріальних ресурсів, які використовує ТП. Знаком вектора на позначеннях визначаємо конкретний кортеж реальних величин, які відповідають множині обраних величин і характеристик. Тоді з діаграми потоку інформації в реалізації узагальненої k -ї ЕС оптимізації ТП [2] випливають такі співвідношення для окремого ТП k :

$$\begin{cases} \vec{X}_k = m \left(\vec{Y}_k, \vec{V}_k, \vec{Y}_{k-1}, \vec{G}_k \right) \\ \vec{G}_k = D_k \left(\vec{X}_k, \vec{V}_k \right) \\ \left| \vec{G}_k \right| \rightarrow \min \\ \left| \vec{G}_k \right| = \infty, \quad \vec{Y}_{k-1} \notin Y_k \end{cases} \quad (6)$$

У (8) значення нормування має ширше значення, яке набуває змісту виділення скаляра з вектора матеріальних витрат. Метод виділення скаляра може значно різнитися залежно від обраного ТП, проте в більшості випадків за цю операцію можна прийняти лінійну комбінацію матеріальних і часових витрат. За потреби досягнення максимальності одного з показників пропонується в лінійній комбінації використовувати негативні коефіцієнти. Крім того, складність у пошуку оптимального режиму обробки полягає в тому, що система (6) містить як аргументи і результати одні й ті ж множини числових значень. Водночас операції m і D_k можуть мати нелінійний характер, ділянки запізнення або не будуть виражатися аналітично, коли процеси розрахунку можуть виконуватися декларативно, або будуть результатом імітаційного моделювання. Також для застосування деяких алгоритмів оптимізації проведено доповнення $\left| \vec{G}_k \right| \rightarrow \infty, \vec{Y}_{k-1} \notin Y_k$, яке вступає в силу, коли

надходить неможлива вимога до ТП, і повертає значно перевищену потребу в ресурсах. Тим самим будь-який процес стає придатним для використання, але його використання приймається за неефективне. Таке введення дає змогу включити до алгоритмів оптимізації додатково велику базу пошукових евристик. Також аналітичне доповнення розрахунків використаних ресурсів швидким зростанням ресурсних потреб при виході за вхідні вимоги технологічного процесу розширює методики оптимізації градієнтними спусками.

Сукупність S і вираз (6) формують формальну задачу множини ТП. Додавання до бази знань нового ТП супроводжується такими операціями:

$$\{S = S \cup S_k, S_k = \langle X_k, Y_k, V_k, M_k, P_k, D_k, G_k \rangle\}, \quad (7)$$

де k є номером доданого до системи ТП.

Наступним етапом дослідження є формалізація рекомендаційних систем (РС) для забезпечення оптимізації ланцюга ТП як надбудови ЕС над експертними системами окремих ТП. Як відомо, виготовлення продукції вимагає використання послідовності ТП [2]. Кожен із ТП відповідно до позначень приймає деталь з параметрами $\vec{Y}_{k-1}$ і повертає її з па-

раметрами $\vec{Y}_k$. Це формує ланцюг технологічних операцій (10):

$$Y = \sum_{(k)} \vec{Y}_k, \quad (8)$$

де $\langle k \rangle$ – екземпляр комбінаторної конфігурації з доступних ТП, а $k-1$ – попередній ТП.

Таким чином, сукупність відношень (6), (7), (8), дію яких представлено графами [2], формують узагальнену модель ланцюга абстрактних ТП.

Реалізація хмарної автоматизованої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень ТП пропонується на основі результатів роботи [7]. Виконаний у ній аналіз моделей обслуговування хмарних сервісів показав, що основними, які призначені для вирішення різних інженерних задач, розрахунків, аналізу й створення моделей фізичних процесів, є PaaS і SaaS [10]. PaaS підходить для ефективного надання програмних середовищ та інструментів для розробників промисловим організаціям, які розробляють і тестують програмне забезпечення та застосунки для баз даних. Це забезпечує повне та централізоване середовище розвитку, яке доступне на вимогу. При правильній реалізації SaaS може забезпечити значне заощадження коштів від традиційного підходу до володіння програмним забезпеченням. Ця модель хмарної послуги пропонує мінімізовані витрати на налаштування устаткування та програмного забезпечення, навіть якщо вона забезпечує надмірність і високу доступність, що дає змогу обслуговувати запуснені програми. Кінцеві користувачі звільняються від управління та контролю базової ІТ-інфраструктури. Ліцензії на безпеку, мережу, обчислення та всі ліцензії на програмне забезпечення вкладаються в щомісячну або щорічну плату, виключаючи або значно скорочуючи капітальні витрати. Натомість існує разова вартість доступу до будь-яких бажаних послуг. Організації платять за те, що вони використовують, і часто мають можливість додавати або видаляти послуги за потребою.

Деякі середовища, що базуються на хмарі, включають складні середовища моделювання для повного тестування проектних застосунків перед переміщенням їх у виробничу систему. Програми й застосунки для баз даних можуть бути спеціальним програмним

забезпеченням, які промислові організації раніше використовували, але зараз розгортаються на віртуальних машинах у хмарі. Вони також можуть бути додатками, побудованими в хмарі за допомогою платформи й інструментів, наданих постачальником послуг автоматизації. У деяких випадках та сама програмна система може використовуватися для програм SaaS і PaaS. Інженери з управління та процесів можуть використовувати модель PaaS для розробки програми та SaaS для їх виробничого середовища. Наприклад, автоматизація, керування процесами та програмне забезпечення SCADA, що традиційно пропонується лише на базі замовника, доступні як позапроцесорне середовище розробки та моделювання (Open VEP) або як програмне забезпечення SCADA, оптимізоване для забезпечення надійності та безпеки для моніторингу на рівні підприємства і контролю розповсюджених активів [10].

Розміщення такої програмної системи в центрі обробки даних з прямим високошвидкісним підключенням до телекомунікацій та Інтернету дає можливість швидкодіючого й надійного підключення до всіх віддалених пристроїв, візуалізації загального процесу. В рамках цих сервісів з'являється досить новий перспективний сервіс CAEaaS – комп'ютерні системи інженерного аналізу як сервіс, призначений для перенесення роботи систем інженерних розрахунків та систем автоматизованого проектування на хмарну платформу. Разом з тим, CAE (Computer-Aided Engineering) використовується для опису процедури всього процесу інженерії продукту, від проектування та віртуального тестування за допомогою складних аналітичних алгоритмів до планування виготовлення. CAE є наступним кроком не тільки розробки продукту, але й підтримки інженерного процесу, оскільки він дає змогу виконувати випробування та моделювання фізичних властивостей виробу без необхідності фізичного прототипу [11].

У праці [19] наведено характеристики сервісів IaaS, PaaS, HaaS, SaaS, CAEaaS. Відповідно IaaS надає сервіс онлайнного зберігання, синхронізації файлів, віртуальних машин і провайдерується Dropbox, Google Drive, Amazon; PaaS забезпечує розвиток і розміщення мережових застосунків, систему запиту бази даних для аналізу великих наборів даних, розвиток інтерфейсів користувача і соціальних

мережових сайтів на базі Microsoft Windows Azure, Salesforce.com, Amazon, мережових сайтів: HaaS – постачання пошукових систем, Ponoko, shapeways, MFG.com, Quickpats.com; SaaS – високопродуктивні обчислення у хмарі, CAD, надання хмари, 3D-моделювання, мобільний оглядач на Autodesk360-платформі, Dassault Systemes, Sabalcore; CAEaaS – універсальна програмна система кінцево-елементного аналізу (ANSYS), система для проектування й розрахунку в галузі машинобудування (WinMachine).

Відповідно до [11] переваги PaaS полягають, насамперед, у такому: 1) він дає можливість програмувати більш високий рівень із різко зниженою складністю; 2) загальна розробка застосунку може бути ефективнішою, оскільки зменшуються ресурси інфраструктури і технічне обслуговування, вдосконалення програми, таким чином, стає простішим. Водночас до недоліків різних постачальників PaaS, на які посилаються користувачі, можна віднести відсутність функціональних можливостей, зниження контролю, труднощі систем маршрутизації трафіку.

Обговорення результатів дослідження. PaaS забезпечує зовнішню мережеву підтримку, яка доповнюється ІТ-інфраструктурою, обчислювальними ресурсами, виробничим технічним забезпеченням, прикладним програмним забезпеченням завдяки сервісам IaaS, HaaS і SaaS. ANSYS має власні активи в хмарі і щорічно оновлюється, не вимагаючи перевстановлення ключів. Доцільним для застосування для досягнення мети роботи є хмарний сервіс CAEaaS. Він допомагає скоротити витрати і час на розробку продукту, покращити якість і довговічність продукту. Комплексне керування даними CAE та управління процесами розширює здатність ефективно використовувати уявлення про ефективність та вдосконалювати конструкції для широкої спільноти [7]. Очевидно, надалі постане задача перевірки відповідності реальних характеристик, властивостей, поведінки ХАС ППР очікуваним, розв'язок якої забезпечить застосування методики [8].

Висновки й перспективи подальшого розвитку. В роботі запропоновано хмарну автоматизовану систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень технологічних процесів як реалізацію методу оптимізації ТП відновлення й зміцнення поверхні валів

зі сталі. У дослідженні розглянуто абстрактний ТП, його властивості й методи переходу до конкретного технологічного процесу, інформаційну модель ТП, методи її одержання, абстрактні ЕС, на основі чого запропоновано формалізацію підмножини абстрактних ЕС оптимізації ТП, формалізацію рекомендаційних систем для забезпечення оптимізації ланцюга ТП як надбудови ЕС над експертними системами окремих технологічних процесів.

Хмарна АС інтелектуальної підтримки прийняття рішень технологічних процесів, яка реалізує метод оптимізації ТП відновлення й зміцнення поверхонь валів зі сталі, забезпечує розв'язок задачі побудови оптимізованого ланцюга ТП відновлення й зміцнення поверхонь валів із вибором найбільш раціонального процесу серед альтернативних згідно з завданням.

Список використаних джерел

- [1] Т. В. Смірнова, Є. К. Солових, О. А. Смірнов, та О. М. Дреєв, "Побудова хмарних інформаційних технологій оптимізації технологічного процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей", *Центральноукраїнський науковий вісник*, вип. 1 (32), с. 184-194., 2019.
- [2] А. А. Смирнов, Т. В. Смирнова, А. Н. Дреєв, и А. В. Дудан, "Оптимизация технологического процесса восстановления и упрочнения поверхностей с заданными характеристиками в виде облачного сервиса", *Вестник Полоцкого государственного университета*, № 3, с. 50-61, 2020.
- [3] К. І. Скрипка, та М. А. Зенкин, "Експертна система автоматизованого вибору способів відновлення спрацьованих деталей", *Вісник ЖДТУ*, № 1 (28), с. 66-68, 2004.
- [4] В. В. Лимаренко, "Інформаційна система підтримки рішень для автоматизації створення технологічних процесів механообробки деталей високоточного обладнання", дис.. канд. техн. наук, Нац. техн. ун-т "ХПІ", Харків, 2019.
- [5] К. К. Бабич, А. И. Секирин, и Д. Д. Новиков, "Подсистема оптимизации работы гибких производственных систем с использованием многокритериальных генетических алгоритмов", *Информатика і кібернетика*, № 3 (9), с. 24-28, 2017.
- [6] N. Nidhiry, and R. Saravanan, "Scheduling optimization of a flexible manufacturing system using a modified NSGA-II algorithm", *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 9, no. 3, pp. 139-151, 2014.
- [7] Т. В. Смірнова, Л. І. Поліщук, О. А. Смірнов, К. О. Буравченко, та А. О. Макевнін, "Дослідження хмарних технологій як сервісів", *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, т. 3, вип. 7, с. 43-62, 2020.
- [8] О. М. Верес, *Технології підтримання прийняття рішень*. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2013.
- [9] Worldwide Public Cloud Services Spending Will More Than Double by 2023. USA, Framingham, July 3, 2019. [Online]. Available: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS45340719>. Дата звернення: Серп. 27, 2020.
- [10] Alibaba Cloud EHPC Empowers New Manufacturing – SAIC Simulation Computing Cloud (SSCC), Sept. 13, 2018. [Online]. Available: https://www.alibabacloud.com/blog/alibaba-cloud-ehpc-empowers-new-manufacturing-saic-simulation-computing-cloud-sscc_593994. Дата звернення: Серп. 27, 2020.
- [11] Т. В. Смірнова, О. М. Дреєв, та О. А. Смірнов, "Експертна система оптимізації процесу відновлення та зміцнення поверхонь деталей типу "ВАЛ" електро-дуговим напиленням", *Системи управління, навігації та зв'язку*, вип. 2, с. 149-154, 2019.
- [12] ANSYS [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://znaimo.com.ua/ANSYS>. Дата звернення: Серп. 27, 2020.
- [13] CAE-система [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://sewiki.ru/CAE-система>. Дата звернення: Серп. 27, 2020.
- [14] О. П. Доренський, "Інформаційна модель вибору методології управління життєвим циклом програмного забезпечення інфотелекомунікаційних систем", у *Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології*. Київ, Україна: ДУТ, 2015, с. 114-116.
- [15] О. Р. Dorenskyi, "The methodology of evaluating the test cases quality for simple IT monoprojects software testing", на *Сучасні проблеми і досягнення в галузі ра-*

діотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій, Запоріжжя: ЗНТУ, 2016, с. 111-112.

References

- [1] T. V. Smirnova, E. K. Solovykh, O. A. Smirnov, and O. M. Dreev, "Construction of cloud information technologies for optimization of the technological process of restoration and strengthening of parts' surfaces", *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk*, vol. 1 (32), pp. 184-194, 2019. [in Ukrainian].
- [2] A. A. Smirnov, T. V. Smirnova, A. N. Dreev, and A. V. Dudan, "Optimization of the technological process of restoration and hardening of surfaces with given characteristics in the form of a cloud service", *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 3, pp. 50-61 2020. [in Russian].
- [3] K. I. Skrypka, and M. A. Zenkin, "Expert system of automated selection of methods for restoration of worked parts", *Visnyk ZhDTU*, № 1 (28), pp. 66-68, 2004. [in Ukrainian].
- [4] V. V. Limarenko, "Information system of decision support for automation of creation of technological processes of mechanical processing of details of high-precision equipment", Ph.D. thesis, Nat. Tech. Univ. "KhPI", Kharkiv, 2019. [in Ukrainian].
- [5] K. K. Babich, A. I. Sekirin, and D. D. Novikov, "Subsystem for optimizing the operation of flexible production systems using multi-criteria genetic algorithms", *Informatyka i kibernetyka*, no. 3 (9), pp. 24-28, 2017. [in Russian].
- [6] N. Nidhiry, and R. Saravanan, "Scheduling optimization of a flexible manufacturing system using a modified NSGA-II algorithm", *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 9, no. 3, pp. 139-151, 2014.
- [7] T. V. Smirnova, L. I. Polishchuk, O. A. Smirnov, K. O. Buravchenko, and A. O. Makevnyin, "Research of cloud technologies as services", *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, vol. 3, iss. 7, pp. 43-62, 2020. [in Ukrainian].
- [8] O. M. Veres, *Decision Support Technologies*. Lviv, Ukraine: Vyd-vo Lviv. politekhniki, 2013. [in Ukrainian]
- [9] Worldwide Public Cloud Services Spending Will More Than Double by 2023. USA, Framingham, July 3, 2019. [Online]. Available: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS45340719>. Accessed on: Aug. 27, 2020.
- [10] Alibaba Cloud EHPC Empowers New Manufacturing – SAIC Simulation Computing Cloud (SSCC), Sept. 13, 2018. [Online]. Available: https://www.alibabacloud.com/blog/alibaba-cloud-ehpc-empowers-new-manufacturing-saic-simulation-computing-cloud-sscc_593994. Accessed on: Aug. 27, 2020.
- [11] T. V. Smirnova, O. M. Dreev, and O. A. Smirnov, "Expert system for optimization of the process of restoration and strengthening of surfaces of parts of "VAL" type by electric arc spraying", *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, iss. 2, pp. 149-154, 2019. [in Ukrainian].
- [12] ANSYS. [Online]. Available: <http://znaimo.com.ua/ANSYS>. Accessed on: Aug. 27, 2020.
- [13] CAE-system. [Online]. Available: <http://sewiki.ru/CAE-system>. Accessed on: Aug. 27, 2020.
- [14] O. P. Dorenskyi, "Information model of the choice of methodology of life cycle management of infotelecommunication systems software", in *Modern information-telecommunication technologies*. Kyiv, Ukraine: DUT, 2015, pp. 114-116. [in Ukrainian].
- [15] O. P. Dorenskyi, "The methodology of evaluating the test cases quality for simple IT monoprojects software testing", in *Modern problems and achievements in the field of radio engineering, telecommunications and information technologies*, Zaporizhzhya: ZNTU, 2016, p. 111-112.

T. V. Smirnova¹, *Ph.D., associate professor,*
R. M. Mynailenko¹, *Ph.D., associate professor,*
O. P. Dorenskyi¹, *Ph.D.,*
S. V. Sysoienko², *Ph.D.,*

S. A. Smirnov¹, *Ph.D., associate professor*

¹Central Ukrainian National Technical University
Universytetskyi ave. 8, Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine
e-mail: it-kntu@ukr.net

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

CLOUD AUTOMATED SYSTEM OF INTELLECTUAL SUPPORT OF DECISION-MAKING FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES

Today there is a very important problem of optimization of technological processes, for example, the technological process of restoring and strengthening the surfaces of parts. This problem can be solved by using modern information technology. This will optimize technological processes effectively. At the same time, Internet technologies and cloud services are now being actively implemented and used in production. Therefore, the expediency of creating and using cloud automated systems is obvious.

The article is devoted to the cloud automated system of intellectual support of decision-making for technological processes. The basis of the system is the implementation of the method of optimization of the technological process of restoration and strengthening of the surface of steel shafts. The research considers the abstract technological process, the properties of the abstract technological process, methods of transition to a specific technological process, the information model of the technological process, methods of obtaining an information model, abstract expert systems. The formalization of a subset of abstract expert systems of technological process optimization, the formalization of recommendation systems to ensure the optimization of the technological process chain as a superstructure of the expert system over the expert systems of individual technological processes is proposed. Also a cloud automated system as a service (SaaS) for obtaining the surfaces of ST45 steel shafts with specified characteristics based on a combination of several technological processes is described. To achieve the goal of the study, the types and scope of expert and recommendation systems to ensure the optimization of the chain of technological processes are identified. Tasks of construction of information technologies of optimization of combined technological processes of restoration and strengthening of surfaces of details will be set by the decision of current task of realization of the cloud recommendation system as a service for receiving the surfaces of shafts from steel with the set characteristics on the basis of a combination of several technological processes.

The cloud automated system of intellectual decision support of technological processes implements the method of optimization of technological process of restoration and strengthening of a surface of shafts from steel, provides a solution of a problem of construction of the optimized chain of technological process of restoration and strengthening of surfaces of shafts.

Keywords: *cloud service, expert system, surface of details, optimization, electric arc spraying, recommendation system.*

УДК 004:316.4:005.334

[0000-0002-0969-2248] **О. Г. Васильченко**¹, к.т.н., профессор,

e-mail: oleh.vasylchenkov@khpi.edu.ua

[0000-0003-0214-7383] **Н. А. Евсина**¹, к.т.н., доцент,

e-mail: newquasar838@gmail.com

[0000-0002-0490-4061] **Д. В. Сальников**¹, ассистент,

e-mail: dmytro.salnikov@khpi.edu.ua

[0000-0002-2558-4984] **П. В. Буслов**², аспирант

e-mail: p.buslov@ukr.net

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина²Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Науки, 14, г. Харьков, 61000, Украина

РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРА С ПОСТФИЛЬТРАЦИОННЫМ ПРИНЯТИЕМ РЕШЕНИЯ НА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ АРХИТЕКТУРАХ С ВЕКТОРНЫМ РАСШИРЕНИЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДЕБНОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

Приводятся результаты исследований средств обеспечения показателей эффективности судебной экспертизы изображений, в том числе и цифровых. Проводится анализ основных задач, стоящих при экспертизе изображений, и методы их решений. Основной проблемой таких исследований является недостаточная автоматизация процесса обработки изображений при экспертизе. Объектом исследования является процесс фильтрации изображений, предметом исследований – фильтры, которые используются при обработке изображений. Цель статьи – построение быстродействующей реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения на современных процессорных архитектурах. Приведены результаты анализа возможности использования векторных инструкций современных процессорных архитектур, рассмотрены алгоритмы векторизации сортировки для эффективной реализации подпрограммы поиска медианного значения внутри текущего и проведено моделирование фильтра с постфильтрационным принятием решения с целью выяснения пригодности для использования в задачах реального времени. В результате проведенных исследований впервые предложен метод векторизованной реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения, пригодный для процессоров с набором команд SIMD ARM NEON, Intel SSE или AVX; рассмотрено использование сортирующих сетей в качестве алгоритма поиска медианы для процессоров с векторным расширением; впервые построена реализация фильтра описанным методом для процессора ARM Cortex-A9 в составе SOC Intel Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK; проведено моделирование работы фильтра на ARM Cortex-A9. Скорость обработки изображения 512x512 пикселей составила более 500 кадров в секунду. Скорость обработки полутонных изображений FullHD – более 60 кадров в секунду.

Ключевые слова: автоматизация процесса обработки изображений, фильтрация изображений, постфильтрационное принятие решения, векторизованная реализация фильтра, сортирующие сети, моделирование фильтров изображений.

Введение. Объектами судебной фототехнической экспертизы являются фотоснимки, а также технические средства и материалы, применяемые для их изготовления. Фотографические снимки – основной объект судебной фототехнической экспертизы, они чаще всего поступают на исследование в судебно-

экспертные учреждения; технические средства и материалы, применяемые для изготовления фотоснимков, исследуются намного реже, нежели сами фотографические изображения. Однако существующие сейчас методики по исследованию фотоизображений, полученных с помощью аналоговой камеры, ма-

лоприменимы к исследованию цифровых фотографических изображений. Поскольку в большинстве случаев на экспертизу приходят фотоизображения, полученные именно с помощью цифровых фотокамер, то существует необходимость описания процесса ряда действий, которые следует совершать эксперту при исследовании самого распространенного на сегодняшний день объекта судебной фототехнической экспертизы – цифрового фотографического изображения. При необходимости проведения судебной фототехнической экспертизы следует иметь четкое представление о том, какие задачи могут решаться этим видом экспертиз в отношении данного объекта. Круг современных задач представляется следующим образом [1]:

- идентификация оригинала (негатива, позитива, фотосенсора) по фотоотпечатку;
- идентификация предметов, помещений и участков местности, изображенных на фотоснимках;
- определение условий и способа изготовления фотоснимка, включая установление способа получения (печати) цифрового фотоснимка, распознавание проекционного или контактного (сканированием) способов получения изображений, определение факта повторного репродуцирования;
- установление факта ретуши (негативной, позитивной), в том числе распознавание основных приемов цифровой ретуши по отображениям на фотоснимке;
- установление факта составления изображения из двух или более самостоятельных изображений (фотомонтажа);
- распознавание приемов аналогового и цифрового фотомонтажа изображений по фотоснимкам;
- определение размеров предметов, изображенных на фотоснимке, и расстояний между предметами, в том числе с использованием специализированных компьютерных программных средств;
- восстановление изображений на фотоснимках, в том числе с использованием цифровых методов восстановления контраста и цветности;
- определение времени и иной служебной информации по метаданным, дополняющим графический файл с изображением.

Экспертное исследование базируется на общих методических положениях и подходах и состоит из четырех стадий: подготовительной, аналитической, сравнительной, оценочной. Эти стадии экспертного исследования охватывают полный круг задач, которые могут быть поставлены перед экспертом. В зависимости от вида решаемой задачи – идентификационная или диагностическая – будет варьироваться количество этапов. Некоторые описанные ниже этапы исследования характерны только для решения определенного вида задач.

Аналитическая стадия. На этой стадии необходимо всесторонне изучить представленные на экспертизу фотоизображения, выявить наибольшее количество признаков. Эта стадия важна как для решения идентификационных задач, так и для решения диагностических. Для наглядности можно рассмотреть эту стадию на примере решения такой диагностической задачи, как определение условий и способа изготовления фотоснимка, включая установление способа получения (печати) цифрового фотоснимка, распознавание проекционного или контактного (сканированием) способов получения изображений, определение факта повторного репродуцирования.

Способы создания изображения. При фотографировании цифровым фотоаппаратом изображение проекции объектов создается путем записи в файл состояния элементов ПЗС-матрицы фотоаппарата. Различают бытовые (дешевые) модели цифровых фотоаппаратов и профессиональные модели. Для бытовых моделей характерно невысокое качество получаемых изображений, поэтому их применение для создания качественного фотоснимка ограничено и нежелательно ввиду низкого разрешения и значительных трудозатрат на ретуширование. Профессиональные модели цифровых фотоаппаратов позволяют получить высококачественное изображение, в том числе и с различными визуальными эффектами (используются объективы и насадки к ним разных типов). Могут создаваться изображения из специальных библиотек («фотоклипартов», созданных профессиональной съемкой) или Интернет-ресурсов (как правило, созданы путем значительного снижения разрешения изображений, созданных профессиональной съемкой).

Криміналістическіє признакі:

- дискретні (ступенчаті) краї і контури елементів зображень (бытові моделі і зображення із Інтернет-ресурсів);
- непропрацьованість малих деталей (бытові моделі і зображення із Інтернет-ресурсів);
- непропрацьованість рухується об'єктів (бытові моделі);
- непропрацьованість елементів заднього або переднього плану із-за фокусного відстані;
- різкі скачки кольору в градієнтах (бытові моделі);
- відсутність тонких ліній;
- зміщення кольорової моделі зображення в сторону одного відтінку (бытові моделі);
- сліди напівпрозорих потовжених забруднень об'єктиву;
- дефекти об'єктиву, які можуть відобразитися в серії зображень;
- наявність сторонніх поліхроматических шумів в тінях («забурм'яненість», подібна на завади при поганому прийомі телевізійного каналу) зображення (бытові моделі, але може зустрічатися і в професійних);
- наявність сторонніх поліхроматических шумів на кольорових границях об'єктів;
- наявність дисторсії (в бытових, рідше в професійних).

При скануванні надрукованих раніше фотографіческіх зображень зображення поверхності скануємого об'єкту створюється шляхом фіксації станів елементів ПЗС-матриці сканера. Для сканерів бытових моделей характерно низьке якість отримуваних зображень, тому їх застосування для створення якісної електронної копії фотографії дуже обмежено і небажано ввиду низького розрешення і значескіх витрат на ретушування муару. Професійні моделі сканерів дозволяють отримувати умовно якісне зображення.

Криміналістическіє признакі:

- наявність муару, викликане накладенням періодическіх структур растра, особливо в жовтому, малиновому, рідше в блау каналі;
- складаючі із нерівномірних точок краї і контури елементів зображень;

- надлишок контрастних і непропрацьованих в світлих і темних полутонах («середні») зображення;
- відсутність тонких ліній;
- значескіє сліди ретуші в зображеннях;
- сліда (професійні моделі) або сильно (бытові моделі) розмиті для видалення муару зображення;
- контрастні кольорові переходи;
- знижена кольорова насиченість зображення;
- відобразившіся признакі технології друку;
- дискретні краї і контури елементів зображень;
- непропрацьованість малих деталей;
- відсутність непропрацьованості елементів заднього або переднього плану;
- сліди напівпрозорих потовжених забруднень і царапин на скляній робочій поверхності сканера;
- дефекти сканера, які можуть відобразитися в серії зображень;
- непропрацьованість фрагментів зображення із-за неплотного прилягання поверхності скануємого об'єкту до скляної робочій поверхності сканера;
- непропрацьованість тіней зображення, викликані неправильною налаштуванням «точки чорного»;
- наявність сторонніх поліхроматических шумів в світлих (умовно білих) областях зображення, викликані неправильною налаштуванням «точки білого» (фактура паперу);
- відсутність дисторсії [2].

Зображення, отримані шляхом комп'ютерного 3D-моделювання, створені вручну в векторних графіческіх редакторах, мають рядом відмінних признаків:

- відсутність дисторсії в горизонтальних і вертикальних елементах зображення;
- ідеальне (математическе) градієнтне розподілення тіней і кольорових переходів (градієнтів) елементів зображення;
- дискретна (ступенчатая) структура кольорових переходів (градієнтів) елементів зображень;
- математическі «точні» границі і контури елементів зображення;

- математически «точные» границы и контуры выворотов;
- наличие тонких (толщиной менее 1 пт) линий;
- наличие элементов (контуры, тексты), выполненных запечаткой черным поверх основного цвета («оверпринт»);
- наличие перспективных (математически точных) искажений в горизонтальных и вертикальных элементах;
- цветовые ступенчатые градиенты теней объектов.

При выявлении у фотоснимков определенного комплекса признаков можно говорить о создании фотоизображения одним из перечисленных выше способов.

Сравнительное исследование. Данная стадия характерна для экспертного исследования при решении идентификационных задач:

- идентификация оригинала (негатива, позитива, фотосенсора) по фотоотпечатку;
- идентификация предметов, помещений и участков местности, изображенных на фотоснимках;
- установление факта составления изображения из двух или более самостоятельных изображений (фотомонтажа) [3-6].

Подводя итог вышесказанному, необходимо подчеркнуть, что современное состояние судебной фототехнической экспертизы подверглось качественным изменениям в связи с появлением целого ряда цифровых объектов, полученных с использованием цифровых фототехнологий. На основе этого работа по дальнейшему совершенствованию методики судебной фототехнической экспертизы представляется актуальной и важной [7].

В то же время любая работа по обработке изображений требует соответствующего аппаратно-программного комплекса, который должен включать в свой состав соответствующие фильтры, которые позволяют обеспечивать необходимые требования к показателям качества результатов экспертиз.

Целью исследования является построение быстродействующей реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения на современных процессорных архитектурах.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- провести анализ возможности использования векторных инструкций современных процессорных архитектур.
- для эффективной реализации подпрограммы поиска медианного значения внутри текущего рассмотреть алгоритмы векторизации сортировки
- провести моделирование фильтра с постфильтрационным принятием решения с целью выяснения пригодности для использования в задачах реального времени

Изложение основного материала. На данный момент абсолютное большинство устройств автоматизированной обработки изображений использует в качестве датчиков CCD (charge-coupled device) или CMOS (complementary metal oxide semiconductor) матрицы, которые подвержены зашумлению в результате нагрева, фотонного шума, КТШ шума и пр. [8] Таким образом, алгоритмы удаления шума с изображений так или иначе используются в любом современном устройстве обработки изображений.

Широкое применение в качестве алгоритма поиска пикселей, подверженных воздействию импульсного шума, получил медианный фильтр. Недостатком этого фильтра считают существенное влияние на пиксели, не подверженные зашумлению. Таким образом, выходное изображение теряет большую часть информации, что может быть критично для последующих алгоритмов, использующих данные после фильтрации. На данный момент медианный фильтр используется в качестве составной части в большинстве современных адаптивных фильтров [9-11], имеющих специализированный алгоритм для определения зашумленных участков изображения.

Как правило, реализация детекторов шума является вычислительно сложной, а аппаратные затраты на реализацию алгоритма на современных микропроцессорах и программируемых интегральных схемах могут существенно ограничивать применение таких алгоритмов в приложениях, требующих обработки в реальном времени.

Результаты исследований. Фильтр с постфильтрационным принятием решения [12] является компромиссным с точки зрения соотношения качества фильтрации и аппаратных затрат. Он использует входное и медианное значение окна для принятия решения

о зашумленности, благодаря чему снижается размытие выходного изображения.

Алгоритм фильтра можно представить следующим уравнением:

$$Y(i, j) = \begin{cases} m_{i,j}, & \text{если } |X(i, j) - m_{i,j}| > th \\ X(i, j), & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

где $X(i, j)$ – исходное значение фильтруемого пикселя, $Y(i, j)$ – выходное значение фильтруемого пикселя, $m_{i,j}$ – медианное значение текущего окна, th – пороговое значение.

Как видно из уравнения (1), в фильтре нет ресурсоемких вычислений, что, по мнению авторов, способствует снижению аппаратных затрат на реализацию.

Предложенный фильтр [13] может быть эффективно реализован на большинстве современных процессоров при помощи векторных SIMD (single instruction multiple data) инструкций.

Одними из наиболее распространённых процессоров с таким набором являются процессоры архитектуры x86 с расширением SSE и/или AVX, а также группа процессоров архитектуры ARM с расширенным набором команд NEON. Эти процессоры имеют набор векторных регистров, над которыми можно осуществлять математические операции. Таким образом, ускорение работы фильтра осуществляется за счет сокращения числа обращений к памяти, а также выполнения нескольких, например 16 в случае 8-битных данных и процессора ARM, математических операций за один такт процессора.

Моделирование проводилось на аппаратной платформе terasIC DE10-Nano. На данном модуле установлена система на кристалле Intel Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK, в состав которой входит двухъядерный процессор ARM Cortex-A9 с расширением NEON.

Программирование фильтра выполнялось на языках C/C++ при помощи специализированных «intrinsic» функций, которые транслируются компилятором в необходимые инструкции процессора, минуя большинство алгоритмов автоматической оптимизации, применяемой компилятором.

Изображение было представлено в памяти процессора в виде последовательного набора 8-ми битных данных, которые можно представить в виде двумерного массива. Каждая ячейка памяти представляет собой яркость определенного пикселя.

Процесс нахождения медианы для окна размера 3x3 представлен на рисунке 1.

0	1	2	3	4	5	6
10	11	12	13	14	15	16
20	21	22	23	24	25	26
30	31	32	33	34	35	36

Рисунок 1 – Процесс медианной фильтрации изображения с окном 3x3 пикселя

Фильтрация представляет собой последовательное прохождение окна по всему изображению с шагом 1 пиксель. Внутри каждого окна, используя значения яркости 9 пикселей, находится медианное значение. Отклонение по модулю полученной величины от исходного значения сравнивается для получения решения о необходимости модификации центрального пикселя окна.

Из рисунка выше видно, что для нахождения медианного значения необходимо загрузить из памяти значения:

для шага 1 – 0, 1, 2, 10, 11, 12, 20, 21, 22;

для шага 2 – 1, 2, 3, 11, 12, 13, 21, 22, 23;

для шага 3 – 2, 3, 4, 12, 13, 14, 22, 23, 24;

для шага 4 – 3, 4, 5, 13, 14, 15, 23, 24, 25.

Таким образом, для загрузки в регистр процессора значений из памяти, можно использовать векторную операцию (инструкция VLD1_8). Тогда в векторном регистре процессора ARM NEON получим 16 последовательных входных значений.

Обсуждение результатов исследований.

Для реализации ускоренной процедуры нахождения медианы в обработке сигналов на ПЛИС часто используют сортирующие сети [13]. Составной частью таких сетей является блок сравнения-обмена изображений на рисунке 2, а. Также данный механизм может быть применен и для процессоров с векторными расширениями, пример которого представлен в [14].

Отметим, что для нахождения медианы не нужно находить полностью отсортированную последовательность. В работе была использована сортирующая сеть Паэта [15] следующей структуры:

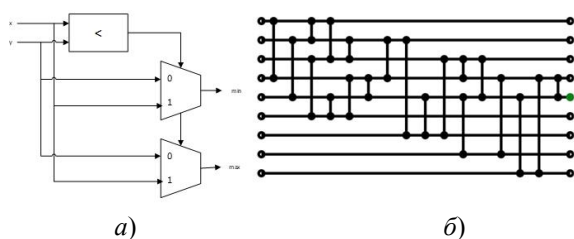


Рисунок 2 – Элемент сравнения-обмена (а) и структура (б) сортирующей сети Паэта для 9 элементов

Для нахождения медианного значения данным методом необходимо 20 элементов сравнения-обмена.

В свою очередь, элемент сравнения-обмена был реализован при помощи 3 инст-

рукций NEON: VMOV_U8, VMIN_U8 и VMAX_U8. Пример такой операции изображен на рисунке 3.

Блок сравнения с пороговым значением был реализован при помощи инструкций VABD_U8 (нахождение разности по модулю), VCGE_U8 (сравнение больше или равен) и VBSL (выбор по маске).

Сохранение полученного выходного значения может быть выполнено при помощи векторной инструкции VST1_8.

В результате моделирования фильтрации изображения размером 512x512 пикселей на SOC с процессором ARM Cortex-A9 были получены данные, представленные на рисунке 4: неоптимизированная версия фильтра (Our std::sort) выполнялась 85 948 мкс, неоптимизированная с собственной реализацией сортировки (Our custom sort) – 50 007 мкс, оптимизированная методом, описанным выше, (Our NEON) – 1974 мкс. Таким образом, описанный метод реализации фильтра позволяет получить ускорение в 43,54 раза.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Q0 U8	20	94	192	1	15	189	207	82	163	189	208	32	143	55
Q1 U8	146	87	206	232	210	88	103	174	222	60	141	86	245	219

VMOV U8	20	94	192	1	15	189	207	82	163	189	208	32	143	55
VMIN U8	20	87	192	1	15	88	103	82	163	60	141	32	143	55
VMAX U8	146	94	206	232	210	189	207	174	222	189	208	86	245	219

Рисунок 3 – Реализация блока сравнения-обмена при помощи SIMD инструкций ARM NEON

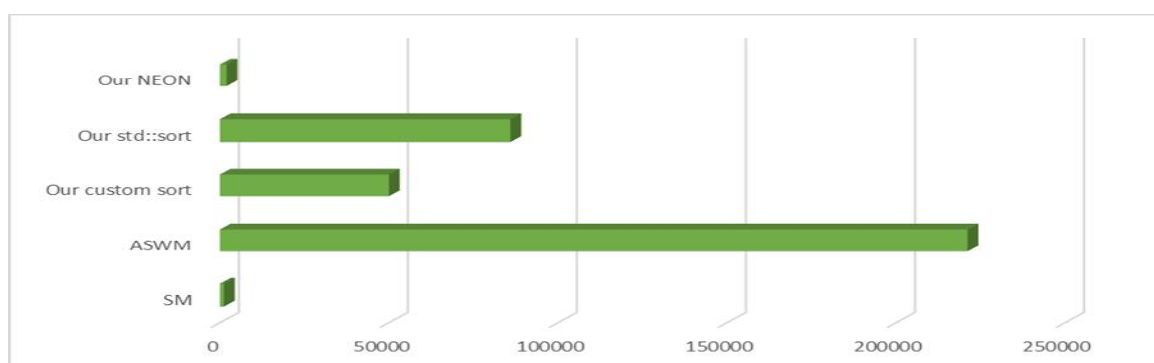


Рисунок 4 – Сравнение скорости работы медианного (SM), адаптивного переключающегося (ASWM) фильтра и оптимизированной версии предложенного фильтра

Следует отметить, что существенное влияние на быстродействие имеет алгоритм нахождения медианы. Так, использование небиблиотечного алгоритма сортировки

позволяет ускорить фильтр практически в два раза.

Быстродействие медианного фильтра (SM) сопоставимо со скоростью фильтра

с постфильтрационным принятием решения – 1221 мкс и 1986 мкс соответственно.

В дальнейших исследованиях предлагается целесообразным оптимизировать полученный код путем внесения улучшений для повторного использования загруженных в регистры значений, а также параллельного выполнения на нескольких ядрах процессора.

Заключение. В данной работе был проведен анализ методик проведения судебных экспертиз изображений, определены факторы, которые оказывают максимальное влияние на достоверность проведения соответствующих экспертных оценок, и пути повышения их качества. В работе проведен анализ возможности автоматизации экспертного процесса для повышения его достоверности.

Был проведен анализ возможности построения быстродействующей реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения на современных процессорных архитектурах.

В результате проведенных исследований:

- впервые предложен метод векторизованной реализации фильтра с постфильтрационным принятием решения, пригодный для процессоров с набором команд SIMD ARM NEON, Intel SSE или AVX;
- рассмотрено использование сортирующих сетей в качестве алгоритма поиска медианы для процессоров с векторным расширением;
- впервые построена реализация фильтра описанным методом для процессора ARM Cortex-A9 в составе SOC Intel Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK;
- проведено моделирование работы фильтра на ARM Cortex-A9. Скорость обработки изображения 512x512 пикселей составила более 500 кадров в секунду. Скорость обработки полутоновых изображений FullHD – более 60 кадров.

В дальнейших исследованиях предлагается целесообразным оптимизировать полученный код путем внесения улучшений для повторного использования загруженных в регистры значений, а также параллельного выполнения на нескольких ядрах процессора.

Список использованных источников

- [1] S. M. Bobrytskyi, and S. V. Chernyi, "Methodological aspects of complex re-

search with the purpose of revealing signs of mounting in digital photography", *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, iss. 10, pp. 633-639, 2010.

- [2] Ye. V. Tymko et al., "Research method development of digital photographs and technical means of their production", Rep. on R&D: Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise, 121 p., 2013.
- [3] J. Fan, H. Cao, and A. C. Kot, "Estimating EXIF parameters based on noise features for image manipulation detection", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 8, iss. 4, pp. 602-608, 2013.
- [4] R. Minhas, A. Mohammed, and Q. Wu, "An efficient algorithm for focus measure computation in constant time", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, no. 22, pp. 152-156, 2012.
- [5] R. Minhas, A. Mohammed, Q. Wu, and M. Sid-Ahmed, "3D shape from focus and depth map computation using steerable filter", in *Int. Conf. Image Analysis and Recognition (ICIAR)*, 2009, pp. 573-583.
- [6] S. Pertuz et al. "Analysis of focus measure operators for shape-from-focus", *Pattern Recognition*, no. 46 (5), pp. 1415-1432, 2013. DOI: 10.1016/j.patcog.2012.11.011
- [7] O. Kliuiev, O. Uhrovetskyi, E. Simakova-Yefremian, M. Mozhaiev, and O. Mozhaiev, "Method of forensic research on image for finding touch up on the basis of noise entropy", in *3rd Int. Conf. on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, 2019, pp. 76-79.
- [8] А. М. Овчинников, А. А. Ильин, и М. Ю. Овчинников, "Принцип работы и устройство активно-пиксельных датчиков", Москва, 30 с., препринт Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша Рос. акад. наук; № 85, 2003.
- [9] Smaïl Akkoul, "A new adaptive switching median filter", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, pp. 587-590, 2010.
- [10] Wei Zhou Zhao, Hui Li Jing, Bao Zhen Yang, and Hui Zhang, "An improved filtering algorithm for impulse noise with high density based on edge information preservation", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 548-549, p. 1068, 2014.
- [11] Zhe Zhang, Deqiang Han, Jean Dezert, and Yi Yang, "A new adaptive switching median

- filter for impulse noise reduction with pre-detection based on evidential reasoning", *Signal Processing*, vol. 147, pp. 173-189, 2018. ISSN 0165-1684.
- [12] Д. В. Сальников, и О. Г. Васильченков, "Модифицированный медианный фильтр с пост-фильтрационным принятием решения", *Системи управління, навігації та зв'язку*, вип. 1 (53), с. 158-161, 2019.
- [13] M. Ricco, L. Mathe, and R. Teodorescu, "FPGA-based implementation of sorting networks in MMC applications," in *18th Europ. Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, pp. 1-10, 2016.
DOI: 10.1109/EPE.2016.7695280
- [14] S. Brankovic, A. Markovic, D. Simic, and A. Rikalo, "Improving performance of sorting small arrays on MIPS CPUs using bitonic sort and SIMD instructions," in *27th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, pp. 1-4, 2019.
DOI: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971325
- [15] A. W. Paeth, "Median finding on a 3-by-3 grid", in *Graphic Gems*, A. S. Glassner, Ed, Academic Press, 1993, pp. 171-175.
- ter", in *Int. Conf. Image Analysis and Recognition (ICIAR)*, 2009, pp. 573-583.
- [6] S. Pertuz et al. "Analysis of focus measure operators for shape-from-focus", *Pattern Recognition*, no. 46 (5), pp. 1415-1432, 2013.
DOI: 10.1016/j.patcog.2012.11.011
- [7] O. Kliuiev, O. Uhrovetskyi, E. Simakova-Yefremian, M. Mozhaiev, and O. Mozhaiev, "Method of forensic research on image for finding touch up on the basis of noise entropy", in *3rd Int. Conf. on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, 2019, pp. 76-79.
- [8] A. M. Ovchinnikov, A. A. Ilyin, and M. Yu. Ovchinnikov, "The principle of operation and the arrangement of active-pixel sensors", Moscow, 30 p., preprint Institute of Applied Mathematics named after M. V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences; no. 85, 2003. [in Russian].
- [9] Smaïl Akkoul, "A new adaptive switching median filter", *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, pp. 587-590, 2010.
- [10] Wei Zhou Zhao, Hui Li Jing, Bao Zhen Yang, and Hui Zhang, "An improved filtering algorithm for impulse noise with high density based on edge information preservation", *Applied Mechanics and Materials*, vols. 548-549, p. 1068, 2014.
- [11] Zhe Zhang, Deqiang Han, Jean Dezert, and Yi Yang, "A new adaptive switching median filter for impulse noise reduction with pre-detection based on evidential reasoning", *Signal Processing*, vol. 147, pp. 173-189, 2018. ISSN 0165-1684.
- [12] D. V. Salnikov, and O. G. Vasilchenkov, "Modified median filter with post-filtration decision-making", *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, iss. 1 (53), pp. 158-161, 2019. [in Russian].
- [13] M. Ricco, L. Mathe, and R. Teodorescu, "FPGA-based implementation of sorting networks in MMC applications," in *18th Europ. Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, pp. 1-10, 2016.
DOI: 10.1109/EPE.2016.7695280
- [14] S. Brankovic, A. Markovic, D. Simic, and A. Rikalo, "Improving performance of sorting small arrays on MIPS CPUs using bitonic sort and SIMD instructions," in *27th*

References

- [1] S. M. Bobrytskyi, and S. V. Chernyi, "Methodological aspects of complex research with the purpose of revealing signs of mounting in digital photography", *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, iss. 10, pp. 633-639, 2010.
- [2] Ye. V. Tymko et al., "Research method development of digital photographs and technical means of their production", Rep. on R&D: Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise, 121 p., 2013.
- [3] J. Fan, H. Cao, and A. C. Kot, "Estimating EXIF parameters based on noise features for image manipulation detection", *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 8, iss. 4, pp. 602-608, 2013.
- [4] R. Minhas, A. Mohammed, and Q. Wu, "An efficient algorithm for focus measure computation in constant time", *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, no. 22, pp. 152-156, 2012.
- [5] R. Minhas, A. Mohammed, Q. Wu, and M. Sid-Ahmed, "3D shape from focus and depth map computation using steerable fil-

Telecommunications Forum (TELFOR), [15] A. W. Paeth, "Median finding on a 3-by-3 grid", in *Graphic Gems*, A. S. Glassner, Ed, Academic Press, 1993, pp. 171-175.
DOI: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971325

O. H. Vasylchenkov¹, *PhD, professor*,
e-mail: oleh.vasylchenkov@khpi.edu.ua
N. O. Yevsina¹, *PhD, associate professor*,
e-mail: newquasar838@gmail.com
D. V. Salnikov¹, *assistant*,
e-mail: dmytro.salnikov@khpi.edu.ua
P. V. Buslov², *postgraduate*
e-mail: p.buslov@ukr.net

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

Kyrpychova st., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine

²Kharkiv National University of Radio Electronics,
Nauky Ave., 14, Kharkiv, 61166, Ukraine

IMPLEMENTATION OF A FILTER WITH POST-FILTERING DECISION-MAKING ON MICROPROCESSOR ARCHITECTURES WITH VECTOR EXTENSION TO ENSURE PERFORMANCE INDICATORS OF FORENSIC EXAMINATION

The study results of the means of maintenance of efficiency indicators of image forensic examination, including digital images, are shown. The analysis of the main tasks faced by image examination and methods of their solution is carried out. The main problem of such studies consists in insufficient automation of image processing process during the examination. The object of the study is the process of image filtering, the subject of the study is filters that are used in image processing. As a result of the analysis of implementations of noise detectors it is established that they are computationally complex. And the hardware costs of implementing the algorithm on modern microprocessors and programmable integrated circuits can significantly limit the use of such algorithms in applications that require real-time processing. The purpose of the article is to build a high-speed implementation of the filter with post-filtering decision-making on modern processor architectures. The results of the analysis of the possibility of using vector instructions of modern processor architectures are presented, sorting vectorization algorithms for effective implementation of the search subroutine for the median value within the current one are considered, and the filter with post-filtering decision-making to determine suitability for real-time tasks is modelled. As a result of the conducted studies the method of vectorized implementations of the filter with post-filtering decision-making suitable for processors with a set of SIMD ARM NEON, Intel SSE or AVX commands is proposed for the first time; the use of sorting networks as a median search algorithm for processors with vector extension is considered; for the first time the implementation of the filter by the described method for the ARM Cortex-A9 processor as a part of Intel SOC Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK is constructed; the filter operation is modelled on ARM Cortex-A9. The processing speed of the 512x512 pixel image has been more than 500 frames per second. The FullHD halftone image processing speed has been more than 60 frames.

Keywords: automation of image processing process, image filtering, post-filtering decision-making, sorting networks, image filter modelling.

О. Г. Васильченко¹, к.т.н., професор,
e-mail: oleg.vasylchenkov@khpi.edu.ua

Н. О. Євсіна¹, к.т.н., доцент,
e-mail: newquasar838@gmail.com

Д. В. Сальников¹, асистент
e-mail: dmytro.salnikov@khpi.edu.ua

П. В. Буслов², аспірант
e-mail: p.buslov@ukr.net

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

²Харківський національний університет радіоелектроніки,
просп. Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ ФІЛЬТРА З ПОСТФІЛЬТРАЦІЙНИМ ПРИЙНЯТТЯМ РІШЕННЯ НА МІКРОПРОЦЕСОРНИХ АРХІТЕКТУРАХ З ВЕКТОРНИМ РОЗШИРЕННЯМ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДОВОЇ ЕКСПЕРТИЗИ

Наводяться результати досліджень засобів забезпечення показників ефективності судової експертизи зображень, у тому числі й цифрових. Проводиться аналіз основних завдань, що стоять при експертизі зображень, і методи їх розв'язання. Основною проблемою таких досліджень є недостатня автоматизація процесу обробки зображень при експертизі. Об'єктом дослідження є процес фільтрації зображень, предметом досліджень – фільтри, які використовуються при обробці зображень. В результаті аналізу реалізацій детекторів шуму встановлено, що вони є обчислювально складними. Апаратні витрати на реалізацію алгоритму на сучасних мікропроцесорах і програмованих інтегральних схемах можуть істотно обмежувати застосування таких алгоритмів у додатках, що вимагають обробки в реальному часі. Метою статті є побудова швидкодіючої реалізації фільтра з постфільтраційним прийняттям рішення на сучасних процесорних архітектурах. Наведено результати аналізу можливості використання векторних інструкцій сучасних процесорних архітектур, розглянуто алгоритми векторизації сортування для ефективної реалізації підпрограми пошуку медіанного значення всередині поточного і проведено моделювання фільтра з постфільтраційним прийняттям рішення з метою з'ясування придатності для використання в задачах реального часу. В результаті проведених досліджень вперше запропоновано метод векторизованої реалізації фільтра з постфільтраційним прийняттям рішення, придатний для процесорів з набором команд SIMD ARM NEON, Intel SSE або AVX; розглянуто використання сортувальних мереж як алгоритму пошуку медіани для процесорів з векторним розширенням; вперше побудовано реалізацію фільтра описаним методом для процесора ARM Cortex-A9 в складі SOC Intel Cyclone® V SE 5CSEBA6U23I7NDK; проведено моделювання роботи фільтра на ARM Cortex-A9. Швидкість обробки зображення 512x512 пікселів становила понад 500 кадрів на секунду. Швидкість обробки напівтонових зображень FullHD – понад 60 кадрів на секунду.

Ключові слова: автоматизація процесу обробки зображень, фільтрація зображень, постфільтраційне прийняття рішення, сортувальні мережі, моделювання фільтрів зображень.

УДК 396.42:004.7 (045)

[0000-0002-3268-342X] **П. С. Усік**¹, аспірант,

e-mail: mr.usik@ukr.net

[00000-0001-9543-874X] **О. А. Смірнов**¹, д.т.н., професор,

e-mail: dr.SmirnovOA@gmail.com

[0000-0003-2007-9943] **І. В. Миронець**², к.т.н., доцент,

e-mail: i.myronets@chdtu.edu.ua

[0000-0001-6195-7533] **К. О. Буравченко**¹, к.т.н.,

e-mail: buravchenkok@gmail.com

[0000-0002-4498-0093] **Н. М. Якименко**¹, к.ф.-м.н., доцент,

доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення

e-mail: yakimenko_n_m@ukr.net

¹Центральноукраїнський національний технічний університет
просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна²Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЕНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ОПЕРАТОРІВ СТІЛЬНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

За аналізом якості обслуговування абонентів у реалізованих проектах мереж 5G в світі встановлено, що заявлені вимоги до мереж п'ятого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, а фактична якість обслуговування абонентів перебуває на не досить високому рівні, що свідчить про низьку ефективність наявних методів керування мережами стільникового оператора та розподіленої обробки даних у них. Тому було розроблено метод оптимізації розміщення масштабованих послуг на розподілених обчислювальних ресурсах мережі стільникового оператора. Також було проведено імітаційне моделювання для оцінювання ефективності розробленого у роботі методу, результати якого підтвердили його ефективність.

Ключові слова: стільниковий зв'язок, передача даних, розподілені обчислення, мережеві канали, генетичний алгоритм.

Вступ. Дві основні тенденції спонукають індустрію безпроводного зв'язку розвивати мережі стільникового зв'язку п'ятого покоління: стрімке збільшення попиту на безпроводні широкосмугові послуги, які потребують значно більших швидкостей передачі даних, і мережі значно більшої ємності, які можуть надавати відео- й інші ресурсоємні послуги та послуги Інтернету речей (IoT), що спонукають до необхідності масового підключення пристроїв, а також до необхідності наднадійного зв'язку з наднизькою затримкою [1, 2].

Можна визначити низку різних сфер застосування, де будуть використовуватися ці мережі: сюди входять V2X комунікація (комунікація транспортних засобів між собою та з іншими об'єктами інфраструктури); промислова автоматизація та комунальні програми; безпроводні медичні послуги; споживчі та умови роботи локальної мережі розподілених мобільних пристроїв [3-6].

З метою вирішення цих проблем, пов'язаних з хмарами, нещодавні дослідження

представили аналогічну концепцію, що розширює можливості хмарних розрахунків, які ближчі до кінцевих користувачів (тобто на межі мережі) – Mobile Edge Computing or Multi-access Edge Computing (MEC) [7]. MEC надає новий рівень розподілених обчислювальних вузлів між пристроями кінцевих користувачів і хмарними центрами обробки даних. Тому додатки, що працюють на MEC, можуть виконувати дії, які близькі до їх користувачів, перед підключенням до хмари. Це значно знижує навантаження на мережу, забезпечує більш оперативну відповідь і дає змогу отримувати локальну контекстну інформацію найбільш ефективним способом [8-13].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнім часом з'явилося багато наукових праць вітчизняних та, здебільшого, закордонних дослідників (Климаш М. М., Лемешко О. В., Одарченко Р. С., Xiang Sun, Nirwan Ansari, Robert Schober, Albert Banches, Tuyen X. Tran, Luca Foschini та багато інших) [7, 14-15], присвячених дослідженням

оцінювання та підвищення ефективності використання МЕС для різних застосувань з метою підвищення надійності та динамічності використання їх у мережах 5G.

Проте ця технологія розподілених обчислень зовсім не позбавлена недоліків, які необхідно нівелювати для її повсюдного розгортання.

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності розподіленої обробки

даних в комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку. Досягнення мети спрямовано на вдосконалення якості обслуговування абонентів сучасних стільникових мереж і забезпечення вимог до мереж наступних поколінь.

Виклад основного матеріалу. Узагальнений випадок використання мобільної мережі з граничними обчислювальними можливостями (мережа 5G) зображено на рисунку 1 [14].

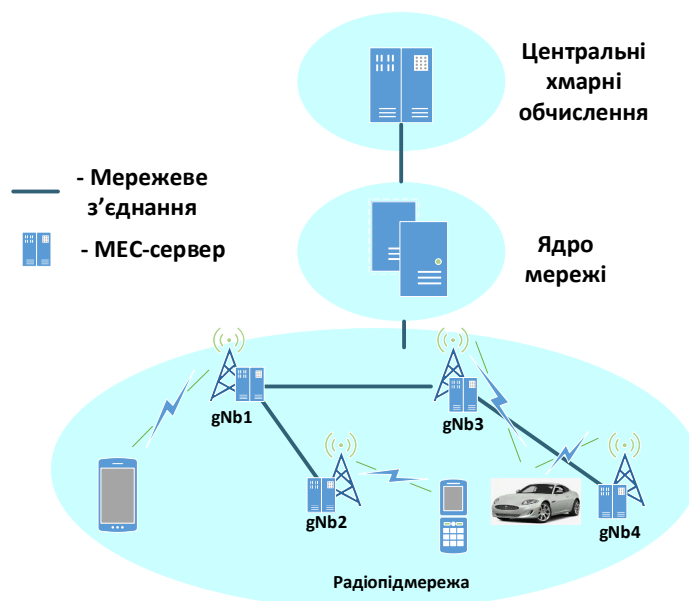


Рисунок 1 – Архітектура мережі 5G із використанням МЕС

У запропонованій схемі обчислювальні вузли можуть розміщуватися в різних частинах мережі, а не тільки на базових станціях мобільної мережі. В цьому випадку мережа ЕС складається з різних вузлів – граничних та хмарних вузлів, пристроїв кінцевого користувача і ліній зв'язку, які з'єднують ці вузли між собою.

Розглянута вище мережа може бути представлена у вигляді однонаправленого графа $G = (v, \varepsilon)$, де вершини v – вузли мережі, а ε – це мережеві канали між вузлами (рисунком 2).

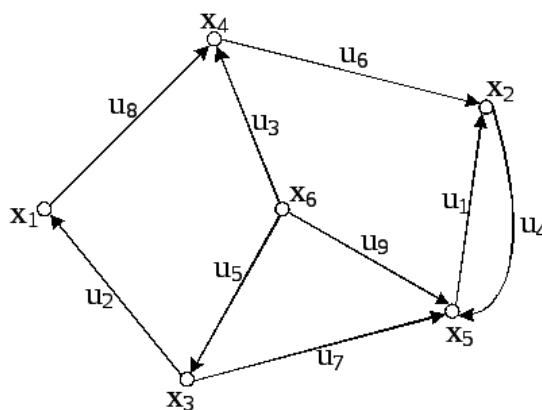


Рисунок 2 – Неорієнтований граф мережі з граничними обчисленнями

Припустимо, що кожна вершина доступна будь-якій іншій вершині в графі через декілька послідовних передач (хопів). Окрім того, пристрої кінцевих користувачів і їх з'єднання не представлені в G . Водночас кожне мережеве з'єднання $e \in \mathcal{E}$ має наступні властивості:

- *затримка передачі* $D_{net}^{a,e}$ – це час, потрібний для виконання запиту, що надійшов від додатка a , який буде переданий в канал e . Запропонована модель визначає різні типи ресурсів R . Наприклад, набір $R = \{CPU, RAM, Storage\}$ складається з обчислювальної потужності процесора, оперативної пам'яті (RAM) і ресурсів дискового простору.

Кожний вузол $v \in V$ має наступні характеристики:

- *ємність ресурсу* $C_{v,r}$ – число, що описує загальну ємність ресурсу $r \in R$ на вузлі v ; водночас приймаємо, що хмара має потенційно необмежені ресурси, $C_{cloud,r} = \infty$ через різницю в ємності між хмарою і граничним вузлом.

Кожний додаток $a \in A$ має наступні параметри:

- максимальна допустима затримка D_a ,
- максимальна кількість екземплярів додатка $N_a \in \mathbb{C}$,
- попит на ресурс $f_a^r(\lambda)$,
- необхідна обчислювальна потужність W_a ,
- частота запитів λ_a .

У практичному сценарії неможливо розмістити всі додатки на граничних вузлах з урахуванням обмеженості ресурсів вузлів МЕС. З цього випливає, що деякі додатки розгортаються додатково (тобто в базовій мережі або хмарі).

Ця значна відстань між вузлом і користувачем може призвести до збільшення затримки відгуку на запит. Більше того, перевантажений сервер також збільшує час відгуку, а розподілення навантаження між копіями додатків можуть зменшити цю проблему. Тому дослідимо сумісну проблему розміщення і завантаження сервісів розподілення для мінімізації можливих порушень QoS (максимальна допустима затримка).

Водночас мережева затримка обробки оцінюється наступним чином:

$$\bar{d}(F_a^{u,v}) = \bar{d}_{net}(F_a^{u,v}) + \bar{d}_{proc}(a, v). \quad (1)$$

Мережева затримка відгуку на запити включає:

- затримку між кінцевим пристроєм, що робить запит, та вузлом, до якого він приєднаний;

- затримку передачі з цього останнього вузла на сервер, де розміщено додаток, який прямує транзитним маршрутом.

Обробка запиту моделюється з використанням моделі масового обслуговування $M/M/1$ [16]. У цій моделі користувачів безперервно створюються запити щодо застосування відповідного пуассонівського процесу з відношенням A .

Варто відзначити, що вирішення проблеми обмеження автономного розміщення служби можливе тільки при виконанні всіх наступних вимог:

1) *кількість екземплярів*: вузол може розміщувати тільки одну репліку даного додатка. Окрім того, кількість екземплярів, які розгорнуті в системі, повинна відповідати обмеженням, які визначені додатками, і всі вони мають бути розміщені

$$1 \leq \sum_{v \in V} p_a^v \leq N_a \quad \forall_a \in A; \quad (2)$$

2) *існування потоку запитів*: потік запитів існує тільки в тому випадку, якщо копія додатка a розміщена в v , і є користувачі, які підключені в u із запитом a . Нехай $\gamma_a^{u,v} \in \{0,1\}$ – двійкова змінна, яка виражає існування потоку $F_a^{u,v}$,

$$\gamma_a^{u,v} \leq p_a^v Q_a^u \quad \forall_a \in A, \forall_{u,v} \in V; \quad (3)$$

3) *розмір потоку запиту*: якщо потік існує, його розмір повинен бути, принаймні, одним і дорівнювати кількості запитів

$$\gamma_a^{u,v} \leq \delta_a^{u,v} \leq \gamma_a^{u,v} Q_a^u \quad \forall_a \in A, \forall_{u,v} \in V; \quad (4)$$

4) *збереження навантаження*: сукупний розмір усіх потоків запитів для застосування a від того ж вихідного вузла u дорівнює загальній кількості запитів від користувачів, пов'язаних цим вузлом,

$$\sum_{v \in V} \delta_a^{u,v} = Q_a^u \quad \forall_a \in A, \forall_u \in V; \quad (5)$$

5) *продуктивність вузла*: загальна сума ресурсів, що запитуються додатками, не повинна перевищувати продуктивності вузлів

$$\sum_{a \in A} p_a^v f_a^r(\lambda_a^v) \leq C_{v,r} \quad \forall_r \in R, \forall_v \in V; \quad (6)$$

6) *стабільність черги*: черга в моделі $M/M/1$ стабільна, тільки якщо середній темп обслуговування більший, ніж середній темп надходження запитів. Ця стабільність повинна бути гарантована для кожного додатка, поміщеного у вузол:

$$\lambda_a^v < \mu_a^v \quad \forall_{a,v} (p_a^v = 1), a \in A, v \in V; \quad (7)$$

7) *порушення QoS*: час відклику наявного потоку не повинен перевищувати крайній термін свого застосування плюс рівень порушення QoS системи:

$$\gamma_a^{u,v} \bar{d}(F_a^{u,v}) \leq D_a + \varepsilon \quad \forall_a \in A, \forall_{u,v} \in V. \quad (8)$$

Ми визначаємо рівень порушення QoS потоку запиту як відмінність між його середнім часом відгуку і крайнім терміном виконання.

Рівень порушення QoS системи – найвищий рівень порушення серед усіх потоків у системі $(\bar{d}(F_a^{u,v}) - D_a)$. Тому основна мета дослідження полягає в тому, щоб мінімізувати рівень порушення QoS. Отже, поставлена сервісна проблема розміщення може бути сформульована наступним чином:

$$\min(\varepsilon). \quad (9)$$

Результати дослідження. Для вирішення окресленої вище задачі в цій роботі

пропонується евристичне рішення, що ґрунтується на генетичних алгоритмах [17]. Запропонований генетичний алгоритм використовує упереджені хромосоми з випадковими ключами, що є масивом випадково генерованих реальних чисел в інтервалі $[0,1]$.

Таке представлення хромосом використовується не для створення нездійснених рішень, які можуть погіршити продуктивність генетичного алгоритму. Ця пропозиція використовує елітарну стратегію, зберігаючи елітарних індивідів, тобто тих, хто має найкращі цінності, наступному поколінню. Він також додає нові випадкові покоління індивідів, амутантів у наступному поколінні. Крім того, для поповнення популяції породження створюється параметризований рівномірний кросовер між елітарними та неелітарними особами.

В алгоритмах з випадковим ключем випадковий алгоритм детермінованого декодера приймає хромосому індивіда та обчислює її значення. Таким чином, представлення хромосоми та алгоритму декодера відіграє важливу роль у розробленій моделі. Ця пропозиція щодо кодування хромосоми та опис її частин наведені нижче:

$$C = [O_1^1, O_1^2, \dots, O_1^{|V|}, \dots, O_{|A|}^1, O_{|A|}^2, \dots, O_{|A|}^{|V|}, \\ M_1, M_2, \dots, M_{|A|}, \\ V_1^1, V_1^2, \dots, V_1^{|V|}, \dots, V_{|A|}^1, V_{|A|}^2, \dots, V_{|A|}^{|V|}] \quad (10)$$

1) $O_1^1, \dots, O_{|A|}^{|V|}$ – це порядок створення запитів потоку;

2) $M_1, \dots, M_{|A|}$ – описує вагу, яка використовується при виборі сервера для розміщення програми;

3) $V_1^1, \dots, V_{|A|}^{|V|}$ – параметри для обчислення пріоритету вузла, який буде обраний як місце для розгортання програми.

Цей пріоритет вузла v для програми a задається як:

$$M_a^v V_a^v + (1 - M_a^v) \frac{D_{net}^{a,u,cloud} - D_{net}^{a,u,v}}{D_{net}^{a,u,cloud}}. \quad (11)$$

Алгоритм роботи декодера зображено на рисунку 3.

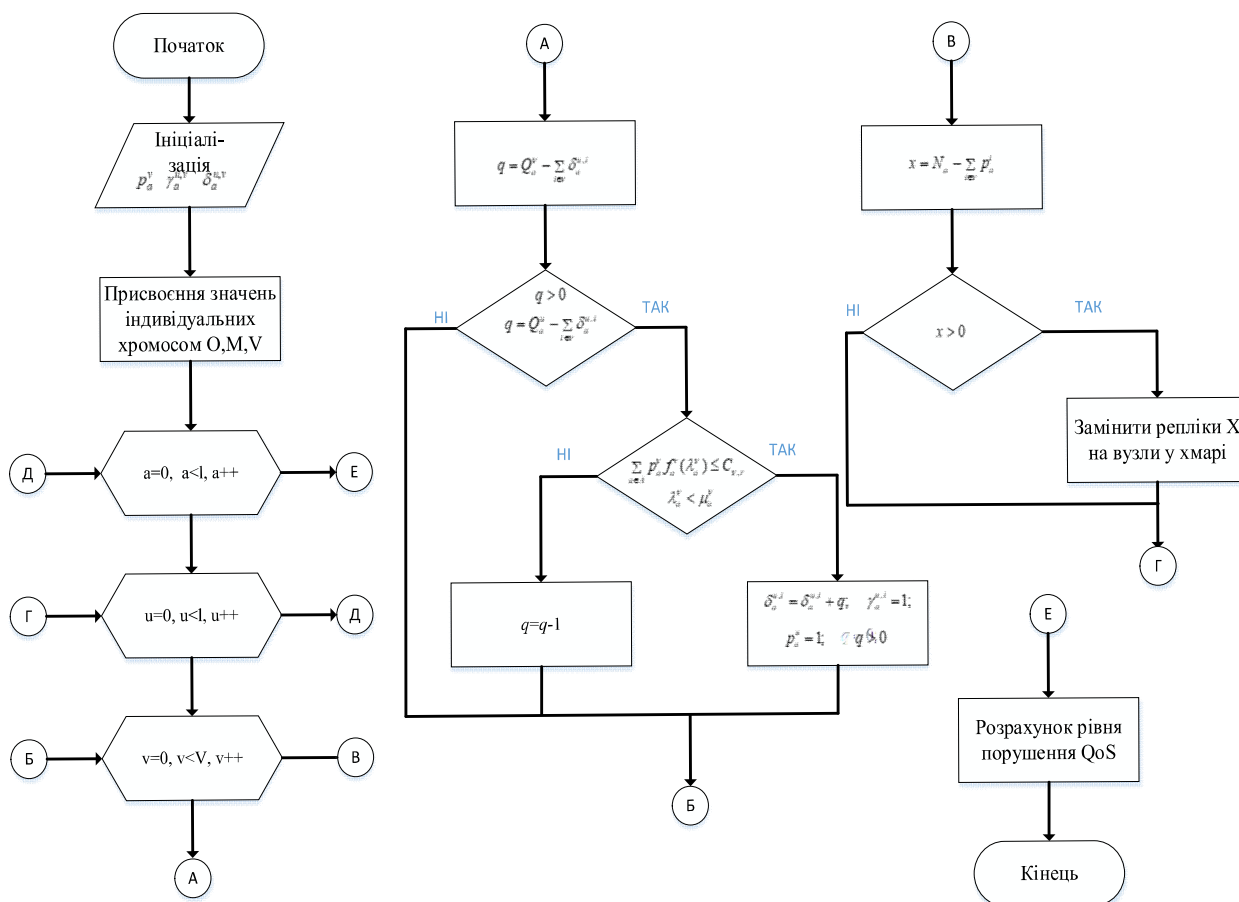


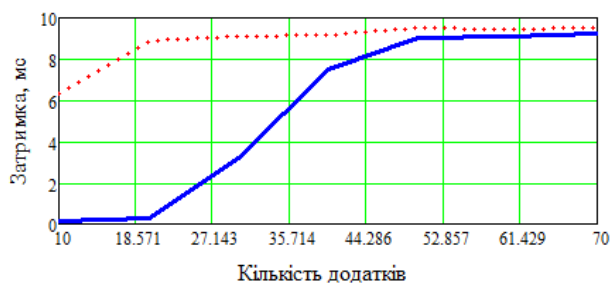
Рисунок 3 – Алгоритм роботи декодера

Просте рішення проблеми розміщення сервісу розгортає додаток на найближчих серверах до користувачів цього додатка, тобто серверів з меншою затримкою мережі для цих користувачів. Однак обмеження ємності вузлів заважає цій схемі розгортання оптимально працювати для великої кількості програм або користувачів.

Щоб покращити це рішення, пропонується включити ще один параметр у допов-

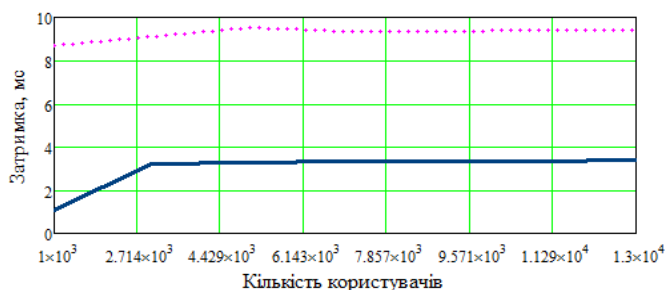
нення до затримки мережі в процедурі вибору вузла. Крім того, ваговий коефіцієнт (M) врівноважує ці два параметри в процесі прийняття рішення.

Оцінку розробленого методу та його порівняння із реалізаціями інших методів оптимізації, застосованих до вирішення задачі розміщення масштабованих послуг, зображено на рисунку 4.



(а) Кількість користувачів – 4000

для мережі із 10 базових станцій gNb



(б) Кількість додатків – 30

Рисунок 4 – Результати моделювання досліджуваних алгоритмів

Аналіз результатів моделювання, продемонстрований на рисунку 4, дає змогу впевнитись в ефективності розробленого методу.

Обговорення результатів. За аналізом якості обслуговування абонентів у реалізованих проектах мереж 5G в світі встановлено, що заявлені вимоги до мереж п'ятого покоління не досягаються в жодній із реалізованих мереж, а фактична якість обслуговування абонентів перебуває на не досить високому рівні, що свідчить про низьку ефективність наявних методів керування мережами стільникового оператора та розподіленої обробки даних у них. Тому було проаналізовано ефективність методів, моделей і технологій розподіленої обробки даних у комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку та, відповідно, встановлено їх недоліки. Після цього було розроблено метод оптимізації розміщення масштабованих послуг на розподілених обчислювальних ресурсах мережі стільникового оператора, що полягає у послідовному використанні моделі граничних обчислень, узагальненої моделі мережі стільникового оператора та евристичного рішення, що ґрунтується на використанні генетичних алгоритмів.

Висновки. Розроблений метод оптимізації розміщення масштабованих послуг на розподілених обчислювальних ресурсах мережі стільникового оператора дає можливість зменшити рівень деградації якості обслуговування кінцевих абонентів мережі стільникового оператора, зокрема, затримки на величину до 8 мс для великої кількості абонентів та, відповідно, великої кількості завдань.

Отримані наукові результати доцільно використовувати під час планування безпроводних мереж стандарту LTE та 5G, розробки обладнання та програмного забезпечення для систем передачі даних, а також у навчальному процесі.

Список використаних джерел

- [1] Cisco Annual Internet Report. [Online]. Available: <https://newsroom.cisco.com/press-release-content?type=webcontent&articleId=2055169>
- [2] Ericsson Mobility Report. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>
- [3] М. А. Маколкина, А. А. Атея, А. С. А. Мутханна, и А. Е. Кучерявый, "Метод выгрузки трафика приложений дополненной реальности в многоуровневой системе граничных вычислений", *Электросвязь*, № 6, с. 36-42, 2019.
- [4] Д. В. Кашкаров, и А. Е. Кучерявый, "Анализ приложений и перспектив развития технологий граничных вычислений с множественным доступом в сетях связи", *Информационные технологии и телекоммуникации*, № 8.1, с. 28-33, 2020.
- [5] А. А. Атея, А. И. Выборнова, и А. Е. Кучерявый, "Многоуровневая облачная архитектура для услуг Тактильного Интернета", *Электросвязь*, № 2, с. 26-30, 2017.
- [6] А. С. Викторov, и В. Н. Шведенко, "Методика создания эффективного распределенного хранилища данных для периферийного сервиса обработки данных телеметрии БПЛА", *Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования*, № 1, 2018.
- [7] N. Hassan, K. A. Yau, and C. Wu, "Edge computing in 5G: A review", in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127276-127289, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2938534
- [8] Shi, Weisong, et al., "Edge computing: Vision and challenges", *IEEE Internet of Things Journal*, no. 3.5, pp. 637-646, 2016.
- [9] Premsankar, Gopika, Mario Di Francesco, and Tarik Taleb, "Edge computing for the Internet of Things: A case study", *IEEE Internet of Things Journal*, no. 5.2, pp. 1275-1284, 2018.
- [10] Li, Hongxing, et al. "Mobile edge computing: Progress and challenges", in *4th IEEE Int. Conf. on mobile cloud computing, services, and engineering (MobileCloud)*, IEEE, 2016.
- [11] Wang, Shangguang, et al., "Edge server placement in mobile edge computing", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, no. 127, pp. 160-168, 2019.
- [12] Wang, Shangguang, et al., "A survey on service migration in mobile edge computing", *IEEE Access*, no. 6 pp. 23511-23528, 2018.
- [13] Liu, Juan, et al. "Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems", in *IEEE Int. Symposium on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2016.
- [14] J. Hammer, P. Moll, and H. Hellwagner, "Transparent access to 5G edge computing services", in *IEEE Int. Parallel and Distributed Processing Symposium*

- Workshops (IPDPSW)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2019, pp. 895-898. DOI: 10.1109/IPDPSW.2019.00147
- [15] Q. Pham et al., "A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116974-117017, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001277
- [16] L. Satish, and B. I. Gururaj, "Use of hidden Markov models for partial discharge pattern classification", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, April 2003.
- [17] R. Poli, W. B. Langdon, and N. F. McPhee, *A Field Guide to Genetic Programming*, 2008. [Online]. Available: Lulu.com. ISBN 978-1-4092-0073-4.
- [7] N. Hassan, K. A. Yau, and C. Wu, "Edge computing in 5G: A review", in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127276-127289, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2938534
- [8] Shi, Weisong, et al., "Edge computing: Vision and challenges", *IEEE Internet of Things Journal*, no. 3.5, pp. 637-646, 2016.
- [9] PremSankar, Gopika, Mario Di Francesco, and Tarik Taleb, "Edge computing for the Internet of Things: A case study", *IEEE Internet of Things Journal*, no. 5.2, pp. 1275-1284, 2018.
- [10] Li, Hongxing, et al. "Mobile edge computing: Progress and challenges", in *4th IEEE Int. Conf. on mobile cloud computing, services, and engineering (MobileCloud)*, IEEE, 2016.
- [11] Wang, Shangguang, et al., "Edge server placement in mobile edge computing", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, no. 127, pp. 160-168, 2019.
- [12] Wang, Shangguang, et al., "A survey on service migration in mobile edge computing", *IEEE Access*, no. 6 pp. 23511-23528, 2018.
- [13] Liu, Juan, et al. "Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems", in *IEEE Int. Symposium on Information Theory (ISIT)*, IEEE, 2016.
- [14] J. Hammer, P. Moll, and H. Hellwagner, "Transparent access to 5G edge computing services", in *IEEE Int. Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2019, pp. 895-898. DOI: 10.1109/IPDPSW.2019.00147
- [15] Q. Pham et al., "A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116974-117017, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001277
- [16] L. Satish, and B. I. Gururaj, "Use of hidden Markov models for partial discharge pattern classification", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, April 2003.
- [17] R. Poli, W. B. Langdon, and N. F. McPhee, *A Field Guide to Genetic Programming*, 2008. [Online]. Available: Lulu.com. ISBN 978-1-4092-0073-4.

References

- [1] Cisco Annual Internet Report. [Online]. Available: <https://newsroom.cisco.com/press-release-content?type=webcontent&articleId=2055169>
- [2] Ericsson Mobility Report. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>
- [3] M. A. Makolkina, A. A. Atea, A. S. A. Muthanna, and A. E. Kucheryaviy, "The method of unloading augmented reality application traffic in a multilevel boundary computing system", *Elektrosvyaz*, no. 6, pp. 36-42, 2019. [in Russian].
- [4] D. V. Kashkarov, and A. E. Kucheryaviy, "Analysis of applications and prospects for the development of border computing technologies with multiple access in communication networks", *Informatsionnyye Tekhnologii i Telekommunikatsii*, no. 8.1, pp. 28-33, 2020. [in Russian].
- [5] A. A. Ateya, A. I. Vybornova, and A. E. Kucheryaviy, "Multi-tier cloud architecture for Tactile Internet services", *Elektrosvyaz*, no. 2, pp. 26-30, 2017. [in Russian].
- [6] A. S. Viktorov, and V. N. Shvedenko, "Methods for creating an efficient distributed data warehouse for a UAV telemetry peripheral data processing service", *Informatsionno-ekonomicheskiiye aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya*, no. 1, 2018. [in Russian].

P. S. Usik¹, graduate student,
e-mail: mr.usik@ukr.net

O. A. Smirnov¹, Dr.Sc., professor,
e-mail: dr.SmirnovOA@gmail.com

I. V. Myronets², Ph.D., associate professor,
e-mail: i.myronets@chdtu.edu.ua

K. O. Buravchenko¹, Ph.D.,
e-mail: buravchenkok@gmail.com

N. M. Yakymenko¹, Ph.D., associate professor
e-mail: yakimenko_n_m@ukr.net

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

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

METHOD OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF DISTRIBUTED DATA PROCESSING IN COMPUTER SYSTEMS OF CELLULAR OPERATORS

The creation of information society in Ukraine is one of the most urgent tasks today. In the Strategy for the Development of the Information Society in Ukraine, the priorities for the formation of the country's modern information infrastructure include the creation of high-speed mobile broadband access networks to Internet resources throughout Ukraine.

At the same time, with the development of cellular networks, new and more advanced network architectures for data transmission and management appear. However, there are still a number of unresolved issues and problem areas that need to be addressed accordingly. Therefore, the creation of high-speed networks of the fourth and fifth generations of broadband access to Internet resources and increase of the efficiency of their operation is an urgent and promising task.

The purpose of the study is to develop methods to improve the efficiency of distributed data processing in computer systems of cellular operators. Achieving the goal is aimed at improving the quality of customer service of modern cellular networks and meeting the requirements for next generation networks.

The paper analyzes the effectiveness of methods, models and technologies of distributed data processing in computer systems of cellular operators and identifies their shortcomings. After that, a method has been developed to optimize the placement of scalable services on the distributed computing resources of the cellular network, which consists in the sequential use of the boundary computing model, a generalized cellular network model and a heuristic solution based on genetic algorithms.

The method obtained as a result of this work allows to reduce the level of degradation of the quality of service of end subscribers of the cellular operator's network, in particular, delays of up to 8 ms for a large number of subscribers and, accordingly, a large number of tasks.

Keywords: cellular communication, data transmission, distributed computing, network channels, genetic algorithm.

УДК 536,46

[0000-0002-7236-7130] **В. В. Починок**, аспірант,
[0000-0001-7113-9892] **В. М. Вязовик**, д.т.н., доцент

e-mail: v.viazovyk@chdtu.edu.ua

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

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИФУЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОННОКАТАЛІТИЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ CO₂ В ОРГАНІЧНІ СПОЛУКИ

Сучасне суспільство викидає в навколишнє атмосферне повітря велику кількість різноманітних хімічних сполук, серед яких – CO₂, якого викидаються мільйони тонн. Одним із напрямів його переробки є електроннокаталітична переробка CO₂ в органічні сполуки. Важливою складовою цього методу є дифузійні процеси, які через нетривалий час існування частини сполук найкраще досліджувати за допомогою математичної моделі. Тому було складено і вирішено математичну модель дифузійних процесів на поверхні каталізатора при електроннокаталітичній переробці CO₂. В результаті моделювання отримано залежності коефіцієнта дифузії, швидкості дрейфу частинок, загального об'ємного коефіцієнта масовіддачі, а також швидкості масовіддачі.

Ключові слова: діоксид вуглецю, електроннокаталітична переробка, органічні сполуки, математична модель, дифузійні процеси.

Вуглекислий газ в атмосфері Землі є малою компонентою сучасної земної атмосфери. Станом на жовтень 2019 р. його концентрація в атмосферному повітрі становила близько 410 ppm [1, 2], тоді як на кінець жовтня 2020 р. вона становила близько 412,58 ppm і продовжує збільшуватися. В Україні, яка займає 27-е місце із 213 за кількістю викидів CO₂, станом на кінець жовтня 2020 р. ці викиди становлять близько 225 млн т [3]. Перші три місця займають Китай – 10065 млн т, США – 5416 млн т, Індія – 2654 млн т. Загалом за 2018 р. в результаті діяльності людини в атмосферу було викинуто понад 36 573 млн т CO₂ [3, 4].

Головним напрямом у боротьбі зі зміною клімату вважається спільне зниження кількості викидів парникових газів в атмосферу Землі, декарбонізація – уловлювання й зберігання вуглецю та конверсія CO₂ в продукти палива та нафтохімії. Ці проблеми можна було б вирішити, якщо б знайшовся ефективний спосіб використання діоксиду вуглецю як джерела вуглецю при виробництві палива й хімічної сировини. Перетворення CO₂ на хімікати та енергоносії з доданою вартістю вважається одним із чотирьох пріоритетних напрямів розвитку економіки різних країн.

На рисунку 1 у вигляді схеми зображено сполуки, які можуть бути отримані з CO₂.

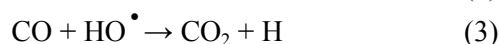
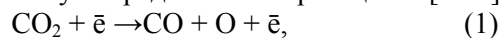
На рисунку 2 схематично зображено електроннокаталітичну переробку CO₂ в органічні сполуки (без урахування допоміжних підготовчих стадій). Згідно з цією схемою електроннокаталітична переробка CO₂ в органічні сполуки складається з двох основних стадій:

- у первинному розряднику відбуваються процеси активації в зоні низькотемпературної плазми вуглекислого газу та руйнування парів води з утворенням водню, кисневмісних радикалів HO[•] та HO₂[•], які відіграють суттєву роль у перетворенні вуглекислого газу;

- у вторинному розряднику відбувається безпосередній синтез на поверхні гетерогенного каталізатора в зоні низькотемпературної плазми органічних сполук із речовин, що утворилися в первинному розряднику.

Як джерело низькотемпературної плазми використовується бар'єрний розряд.

Хімізм процесу в первинному розряднику може бути представлений реакціями [6-12]:



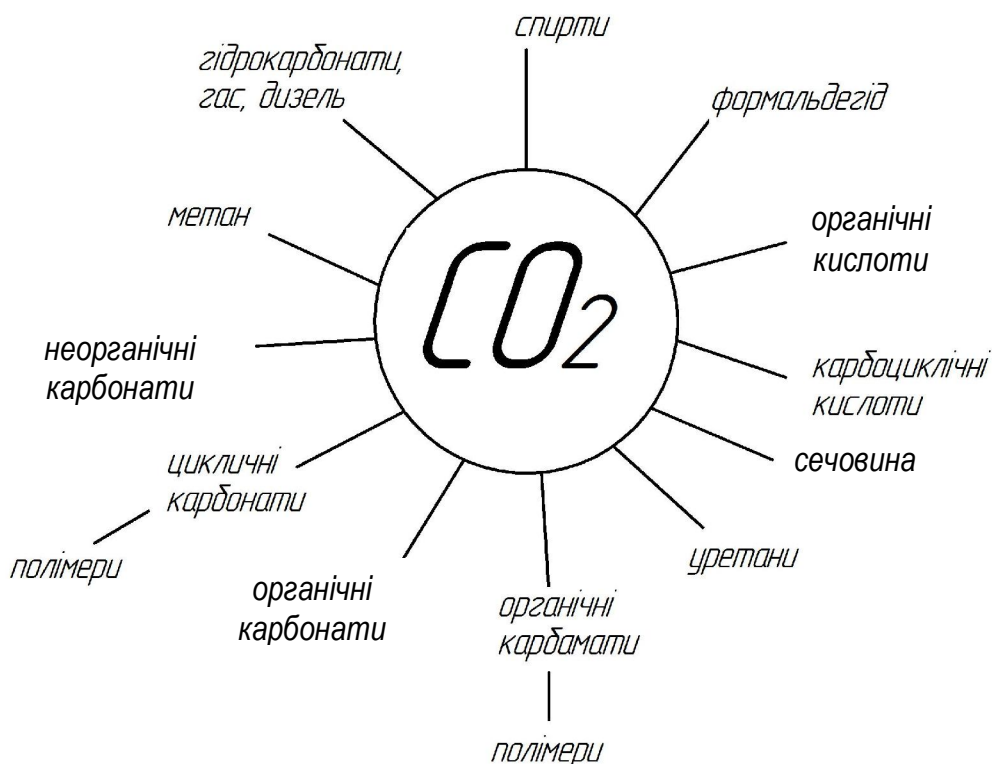
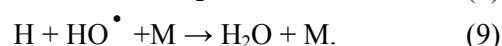
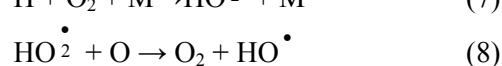
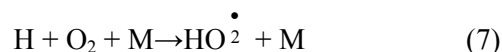
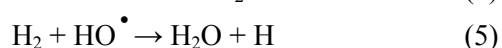
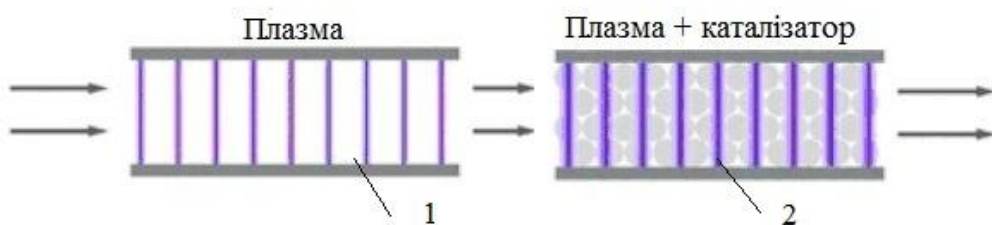


Рисунок 1 – Сполуки, які можна отримати із CO_2 [5] (неорганічні / органічні карбонати, сечовина)

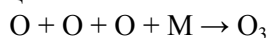


1 – первинний розрядник; 2 – вторинний розрядник

Рисунок 2 – Схема переробки CO_2 в органічні сполуки

В результаті до початкової суміші вуглекислого газу та парів води додаються ще атомарний кисень, водень, оксид вуглецю та кисневмісні радикали $\text{HO}^\bullet$ та $\text{HO}^\bullet_2$.

В [6-12] згадується, що при пропусканні через бар'єрний розряд CO_2 утворюється озон завдяки реакції



При детальному описі будь-якого досліджуваного хімічного процесу виникає необхідність у великій кількості параметрів, визна-

чення яких через різноманітні причини є ускладненим. Так, при дослідженні таких короткоживучих сполук, як радикали та іони, дуже складно без спеціалізованого обладнання визначити кінетику перебігу процесу, а за допомогою математичного моделювання це можливо.

Будь-які хімічні процеси за участі каталізатора супроводжуються дифузією реагентів із потоку в зерно каталізатора і продуктів реакції від зерен – в потік. Таким чином, будь-який хімічний процес, що проходить

на поверхні каталізатора, пов'язаний із дифузією, що забезпечує транспорт реагентів та продуктів реакції з однієї зони в іншу. Більшість реакцій проходять у порах каталізатора. Враховуючи це, можна розрізнити наступні стадії процесу:

1. Транспортування реагентів з потоку до поверхні зерен за допомогою дифузії.
2. Дифузія реагентів з потоку в пори зерен каталізатора.
3. Адсорбція реагентів у порах каталізатора.
4. Хімічні перетворення в порах каталізатора.
5. Десорбція продуктів реакції.
6. Дифузія продуктів реакції з пор до поверхні зерен каталізатора.
7. Транспортування продуктів реакції з поверхні каталізатора в потік речовини.

Усе це вказує на нерозривний зв'язок дифузійних процесів та хімічної реакції. А оскільки сполуки в них беруть участь, існуючи протягом частки секунди, то найкращим методом їх дослідження є математична модель.

Метою роботи є розробка і рішення математичної моделі дифузійних процесів на поверхні каталізатора в зоні низькотемпературної плазми бар'єрного розряду з накладанням напруженості електромагнітного поля при електроннокаталітичній переробці вуглекислого газу в органічні сполуки для сполук, час життя яких становить тисячні частки секунди.

Математичний опис. Основний закон масопередачі визначає швидкість процесу перенесення речовини до поверхні каталізатора

$$\frac{dM}{d\tau} = K\Delta Cdf,$$

де K – коефіцієнт масопередачі; ΔC – рушійна сила дифузійного процесу; df – поверхня, крізь яку відбувається дифузія.

Виходячи з того, що опір середовища при дифузії речовини із однієї фази в іншу відсутній, коефіцієнт масопередачі з урахуванням газової β_c і твердої β_a фаз дорівнює

$$K_c = \frac{1}{\frac{1}{\beta_c} + \frac{m}{\beta_a}},$$

де m – тангенс кута нахилу рівноважної лінії або коефіцієнт розподілення.

При низьких концентраціях речовини в газі справедливий запис

$$\frac{m}{\beta_a} \ll \frac{1}{\beta_c} \text{ і } K_c \approx \beta_c.$$

Тому необхідно, в першу чергу, визначити вплив електричного поля на дифузійні процеси в газовій фазі. З теорії масообміну відомо, що будь-яка речовина з ядра потоку в приграничний шар переноситься конвективною і молекулярною дифузією. Прийmemo, що в ядрі потоку концентрація речовини залишається постійною певний час.

При накладанні напруженості електричного поля речовина, крім конвективної і молекулярної дифузії, транспортується ще завдяки дрейфу заряджених молекул до приграничної поверхні. Швидкість цього дрейфу напряму залежить від напруженості електричного поля E

$$w_d = K_d E,$$

де K_d – скалярна рухомість іонів. Вона характеризує іони і газ та чисельно дорівнює швидкості руху під дією поля напруженістю в 1 В/м у газі під тиском в одну атмосферу. Тоді кількість речовини, перенесеної з ядра фази до міжфазної поверхні, визначається виразом

$$v_E = w_d c.$$

В результаті цього концентрація розподіленої речовини змінюється до C_{epE} . Ця зміна при накладанні напруженості поля приводить до зростання концентрації компоненту, що розподіляється, зі сторони твердої фази до значення a_{epE} . В цьому випадку, за законом Щукарьова, швидкість масовіддачі в твердій фазі має вигляд

$$v_a = \beta_a (a_{epE} - a).$$

Рушійна сила на межі розділу фаз залежить від механізму молекулярної дифузії, і тоді швидкість масовіддачі в газовій фазі буде дорівнювати

$$v_y = v_c + v_E \text{ або } v_y = \beta_c (c - c_{ep}) + v_E.$$

Праву частину цього рівняння також можна представити у вигляді

$$v_a = \beta_{cE} (C - C_{ep}),$$

де β_{cE} – коефіцієнт масовіддачі в газовій фазі в електричному полі:

$$\beta_{cE} = \beta_c + \frac{v_E}{C - C_{ep}}.$$

Тоді маємо

$$K_{cE} = \beta_c + \frac{v_E}{C - C_{cp}}.$$

При збільшенні електричного поля E концентрація на межі розділу фаз зі сторони газового потоку C_{cpE} буде збільшуватися до встановлення рівноваги на межі і в ядрі потоку.

При іонізації газового потоку під дією електричного поля на заряджену частинку (іон) діє сила, яка дорівнює добутку заряду частинки на напруженість електричного поля (В/м) E

$$P = |e|nE,$$

де $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електронів;
 n – валентність іона.

Сила опору середовища руху іона

$$F = 3\pi\mu w_d d,$$

де μ – в'язкість середовища, Па·с;
 w_d – швидкість руху (дрейфу) іонів, м/с;
 d – діаметр іона, м.

При русі іона, за умови $P = F$,

$$w_d = |e| \frac{nE}{3\pi\mu d}.$$

Швидкість масопередачі при дії електричного поля визначається за формулою

$$v_E = w_d C,$$

де C – концентрація компонента, що розподіляється в ядрі газової фази, кг/м³.

Таким чином, при накладанні на газовий потік напруженості поля до швидкості масовіддачі в газовій фазі v_c додається швидкість масопідводу іонів v_E в електричному полі.

Швидкість масопереносу в електричному полі визначається за формулою

$$v_y = v_c + v_E.$$

В стаціонарних умовах $v_y = v_a$ або

$$\beta_c (C - C_{GP}) + v_E = \beta_a (a_{GP} - a),$$

звідки

$$a_{GP} = a + \frac{\beta_c (C - C_{GP}) + v_E}{\beta_a},$$

де a , a_{GP} – концентрація компонента в ядрі і на межі твердої фази, відповідно, кг/м³;

C_{GP} – концентрація компонента на межі твердої фази, кг/м³.

Тобто накладання напруженості електричного поля приводить до збільшення концентрації з обох сторін межі розділу фаз.

Коефіцієнт об'ємного масопереносу при накладанні напруженості поля визначається у вигляді

$$\beta_e = \frac{w_e}{d_3},$$

де d_3 – діаметр зерен каталізатора, м.

Зовнішній об'ємний коефіцієнт масопередачі при звичайному русі речовин визначається за формулою

$$\beta_y = \frac{1,6Dw^{0,54}}{v^{0,54}d^{1,46}},$$

де D – коефіцієнт дифузії речовини в газі, м²/с;
 w – фіктивна швидкість газу в шарі каталізатора, м/с;
 v – кінематична в'язкість газу, м²/с.

Загальний об'ємний коефіцієнт масовіддачі від ядра газового потоку до поверхні зерен каталізатора має вигляд

$$\beta_{ye} = \beta_y + \beta_e,$$

а загальна швидкість масовіддачі

$$v_{ye} = \beta_{ye} (C - C_{cp}).$$

Швидкість дифузії реагенту A до поверхні каталізатора в газовій фазі розраховують за рівнянням

$$W_D = \frac{Re^{0,7} Pr^{0,33}}{2,32d_q} DC_A.$$

Критерії Рейнольдса і Прандтля:

$$Re = \frac{w_\phi d_q \rho}{(1 - \varepsilon)\mu},$$

$$Pr = \frac{\mu}{\rho D},$$

де C_A – концентрація реагенту A в газі B , кмоль/м³;

ρ – густина реагенту A , кг/м³; Па·с;

ε – поруватість шару каталізатора.

Розрахунок напруженості поля в зоні електричного розряду можна розрахувати за виразом

$$E = \frac{U_r}{r_p},$$

де U_r – напруга в розрядному проміжку, В;
 r_p – зазор між електродами, м.

Напругу між електродами можна знайти за формулою

$$U_r = U \frac{C_\phi}{C_\varepsilon + C_\phi},$$

де U – напруга, що подається на електроди, В;
 C_ϕ – ємність бар'єру;
 C_ε – ємність газового проміжку.

Для електродів циліндричної форми ємності дорівнюють:

для бар'єру

$$C_{\phi} = 2\pi\epsilon_0\epsilon \frac{L}{\ln \frac{D}{D_{\text{вн}}}},$$

для газового проміжку

$$C_{\epsilon} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{\epsilon} \frac{L}{\ln \frac{D_n}{D}},$$

де ϵ і ϵ_{ϵ} – діелектричні проникності бар'єру і газу газового проміжку;

ϵ_0 – електрична стала;

L – довжина електродів, м;

$D_{\text{вн}}$, D , D_n – діаметри електродів, м.

Результати розрахунку та їх обговорення. Виходячи з наведених залежностей, були розраховані напруженості поля для напруг від 7 до 11 кВ для матеріалу бар'єру – скла і газу в газовому проміжку – вуглекислий газ з парами води, які наведено в таблиці 1.

Температура газового потоку – 350°C, газове середовище – CO₂, розмір пор каталізатора – 8·10⁻⁸ мм, тобто мікропори.

Таблиця 1 – Значення напруженості поля для різних напруг

Напруга, кВ	7	8	9	10	11
Напруженість поля, кВ/м ²	3,607	4,122	4,638	5,152	5,668

При рішенні моделі значний інтерес становлять дифузійні процеси для CO, O₂, O, H₂O, HO•, HO₂•, H, які, за реакціями (1)-(9), суттєво впливають на процес утворення органічних сполук із CO₂. Результати рішення моделі подано в таблиці 2.

Як видно з результатів рішення моделі, на усі параметри дифузійного процесу суттєво впливає накладання низькотемпературної плазми. Однак величина цього впливу для кожної сполуки суттєво різниться.

Таблиця 2 – Розрахункові значення параметрів дифузійного процесу для різних напруг

Сполука	Напруга, кВ					
	0	7	8	9	10	11
Коефіцієнт дифузії, м ² /с						
CO	0,00857	0,03	0,0304	0,03041	0,03044	0,03046
O ₂	0,00731	0,0272	0,0274	0,0277	0,0279	0,0282
O	0,0147	0,02286	0,0249	0,0276	0,02992	0,0324
H ₂ O	0,0088	0,0324	0,0326	0,0329	0,0331	0,0334
HO•	0,010086	0,0383	0,0384	0,0385	0,0386	0,0387
HO ₂ •	0,00826	0,0235	0,0237	0,0241	0,0242	0,0245
H	0,0079	0,0373	0,0385	0,04	0,042	0,043
Швидкість дрейфу під дією магнітного поля, м/с						
CO	0	0,0014	0,0016	0,0018	0,002	0,0022
O ₂	0	0,0015	0,0017	0,0019	0,0021	0,0023
O	0	1,5	1,705	1,92	2,13	2,35
H ₂ O	0	0,0015	0,00171	0,00192	0,00213	0,00235
HO•	0	0,0047	0,00533	0,006	0,0067	0,0074
HO ₂ •	0	0,015	0,0171	0,0192	0,0213	0,0235
H	0	0,844	0,905	1,09	1,207	1,33
Загальний об'ємний коефіцієнт масовіддачі, кмоль/м ² ·с						
CO	25,89	26,03	26,05	26,07	26,09	26,109
O ₂	2,183	2,331	2,36	2,38	2,4	2,417
O	4,33	19,25	21,38	23,51	25,64	27,78
H ₂ O	2,63	2,78	2,8	2,82	2,84	2,86
HO•	3,23	3,29	3,295	3,3	3,31	3,31
HO ₂ •	1,87	2,019	2,04	2,06	2,08	2,103
H	23,56	32,009	33,22	34,42	35,63	36,84

Закінчення таблиці 2

Швидкість масовіддачі, кмоль/м ² ·с						
CO	562,4·10 ⁻⁹	164,7·10 ⁻⁷	164,9·10 ⁻⁷	165,0·10 ⁻⁷	165,1·10 ⁻⁷	165,2·10 ⁻⁷
O ₂	553,4·10 ⁻⁹	591,2·10 ⁻⁹	596,6·10 ⁻⁹	602,0·10 ⁻⁹	607,4·10 ⁻⁹	612,8·10 ⁻⁹
O	153,5·10 ⁻³	683,7·10 ⁻³	759,4·10 ⁻³	835,1·10 ⁻³	910,9·10 ⁻³	986,6·10 ⁻³
H ₂ O	378,5·10 ⁻⁴	399,9·10 ⁻⁴	403,1·10 ⁻⁴	406,1·10 ⁻⁴	406,2·10 ⁻⁴	412,3·10 ⁻⁴
HO•	718,2·10 ⁻⁵	728,2·10 ⁻⁵	730,0·10 ⁻⁵	731,5·10 ⁻⁵	733,0·10 ⁻⁵	734,5·10 ⁻⁵
HO ₂ •	562,4·10 ⁻⁹	607,3·10 ⁻⁹	613,7·10 ⁻⁹	620,1·10 ⁻⁹	626,6·10 ⁻⁹	632,9·10 ⁻⁹
H	247,6·10 ⁻⁹	336,4·10 ⁻⁹	349,1·10 ⁻⁹	361,7·10 ⁻⁹	374,5·10 ⁻⁹	387,2·10 ⁻⁹
Швидкість дифузії до поверхні, м ² /с						
CO	0,000016	0,000171	0,000171	0,000171	0,0001716	0,0001716
O ₂	0,000000121	0,00000136	0,00000137	0,00000138	0,00000139	0,0000014
O	0,026	0,785	0,842	0,898	0,952	1,0004
H ₂ O	0,000000777	0,0000087	0,00000875	0,0000088	0,00000884	0,00000884
HO•	0,000000138	0,0000015	0,0000015	0,0000015	0,00000151	0,00000151
HO ₂ •	0,000000129	0,00000147	0,00000148	0,00000149	0,0000015	0,00000151
H	2,47E-08	0,000000326	0,000000335	0,000000343	0,000000351	0,000000359

Так, коефіцієнти дифузії при накладанні напруженості поля збільшуються, але для кожної речовини різним чином. При накладанні напруженості коефіцієнт дифузії збільшується в кілька разів, однак при подальшому збільшенні цієї напруженості подальше збільшення різне. Із речовин, що становлять інтерес у цьому дослідженні, найбільш стрімко зростає коефіцієнт дифузії атомарного кисню та водню, тоді як зміна коефіцієнтів для інших сполук значно менша: вони змінюються в межах $1 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}$ м/с.

Під дією напруженості поля усі досліджувані сполуки починають свій направлений рух за векторами електромагнітного поля. Однак також, як і у випадку з коефіцієнтом дифузії, ця швидкість дрейфу різна. Дуже швидко рухаються ті ж атоми кисню і водню. На перший погляд, це можна було б пояснити тим, що ці сполуки дуже легкі, і тому вони рухаються швидко. Проте якщо порівняти молярні маси радикалів HO₂• та HO•, то радикал HO• повинен мати більшу швидкість дрейфу, ніж HO₂•, бо він легший. Як видно з результатів моделювання, радикал HO₂• при майже вдвічі більшій масі має швидкість дрейфу, в три рази більшу. Тобто на швидкість дрейфу не впливає маса сполуки, а впливають такі характеристики, як стан молекули (збуджений або незбуджений), розподіл електронних густин тощо.

Значення загального об'ємного коефіцієнта масовіддач без накладання напруженості і з накладанням суттєво не відрізняються, і ця різниця становить кілька відсотків. Це не стосується пари молекул, що рухаються, про які згадувалося вище. Додається ще і CO.

Для швидкості масовіддачі вплив накладання напруженості поля ще більший. Якщо брати за аналогією з попередніми розрахованими параметрами, то найбільш рухливими мають бути атомарний кисень і водень. Однак тут ця пара розпалася. В атомарного водню не відбувається суттєвого збільшення швидкості масовіддачі, тоді як атомарний кисень відповідає очікуванням і збільшує свою швидкість масовіддачі. Радикали HO₂• та HO• змінюють свою швидкість масовіддачі дуже незначною мірою, і ця зміна, як і для молекулярного кисню, може бути пояснена зміною температурного режиму системи при накладанні напруженості поля.

Схожа картина спостерігається і для швидкості дифузії сполук до поверхні каталізатора.

Висновки. Сучасне суспільство викидає в навколишнє атмосферне повітря велику кількість різноманітних хімічних сполук, серед яких і діоксид вуглецю. Щороку його викиди становлять мільйони тонн, і темпи викидів не зменшуються. Проблеми із впливом CO₂ на довкілля можна було б вирішити, якщо б знайшовся ефективний спосіб використання

діоксиду вуглецю як джерела вуглецю при виробництві палива й хімічної сировини.

Одним із таких напрямів переробки CO₂ шляхом перетворення на хімічні реагенти і паливо є електроннокаталітична переробка CO₂ в органічні сполуки. Особливістю цього методу є використання низькотемпературної плазми з бар'єрного розряду в присутності гетерогенного каталізатора. Досліджено дифузійні процеси на поверхні каталізатора за допомогою математичного моделювання. Зокрема було складено і вирішено математичну модель дифузійних процесів на поверхні каталізатора при електроннокаталітичній переробці CO₂. Виходячи з результатів моделювання, видно, що на усі параметри дифузійного процесу суттєво впливає накладання низькотемпературної плазми. Однак величина цього впливу для кожної сполуки суттєво різниться.

Аналізуючи кожний окремий дифузійний параметр, нами встановлено, що:

- при накладанні напруженості поля коефіцієнт дифузії збільшується в кілька разів. Однак при подальшому збільшенні напруженості зміна коефіцієнта дифузії для речовин є різною. Найбільша вона в атомарного кисню та водню, тоді як його зміна для інших сполук значно менша;

- дія напруженості поля змушує усі досліджувані сполуки направлено рухатися за векторами електромагнітного поля. Найбільшою є швидкість руху в атомарного кисню та водню;

- на значення загального об'ємного коефіцієнта масовіддач накладання напруженості суттєво не впливає, і наявна різниця становить декілька відсотків. Це не стосується пари рухомих молекул, про які згадувалося вище. Додається ще і CO;

- для швидкості масовіддачі вплив накладання напруженості поля є ще більшим. В атомарного водню не відбувається суттєвого збільшення швидкості масовіддачі, тоді як атомарний кисень, навпаки, збільшує свою швидкість масовіддачі. Радикали HO[•] та HO[•] змінюють свою швидкість масовіддачі дуже незначною мірою.

Список використаних джерел

[1] Огляд світового досвіду зниження обсягів антропогенних викидів парникових газів на об'єктах енергетики, М-во енергетики

та вугільної промисловості України, НЕК «Укренерго», Наук.-техн. центр електроенергетики, 2013.

[2] CO₂. Earth is live!! Daily CO₂. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.co2.earth/daily-co2>. Дата звернення: Жовт. 28, 2020.

[3] Global Carbon Atlas. CO₂ Emissions. [Online]. Available: <http://www.globalcarbonatlas.org/ru/CO2-emissions>. Дата звернення: Лип. 28, 2020.

[4] Press release: Special Report on Global Warming of 1.5°C. Incheon, Republic of Korea: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Accessed on: Oct. 7, 2018.

[5] Payal B. Joshi, "Carbon dioxide utilization: a comprehensive review", *Int. J. Chem. Sci.*, no. 12 (4), pp. 1208-1220, 2014.

[6] Xintong Ma, Sirui Li, and Maria Ronda-Lloret, "Plasma assisted catalytic conversion of CO₂ and H₂O over Ni/Al₂O₃ in DBD reactor", *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, no. 39 (1), pp. 109-124, 2019. DOI: 10.1007/s11090-018-9931-1.

[7] Amin Zhou, Dong Chen, Cunhua Ma, Feng Yu, and Bin Dai, "DBD plasma-ZrO₂ catalytic decomposition of CO₂ at low temperatures", *Catalysts*, no. 8, pp. 256-267, 2018. DOI: 10.3390/catal8070256.

[8] R. Snoeckx A. Ozkan, F. Reniers, and A. Bogaerts, "The quest for value-added products from CO₂ and H₂O in a dielectric barrier discharge: a chemical kinetics study", *ChemSusChem*, vol. 10 (2), pp. 409-424, 2016. DOI: 10.1002/cssc.201601234.

[9] X. Zhang, B. J. Lee, H. G. Im, and M. S. Cha, "Ozone production with dielectric barrier discharge: effects of power source and humidity", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, no. 44 (10), pp. 2288-2296, 2016. DOI: 10.1109/TPS.2016.2601246.

[10] Hasliza Bahruji, Michael Bowker, Graham Hutchings, Nikolaos Dimitratos, Peter Wells, Emma Gibson, Wilm Jones, Catherine Brookes, David Morgan, and Georgi Lalev, "Pd/ZnO catalysts for direct CO₂ hydrogenation to methanol", *Journal of Catalysis*, vol. 343, pp. 133-146, 2016. DOI: 10.1016/j.jcat.2016.03.017.

[11] Mun-Sing Fan, Ahmad Zuhairi, and Abdullah Subhash, "Catalytic technology for carbon dioxide reforming of methane to synthe-

- sis gas", *ChemCatChem*, vol. 1, pp. 192-208, 2009.
DOI: 10.1002/cctc.200900025.
- [12] Mehrnoush Khavarian, Siang-Piao Chai, and Abdul Rahman Mohamed, "Carbon dioxide over carbon-based nanocatalyst", *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 13, pp. 4825-4837, 2013.
DOI: 10.1166/jnn.2013.7569.
- [13] А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, и Н. А. Дулькина, *Интенсификация массо-обменных процессов в электрическом поле: монография*. Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011.
- [14] Y. Itikawa, "Cross sections for electron collisions with carbon dioxide", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 31, no. 3, pp. 749-767, 2002.
DOI: 10.1063/1.4913926.
- [7] Amin Zhou, Dong Chen, Cunhua Ma, Feng Yu, and Bin Dai, "DBD plasma-ZrO₂ catalytic decomposition of CO₂ at low temperatures", *Catalysts*, no. 8, pp. 256-267, 2018.
DOI: 10.3390/catal8070256.
- [8] R. Snoeckx A. Ozkan, F. Reniers, and A. Bogaerts, "The quest for value-added products from CO₂ and H₂O in a dielectric barrier discharge: a chemical kinetics study", *ChemSusChem*, vol. 10 (2), pp. 409-424, 2016.
DOI: 10.1002/cssc.201601234.
- [9] X. Zhang, B. J. Lee, H. G. Im, and M. S. Cha, "Ozone production with dielectric barrier discharge: effects of power source and humidity", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, no. 44 (10), pp. 2288-2296, 2016.
DOI: 10.1109/TPS.2016.2601246.
- [10] Hasliza Bahruji, Michael Bowker, Graham Hutchings, Nikolaos Dimitratos, Peter Wells, Emma Gibson, Wilm Jones, Catherine Brookes, David Morgan, and Georgi Lalev, "Pd/ZnO catalysts for direct CO₂ hydrogenation to methanol", *Journal of Catalysis*, vol. 343, pp. 133-146, 2016.
DOI: 10.1016/j.jcat.2016.03.017.
- [11] Mun-Sing Fan, Ahmad Zuhairi, and Abdullah Subhash, "Catalytic technology for carbon dioxide reforming of methane to synthesis gas", *ChemCatChem*, vol. 1, pp. 192-208, 2009.
DOI: 10.1002/cctc.200900025.
- [12] Mehrnoush Khavarian, Siang-Piao Chai, and Abdul Rahman Mohamed, "Carbon dioxide over carbon-based nanocatalyst", *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 13, pp. 4825-4837, 2013.
DOI: 10.1166/jnn.2013.7569.
- [13] А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов, and Н. А. Дулькина. *Intensification of mass transfer processes in an electric field: monograph*. Volgograd, Russia: IUNL VolgGTU, 2011.
- [14] Y. Itikawa, "Cross sections for electron collisions with carbon dioxide", *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 31, no. 3, pp. 749-767, 2002.
DOI: 10.1063/1.4913926.

References

- [1] Review of world experience in reducing anthropogenic greenhouse gas emissions at energy facilities, Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, NEK "Ukrenergo", Sci. and Tech. Center of Electric Power, 2013.
- [2] CO₂. Earth is live!! Daily CO₂. [Online]. Available: <https://www.co2.earth/daily-co2>. Accessed on: Oct. 28, 2020.
- [3] Global Carbon Atlas. CO₂ Emissions. [Online]. Available: <http://www.globalcarbonatlas.org/ru/CO2-emissions>. Accessed on: Oct. 28, 2020.
- [4] Press release: Special Report on Global Warming of 1.5°C. Incheon, Republic of Korea: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Accessed on: Oct. 7, 2018.
- [5] Payal B. Joshi, "Carbon dioxide utilization: a comprehensive review", *Int. J. Chem. Sci.*, no. 12 (4), pp. 1208-1220, 2014.
- [6] Xintong Ma, Sirui Li, and Maria Ronda-Lloret, "Plasma assisted catalytic conversion of CO₂ and H₂O over Ni/Al₂O₃ in DBD reactor", *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, no. 39 (1), pp. 109-124, 2019.
DOI: 10.1007/s11090-018-9931-1.

V. V. Pochynok, *postgraduate student*,
V. M. Viazovik, *Dr.Tech.Sc., associate professor*
e-mail: v.viazovyk@chdtu.edu.ua
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF DIFFUSION PROCESSES IN ELECTROCATALYTIC PROCESSING OF CO₂ IN ORGANIC COMPOUNDS

Modern society emits a large number of various chemical substances into the ambient air. One of these compounds is carbon dioxide. Millions of tons are thrown away every year, and this pace is not decreasing.

All these problems could be solved if an efficient way to use carbon dioxide as a source of carbon in the production of fuel and chemical raw materials is found. The conversion of CO₂ into value-added chemicals and energy sources is considered to be one of the four priority areas of economic development in different countries. Electrocatalytic processing of CO₂ into organic compounds can be used as one of such directions of processing. A peculiarity of this method consists in the use of low-temperature plasma barrier discharge in the presence of a heterogeneous catalyst. An important component of this method is diffusion processes on the catalyst surface, which after a short period of existence of some compounds are best investigated using a mathematical model. Therefore, a mathematical model of diffusion processes on the catalyst surface during electron-catalytic CO₂ processing has been compiled and solved.

Analyzing each individual diffusion parameter, we have found that:

- when the field strength is applied, the diffusion coefficient increases several times;*
- the action of the field strength causes all the studied compounds to move in a direction along the vectors of the electromagnetic field. The greatest is the velocity of atomic oxygen and hydrogen;*
- the value of the total volumetric coefficient of mass transfer is not significantly affected by the superposition of tension, and the available difference is a few percent. This does not apply to hydrogen, oxygen and CO atoms;*
- the rate of mass transfer to atomic oxygen is higher, other compounds do not significantly increase the rate of mass transfer.*

Keywords: *carbon dioxide, electrocatalytic processing, organic compounds, mathematical model, diffusion processes.*

[0000-0003-0401-9836] **О. О. Мислюк**, к.х.н., доцент,

e-mail: o.mysliuk@chdtu.edu.ua

[0000-0001-9329-0577] **О. М. Хоменко**, к.х.н., доцент,[0000-0002-7801-5582] **О. В. Єгорова**, к.т.н.Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

СУЧАСНІ ПРИРОДНІ Й АНТРОПОГЕННІ ЗАГРОЗИ ЕКОЛОГІЧНОМУ БЛАГОПОЛУЧЧЮ ПРІСНОВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

Гідроекологічна ситуація на багатьох водних об'єктах України за останні десятиліття відчутно погіршилася, наслідком чого є порушення рівноваги у гідроекосистемах, погіршення якості води, зменшення різноманіття риб, погіршення їх фізіологічного стану. У світлі зростання антропогенного навантаження на довкілля особливо актуальним є вивчення сучасного стану водних об'єктів для підтримання екологічної рівноваги та забезпечення сталості їх використання і розроблення водоохоронної стратегії. Для комплексного оцінювання екологічної ситуації на водних об'єктах України задля ефективного управління водоохоронною діяльністю на прикладі р. Рось проаналізовано сучасний стан басейну річки, її гідрохімічні характеристики за останні 28 років, досліджено динаміку середньорічної температури повітря в регіоні, розраховано показники якості води за екологічними та гігієнічними критеріями. Пораховано збитки, заподіяні рибному господарству під час масового замору риби у серпні 2018 р. Показано, що основними причинами трансформації водної екосистеми є як природні, так і антропогенні чинники. Вперше дано оцінку екологічному ризику порушення благополуччя водної екосистеми р. Рось за довгостроковий період і показано, що якість води річки незадовільна, і є високий ризик подальшої деградації гідроекосистеми. Найбільший потенційний екологічний ризик порушення екологічної рівноваги у р. Рось, зниження біологічного різноманіття і спрощення трофічної структури становлять сполуки Нітрогену і поліфосфати.

Ключові слова: поверхневі води, трансформація річок, екологічний індекс якості води, коефіцієнт забрудненості, потенційний екологічний ризик.

Вступ. Безпрецедентні темпи потепління, що спостерігаються протягом останніх десятиліть, перевищують природну мінливість настільки, що це широко визнається основною екологічною проблемою не лише серед вчених. Зміна клімату – не єдине джерело стресових факторів, що впливають на водні ресурси та водні екосистеми. Некліматичні фактори, такі як збільшення населення, урбанізація, економічний розвиток, нераціональне використання водних ресурсів, скиди забруднюючих речовин, також становлять виклик сталому використанню ресурсів і цілісності водних екосистем. Поверхневі води України зазнали значної трансформації в результаті регулювання стоку, сегментації русел греблями, зміни структури поверхні водозбору, забруднення стічними водами, зміни гідрологічного режиму тощо. Трансформація водотоків становить загрозу існуванню гідробіонтів [1, 2]. У світлі зростання антропогенного наван-

таження на довкілля особливо актуальним є вивчення сучасного стану водних об'єктів для підтримання екологічної рівноваги та забезпечення сталості їх використання.

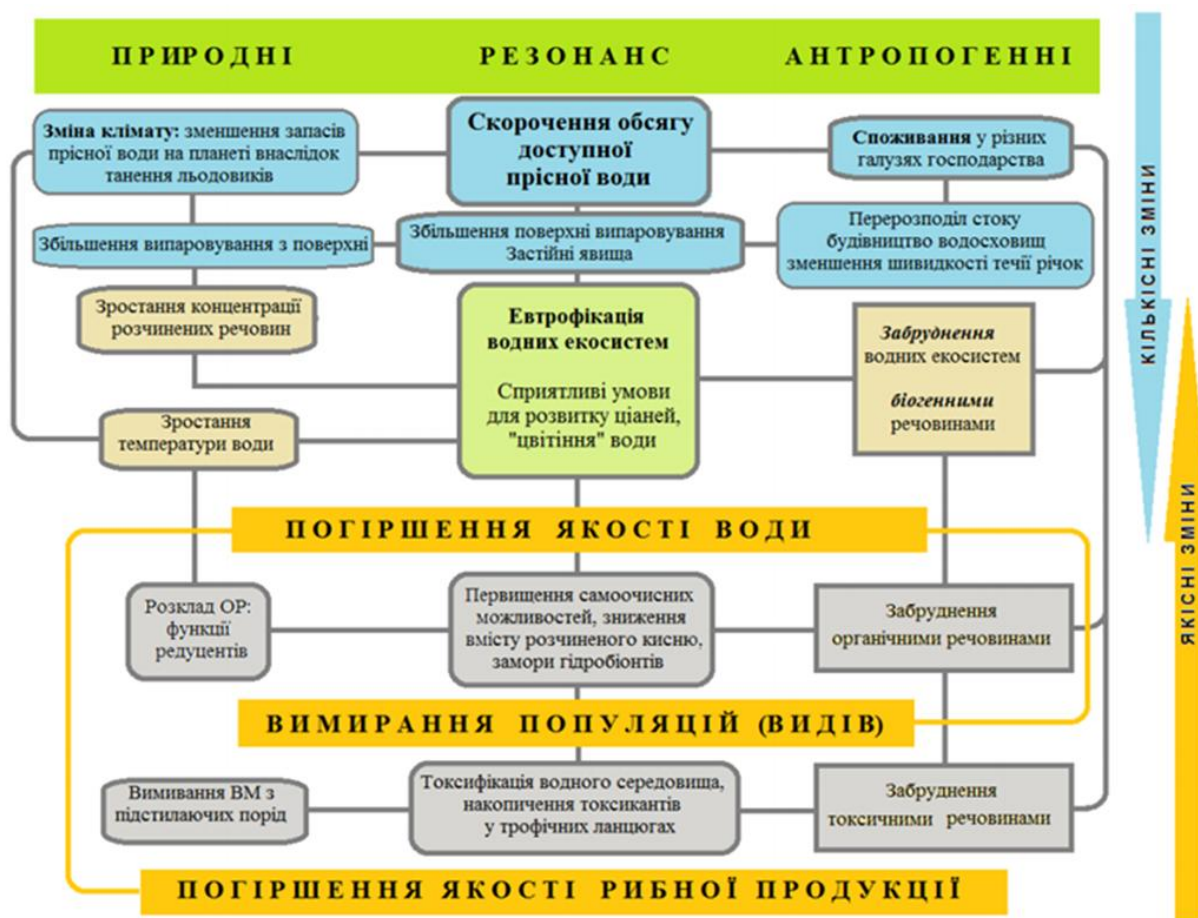
Мета дослідження – аналіз природних і антропогенних загроз екологічному благополуччю поверхневих гідроекосистем на прикладі річки Рось. Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- аналіз природних і антропогенних чинників на стан гідроекосистеми;
- оцінювання стану водних об'єктів за певними критеріями;
- оцінювання ризиків трансформації річок.

Методи досліджень: системний аналіз з використанням науково-методичних основ оцінювання стану водних об'єктів України за певними критеріями і статистичного аналізу даних.

Матеріали і результати досліджень. Сучасні глобальні процеси, зміна клімату, зростаюче антропогенне навантаження спричиняють якісні та кількісні зміни у прісноводних

екосистемах (рисунк 1), наслідком чого є порушення рівноваги у гідроекосистемах, погіршення якості води, зменшення різноманіття риб і погіршення їх фізіологічного стану [3].



Рисунк 1 – Зміни у прісноводних екосистемах в результаті дії глобальних процесів

Зростання антропогенного навантаження на довкілля призводить до змін кліматичних умов (глобальне зростання температури і, як наслідок, збільшення випаровуваності з поверхні водойм, перерозподіл кількості атмосферних опадів як за сезонами, так і у просторі), від яких залежить гідрологічний режим водойм. Клімат є надзвичайно важливим фактором екосистемних процесів загалом, але особливо в прісноводних екосистемах, оскільки їх тепловий та гідрологічний режими тісно пов'язані з кліматом [4]. У звіті про оцінювання змін клімату [5] відзначено, що період з 1983 по 2012 рр. був найтеплішим за останні 140 років у Північній півкулі. Починаючи з 1950 р., екстремуми з високою температурою (спекотні дні, тропічні ночі та спекотні хвилі) почастишали, тоді як екстремуми з низькою температурою (похолодання, дні

з морозами) стали рідшими. Починаючи з 1950 р., річна кількість опадів зростала в Північній Європі (до +70 мм/десятиліття) і зменшувалася в деяких районах Південної Європи [6]. На думку багатьох вчених, такі зміни клімату становлять загрозу глобальному біорізноманіттю та функціонуванню місцевих екосистем [4, 7-8].

Швидкість підвищення температури повітря в Україні випереджає світові тенденції (за 30 останніх років підвищилася на 1,2 °C). Аналіз метеоданих, проведений нами за період 1813–2019 рр., показує, що у другій половині XX ст. в Україні спостерігається значне зростання температури повітря (рисунки 2–3). Починаючи з 1991 р., кожне наступне десятиліття було теплішим за попереднє: 1991–2000 рр. – на 0,5 °C, 2001–2010 рр. – на 1,2 °C, 2011–2019 рр. – на 1,7 °C [9].

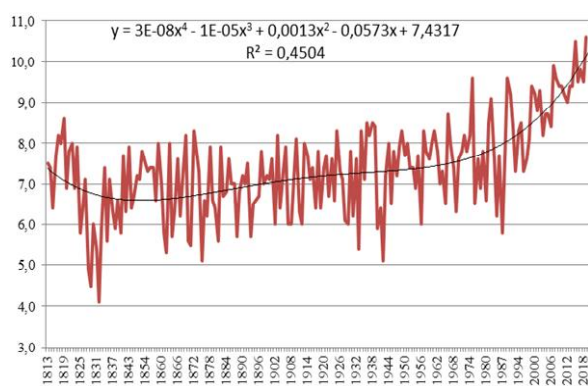


Рисунок 2 – Динаміка середньорічної температури повітря в Україні (1813–2019 рр.)

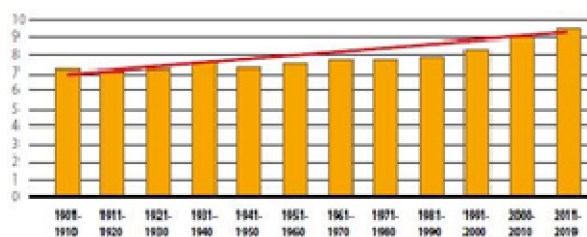


Рисунок 3 – Динаміка температури повітря в Україні за десятиліттями (1901–2019 рр.) [9]

На фоні зростання температури кількість опадів характеризується нерівномірним розподілом у часі (особливо влітку) і територіально. Підвищення температури повітря призводить до підвищення температури води річок. Зміна теплових характеристик водойм принципово змінює екологічні процеси, зокрема, зниження вмісту розчиненого кисню, і відбивається на умовах існування гідробіонтів.

На прісноводні екосистеми значно впливають і інші джерела стресу, зокрема антропогенні (зарегульованість річок, скиди стічних вод без очищення, стоки з сільськогосподарських угідь). Поверхневі й підземні водні ресурси є високочутливими водними системами до забруднювачів через їх доступність до багатоточкових та неточкових джерел забруднення. Особливо значні порушення екологічної рівноваги спостерігаються у водотоках, що протікають територіями міст та районів з активним розвитком сільського господарства [10].

Зростання температури води, зменшення швидкості течії водотоків, надходження у водойми критичної кількості біогенних елементів призводять до інтенсифікації процесів евтрофікації, що зумовлює порушення екологічної рівноваги у водоймах, погіршення умов існування гідробіонтів, замор риби. Заморні

процеси іхтіофауни спостерігаються по всьому світу [11-14], не є винятком і Черкащина. За даними Управління Державного агентства рибного господарства, у Черкаській області кількість іхтіофауни, що загинула за останні 15 років, становила понад 1 млн екземплярів (таблиця 1).

Таблиця 1 – Замор іхтіофауни у водоймах Черкаської області

Рік	Загибло, тис. екз.	Рік	Загибло, тис. екз.
2006	2,3	2013	16,0
2007	34,0	2014	29,5
2009	40,4	2015	290,8
2010	134,3	2016	25,3
2011	12,0	2017	171,7
2012	3,8	2018	242,2

Для комплексного оцінювання екологічної ситуації на водних об'єктах України задля ефективного управління водоохоронною діяльністю, на прикладі р. Рось проаналізовано сучасний стан басейну річки, її гідрохімічні характеристики за останні 28 років, досліджено динаміку середньорічної температури повітря, розраховано показники якості води за екологічними і гігієнічними критеріями. Пораховано збитки, заподіяні рибному господарству під час найбільшого за масштабами замору риби у серпні 2018 р.

Басейн річки Рось розташований на правобережній Придніпровській височині на території Київської, Вінницької, Житомирської і Черкаської областей. Річка має високу зарегульованість стоку і, як наслідок, уповільнений водообмін. Висока розораність території басейну річки, значний забір води, скиди стічних вод підприємств, особливо господарсько-побутових (переважно неочищених або недостатньо очищених), поверхневі стоки з сільськогосподарських угідь – все це призводить до періодичного порушення екологічної рівноваги, особливо у маловодні роки [15, 16], і, як наслідок, до масового замору іхтіофауни (таблиця 2).

Збитки внаслідок замору іхтіофауни у серпні 2018 р. біля с. Яблунівка, розраховані нами за методикою [17], становили понад 285 млн грн.

Аналіз метеоумов у регіоні показав, що, починаючи з 1991 р., кожне наступне десяти-

ліття було теплішим за попереднє (рисунок 4), що, звичайно, призводило і до збільшення температури води, особливо влітку. Температура впливає на процеси евтрофікації; вона визначає ступінь насичення води киснем; температурний профіль впливає на інтенсивність вертикальної турбулентності і перенесення біогенів з придонних областей.

Таблиця 2 – Замор іхтіофауни на р. Рось

Дата	Зона замору	Кількість, тис. екземплярів
08.06.2007	2,3 км	плітка – 10,3; верховодка – 5,1; бичок – 2,1; лящ – 1,9; окунь – 0,9. Всього – 20,4
15.08.2014	0,4 га	окунь – 8,4; плітка – 3,6; щука – 1,2; бичок – 1,2. Всього – 14,4
13.08.2018	12 км	плоскирка – 98; окунь – 94; щука – 16; сом – 14; лящ – 6; судак – 6; лин – 4; раки – 2. Всього – 240
11.09.2018	1 км	окунь – 1,9; щука – 0,2; раки – 0,1. Всього – 2,2

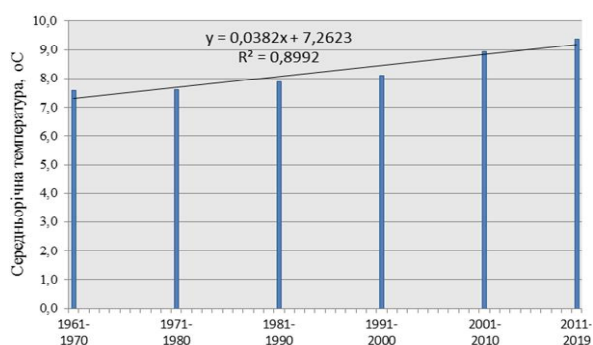


Рисунок 4 – Динаміка середньорічної температури повітря в Черкаській області (1961–2019 рр.)

Спекотна погода влітку 2018 р. (рисунок 5) і несанкціонований скид стічних вод у річку спричинили різке погіршення якості води. Особливо небезпечна ситуація спостерігалася за вмістом кисню (рисунок 6). Аналіз статистичних даних [18] моніторингу якості води за розчинним киснем (рисунки 7–8) за останні 28 років на постах спостережень (ПС) вище смт Стеблів (ПС 1) і нижче за течією м. Корсунь-Шевченківський (ПС 2) показав, що концентрація кисню коливалася в межах від 2,8 до 14,3 мг/дм³ при середньому значенні 8,2 мг/дм³ на ПС 1, і від 2,0 до 17,7 мг/дм³ при середньому значенні 8,1 мг/дм³ на ПС 2.

© О. О. Мислюк, О. М. Хоменко, О. В. Єгорова, 2020
DOI: 10.24025/2306-4412.4.2020.216090



Рисунок 5 – Метеоумови у Черкаській області у 2018 р.

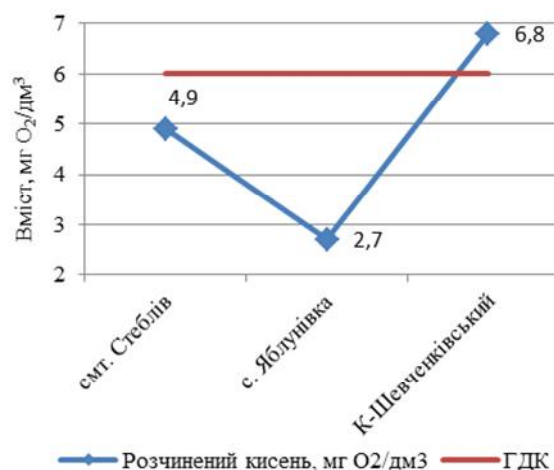


Рисунок 6 – Концентрація кисню у воді під час масового замору риби

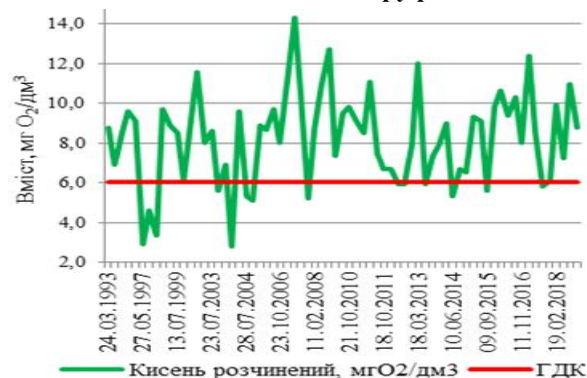


Рисунок 7 – Динаміка концентрації кисню на ПС 1

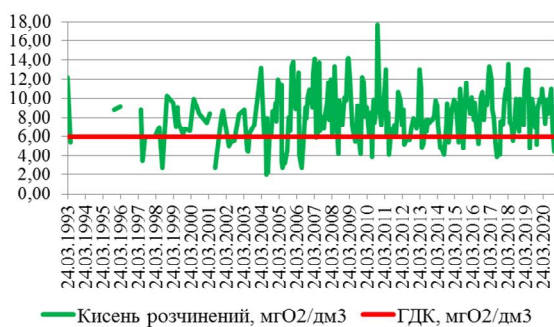
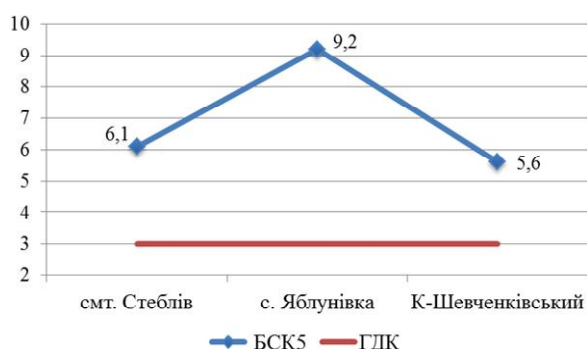


Рисунок 8 – Динаміка концентрації кисню на ПС 2

На ПС 1 і ПС 2 цей показник також перевищував нормативне значення і становив 6,1 і 5,6 мг/дм³ відповідно (при усереднених багаторічних значеннях 2,7 мг/дм³). Високі значення БСК₅, імовірно, зумовлені скидами стічних вод міст і тваринницьких ферм, які містять органічні сполуки (рисунок 9). Рівень органічного забруднення річки є результатом протидії двох процесів: надходження забруднюючих речовин та природного очищення водотоку. Під час масового замору риби токсичне органічне навантаження було настільки потужним, що здатність річки до самоочищення різко знизилася.

Рисунок 9 – БСК₅ в зоні замору риби, мг/дм³

Уявлення про високий рівень забруднення води р. Рось органічними і неорганічними речовинами, зокрема сполуками Нітрогену, дає й інший показник – хімічне споживання кисню (рисунок 10). Значне перевищення нормативу за ХСК також є свідченням того, що річка зазнала значного забруднення.

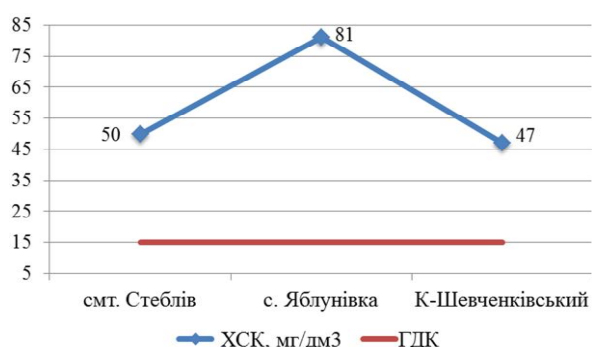
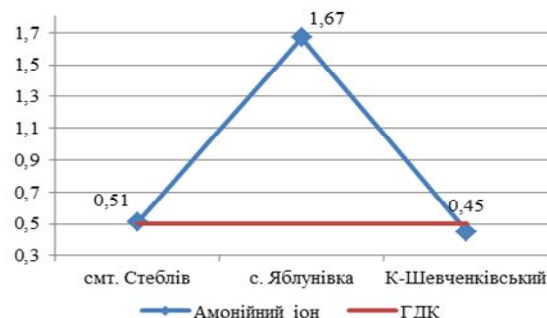
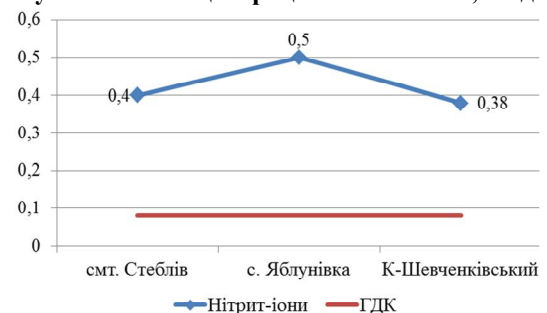


Рисунок 10 – Значення ХСК в зоні замору риби

Концентрація амоній-іону під час замору риби перевищувала ГДК у 3,3 разу (рисунок 11), нітрит-іону – у 6,3 разу (рисунок 12). Вміст нітратів не перевищував ГДК=40 мг/дм³ і становив 3,8; 5,4; 3,2 мг/дм³ на ПС 1, біля Яблунівки та на ПС 2 відповідно.

Рисунок 11 – Концентрація іонів амонію, мг/дм³Рисунок 12 – Концентрація нітрит-іонів, мг/дм³

Слід зазначити, що на цьому відрізку річки періодично фіксуються перевищення ГДК за амонійним і нітрит-іонами (рисунки 13–16).

Зазвичай нітрит-іони наявні в поверхневих водних об'єктах в незначних кількостях завдяки їх здатності легко окиснюватися до нітратів. Велика концентрація нітрит-іонів у р. Рось є результатом значного дефіциту кисню і свідчить про нещодавнє забруднення нітрогеновмісними сполуками в результаті несанкціонованого скиду стічних вод.

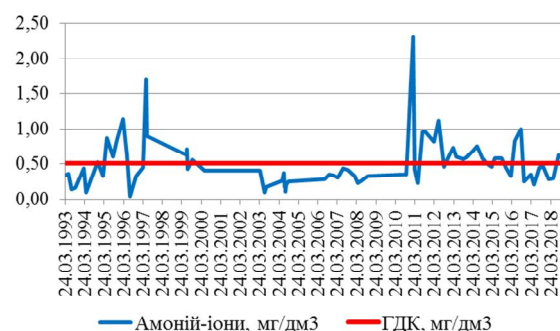


Рисунок 13 – Концентрація іонів амонію на ПС 1

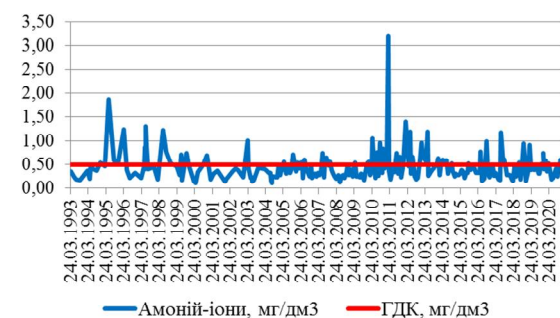


Рисунок 14 – Концентрація іонів амонію на ПС 2

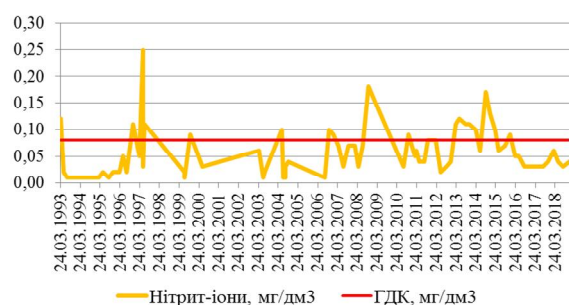


Рисунок 15 – Концентрація нітрит-іонів на ПС 1

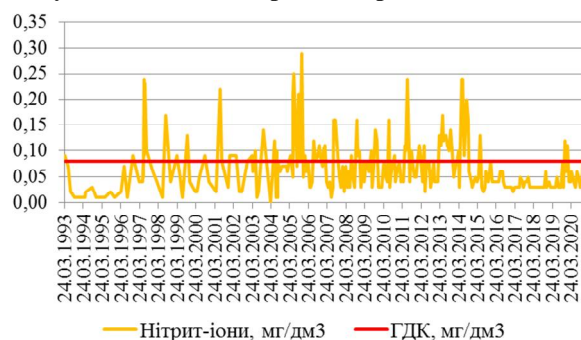


Рисунок 16 – Концентрація нітрит-іонів на ПС 2

Посилення процесів евтрофікації водойм спричиняє надмірне навантаження фосфатами. За даними перевірки якості води, під час замору риби вміст фосфатів на ПС 1, біля с. Яблунівка і на ПС 2 становив 2, 3,5 і 2,3 мг/дм³ відповідно. Аналіз багаторічних даних показав, що вміст фосфатів змінювався від 0,10 до 1,34 при середньому значенні 0,61 мг/дм³ на ПС 1 і від 0,06 до 6,80 при середньому значенні 0,67 мг/дм³ на ПС 2.

Погіршення якості води р. Рось зумовлено і високим вмістом нафтопродуктів (рис. 17).

Екологічне оцінювання якості поверхневих вод р. Рось за методикою [19] показало, що якість води на ПС 1 і ПС 2 оцінюється як перехідна між слабо і помірно забрудненою, в зоні замору риби – помірно забруднена з переходом у слабо забруднену (3-й клас якості води).

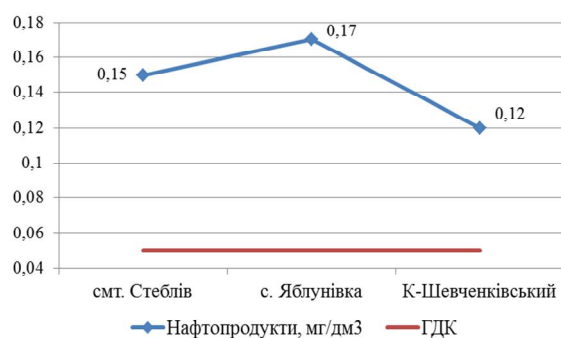


Рисунок 17 – Концентрація нафтопродуктів

За коефіцієнтом забруднення, розрахованим за методикою [20], вода на ПС 1 оцінюється як помірно забруднена ($K_3=2,6$), в зоні замору риби – брудна ($K_3=6,8$), на ПС 2 – слабо забруднена ($K_3=2,1$). Основним показником, який найбільше вплинув на погіршення якості води в зоні замору риби, був вміст розчинного кисню (37 ГДК), вище за течією на ПС 1 – нітрит-іони (5 ГДК), розчинний кисень (4,3 ГДК), ХСК (3,3 ГДК), нафтопродукти (3 ГДК), БСК₅ (2 ГДК), фосфат-іони (2 ГДК), нижче за течією на ПС 2 – нітрит-іони (4,75 ГДК), ХСК (3,1 ГДК), нафтопродукти (2,4 ГДК), фосфат-іони (2 ГДК), БСК₅ (1,9 ГДК) (рис. 18).

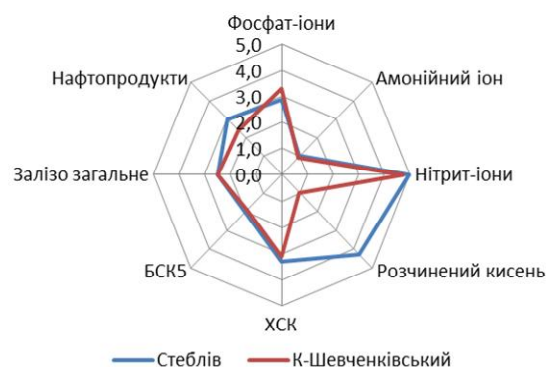


Рисунок 18 – Зміна за течією показників якості води (кратність перевищення ГДК)

Імовірність подальшого порушення екологічного добробуту, трансформацію екосистеми, зменшення біологічного різноманіття визначали за показником екологічного ризику. Для розрахунку брали показники, які перевищують верхню межу 3-ї категорії якості води екологічного нормативу [21].

За сумарним екологічним ризиком ($R=0,63$) вода річки Рось оцінюється як забруднена (4-й клас), існує значний потенційний ризик порушення екологічної рівноваги і подальшої деградації гідроекосистеми. Найбільшу небезпеку становлять фосфат- і нітрит-іони (рис. 19).

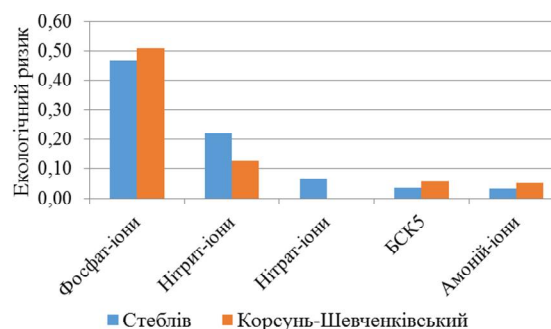


Рисунок 19 – Ранжування показників на ПС 1 і ПС 2 за даними багаторічних спостережень

Якщо перші свідчать про первинне зовнішнє забруднення р. Рось переважно комунально-побутовими стоками, то другі – про вторинне забруднення в результаті процесів, що відбуваються в самих водоймах внаслідок погіршення кисневого режиму водойми, зумовленого надмірним надходженням біогенних елементів (сполук Нітрогену і Фосфору).

Проблема забруднення фосфатами характерна для більшості річок в Україні, зокрема, вміст фосфатів у р. Дніпро за період з 2010 по 2017 рр. збільшився більш ніж удвічі [22].

Необхідна розробка адекватної та надійної управлінської стратегії комплексного використання водних ресурсів і впровадження проактивних заходів задля мінімізації ризиків деградації гідроекосистем, що сприятиме екологічному благополуччю водотоків та збереженню біорізноманіття гідробіонтів.

У розвинених країнах забруднення річок історично зменшувалось завдяки поєднанню екологічного регулювання та широко-масштабного очищення стічних вод. Середня концентрація фосфату в європейських річках майже вдвічі зменшилася за період 1992–2017 рр. (рисунк 20), а в багатьох річках це зменшення розпочалося у 1980-х роках [23].

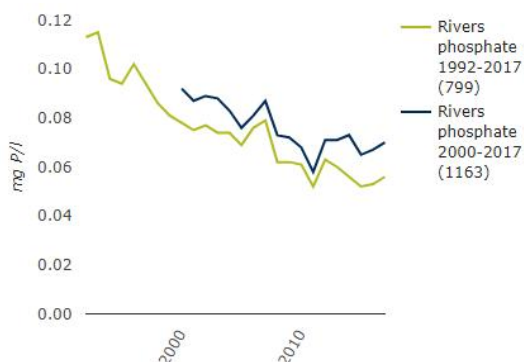


Рисунок 20 – Динаміка зміни вмісту фосфатів у річках Європи

Джерело: наводиться за [23]

У середньому концентрація зменшується на 1,6 % на рік. Зниження фосфатів у річках пов'язане із заходами, запровадженими національним та європейським законодавством, зокрема Директивою про очищення міських стічних вод [24], яка передбачає виведення з них поживних речовин. Крім того, зниженню концентрації фосфору сприяв перехід на безфосфатні миючі засоби. В Україні також потрібні скоординовані зусилля, що поєднують інноваційні та доступні за ціною ме-

тоди очищення стічних вод з інтегрованим управлінням водокористуванням, цілеспрямованою економічною політикою та формуванням екологічної свідомості споживачів води.

Висновки. Негативні зміни у функціонуванні прісноводних екосистем вимагають постійного моніторингу стану водних об'єктів і ґрунтового аналізу причин погіршення ситуації з метою своєчасного запобігання порушенню екологічної рівноваги.

Проведений системний аналіз стану р. Рось показав, що найбільшу небезпеку погіршення екологічного стану гідроекосистеми становлять надмірне надходження у водне середовище біогенних елементів та спекотна погода, яка спричиняє посилення евтрофікаційних процесів.

Вперше дано оцінку екологічному ризику порушення благополуччя водної екосистеми та спрощенню трофічної структури р. Рось за довгостроковий період і показано, що стан якості води річки незадовільний, є високий потенційний ризик порушення екологічної рівноваги і подальшої трансформації екосистеми річки.

Розроблення адекватної та надійної управлінської стратегії є ключовим для збереження рівноваги водних екосистем і умов існування гідробіонтів. Проактивні зусилля з управління дадуть можливість мінімізувати ризики для гідроекосистеми і можуть бути менш затратними, ніж реактивні зусилля, що застосовуються лише після виникнення проблем. Попередження трансформації поверхневих вод сприятиме екологічному благополуччю гідроекосистем і збереженню їх біорізноманіття.

Список використаних джерел

- [1] М. Ю. Євтушенко, "Відновна іхтіоекологія як науковий напрям розвитку рибництва внутрішніх водойм України", *Рибогосподарська наука України*, № 3, с. 88-91, 2010.
- [2] П. Я. Пукало, Л. М. Дармограй, Л. Я. Божик, та Н. Я. Васерук, "Актуальність відтворення аборигенної іхтіофауни водойм України", *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С. Гжицького*, т. 18, № 2 (67), с. 216-218, 2016.
- [3] Ю. Р. Гроховська, "Екологічний резонанс як відгук екосистеми на антропогенний вплив", на *VIII Всеукр. наук.-*

- прат. конф. з міжнар. участю Біологічні дослідження-2017: зб. наук. пр., Житомир, 2017, с. 197-199.
- [4] F. Pletterbauer, A. Melcher, and W. Graf, "Climate change impacts in riverine ecosystems", in *Riverine Ecosystem Management. Science for Governing Towards a Sustainable Future?* J. Schmutz and A. Sendzimir, Eds., Aquatic Ecology Series, Cham, Switzerland: Springer, 2018, vol. 8, pp. 203-223.
- [5] D. L. Hartmann, A. M. G. K. Tank, and M. Rusticucci, "IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis", IPCC, 2014.
- [6] "Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report", European Environment Agency, 2017.
- [7] Dejene W. Sintayehu, "Impact of climate change on biodiversity and associated key ecosystem services in Africa: a systematic review", *Ecosystem Health and Sustainability*, vol. 4, iss. 9, pp. 225-239, 2018.
- [8] Sarahi Nunez, Eric Arets, Rob Alkemade, Caspar Verwer, and Rik Leemans, "Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2 °C enough?", *Climatic Change*, no. 154, pp. 351-365, 2019.
- [9] Як змінюється клімат в Україні. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/news/35246.html>. Дата звернення: Лист. 05, 2020.
- [10] Д. Є. Решетняк, "Методи оцінювання антропогенних загроз біорізноманіттю прісноводних екосистем", *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: геологія, географія*, т. 25, вип. 19, с. 71-79, 2017.
- [11] Л. О. Герасимчук, Р. А. Валерко, та Л. І. Гребенчук, "Державний контроль за випадками масового замору риби на водоймах Житомирської області", *Водні біоресурси та аквакультура*, № 2, с. 6-20, 2018.
- [12] Й. В. Гриб, О. М. Климнюк, І. Ю. Бузевич, та М. А. Михальчук, "Особливості формування кисневого режиму заморних водойм, складу аборигенної іхтіофауни в підлідний період і її відновлення", *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сільськогосподарські науки*, вип. 1 (69), с. 133-152, 2015.
- [13] О. В. Рибалова, та С. В. Бєлан, "Аналіз причин виникнення надзвичайних ситуацій масової загибелі риби в Харківській області", *Східно-Європейський журнал передових технологій*, № 6/10 (60), с. 17-21, 2012.
- [14] О. В. Степова, та В. В. Рома, "Аналіз впливу змін кліматичних умов на кисневий режим річки Псел", *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, № 2, с. 113-119, 2018.
- [15] В. К. Хільчевський, С. М. Курило, С. С. Дубняк, В. М. Савицький, та М. Р. Забокрицька, *Гідроекологічний стан басейну річки Рось: монографія*. Київ: Ніка-Центр, 2009.
- [16] Водні ресурси в басейні річки Рось. Басейнове управління водних ресурсів річки Рось. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://rovrosi.gov.ua/vodni-resursi-v-basejni-richki-ros.html>. Дата звернення: Лист. 05, 2020.
- [17] Методика розрахунку збитків, заподіяних рибному господарству внаслідок порушення правил рибальства та охорони водних живих ресурсів: Наказ 12.07.2004 № 248/273. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1446-04>. Дата звернення: Лист. 06, 2020.
- [18] Дані моніторингу вод та ґрунтів Черкаського РУВР Дніпровського БУВР. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://openenvironment.org.ua/water/>. Дата звернення: Лист. 03, 2020.
- [19] А. В. Гриценко, О. Г. Васенко, Г. А. Верніченко та ін., *Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями*. Харків: УкрНДІП, 2012.
- [20] Організація та здійснення спостережень за забрудненням поверхневих вод (в системі Мінекоресурсів) КНД211.1.1.106. Київ, 2003.
- [21] O. Rybalova, and S. Artemiev "Development of a procedure for assessing the environmental risk of the surface water status deterioration", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, iss. 10 (89), pp. 67-76, 2017.
- [22] Про фосфати, фосфонати та проблеми забруднення водойм в Україні. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.davr.gov.ua/pro-fosfati-fosfonati-ta-problemi-zabrudnennya>

- vodojm-v-ukraini. Дата звернення: Лист. 16, 2020.
- [23] Nutrients in freshwater in Europe. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/nutrients-in-freshwater/nutrients-in-freshwater-assessment-published-9>. Дата звернення: Лист. 16, 2020.
- [24] The Urban Waste Water Treatment Directive (UWWTD): Council Directive 91/271/EEC concerning urban waste-water treatment. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31991L0271>. Дата звернення: Лист. 16, 2020.
- ### References
- [1] M. Yu. Yevtushenko, "Restorative ichthyology as a scientific direction of fish farming development of inland waters of Ukraine", *Rybohospodarska nauka Ukrainy*, no. 3, pp. 88-91, 2010. [in Ukrainian].
- [2] P. Ya. Pukalo, L. M. Darmohray, L. Ya. Bozhyk, and N. Ya. Vaseruk, "Topicality of native fish fauna reproduction of Ukraine reservoirs", *Naukovyi visnyk LNUVMBT im. S. Gzhytskoho*, vol. 18, no 2 (67), pp. 216-218, 2016. [in Ukrainian].
- [3] Ju. R. Grohovs'ka, "Ecological resonance as a response of the ecosystem to anthropogenic impact", in *VIII All-Ukr. Sci.-Pract. Conf. with Int. Participation Biological research-2017*: coll. of sci. works, Zhytomyr, 2017, pp. 197-199. [in Ukrainian].
- [4] F. Pletterbauer, A. Melcher, and W. Graf, "Climate change impacts in riverine ecosystems", in *Riverine Ecosystem Management. Science for Governing Towards a Sustainable Future?* J. Schmutz and A. Sendzimir, Eds., Aquatic Ecology Series, Cham, Switzerland: Springer, 2018, vol. 8, pp. 203-223.
- [5] D. L. Hartmann, A. M. G. K. Tank, and M. Rusticucci, "IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis", IPCC, 2014.
- [6] "Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report", European Environment Agency, 2017.
- [7] Dejene W. Sintayehu, "Impact of climate change on biodiversity and associated key ecosystem services in Africa: a systematic review", *Ecosystem Health and Sustainability*, vol. 4, iss. 9, pp. 225-239, 2018.
- [8] Sarahi Nunez, Eric Arets, Rob Alkemade, Caspar Verwer, and Rik Leemans, "Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2 °C enough?", *Climatic Change*, no. 154, pp. 351-365, 2019.
- [9] How the climate in Ukraine is changing. [Online]. Available: <https://mepr.gov.ua/news/35246.html>. Accessed on: Lyst. 05, 2020.
- [10] D. Ye. Reshetniak, "Methods for assessing anthropogenic threats to freshwater ecosystems biodiversity", *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya: heolohiia, heohrafiia*, vol. 25, iss. 19, pp. 71-79, 2017. [in Ukrainian].
- [11] L. O. Herasymchuk, R. A. Valerko, and L. I. Hrebenchuk, "State control over cases of mass slaughter of fish in reservoirs of Zhytomyr region", *Vodni bioresursy ta akvakultura*, no. 2, pp. 6-20, 2018. [in Ukrainian].
- [12] Y. V. Hryb, O. M. Klymniuk, I. Yu. Buzevych, and M. A. Myhalchuk, "Features of formation of an oxygen mode of fish fatigue reservoirs, structure of aboriginal ichthyofauna in the subglacial period and its restoration", *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Silskohospodarski nauky*, iss. 1 (69), pp. 133-152, 2015. [in Ukrainian].
- [13] O. V. Rybalova, and S. V. Bjelan, "Analysis of the causes of emergencies of mass death of fish in the Kharkiv region", *Shidno-Jevropejs'kyj zhurnal peredovyh tehnologij*, no. 6/10 (60), pp. 17-21, 2012. [in Ukrainian].
- [14] O. V. Stepova, and V. V. Roma, "Analysis of the influence of changes in climatic conditions on the oxygen regime of the river Psel", *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, no. 2, pp. 113-119, 2018. [in Ukrainian].
- [15] V. K. Khilchevskyi, S. M. Kurylo, S. S. Dubniak, V. M. Savytskyi, and M. R. Zabokrytska, *Hydroecological condition of the Ros river basin*: monograph. Kyiv: Nika-Tsentr, 2009. [in Ukrainian].
- [16] Water resources in the basin of the river Ros. Basin management of water resources of the river Ros. [Online]. Available: <https://rovrosi.gov.ua/vodni-resursi-v>

- basejni-richki-ros.html. Accessed on: Nov. 05, 2020.
- [17] Methods for calculating the damage caused to fisheries due to violations of the rules of fisheries and protection of aquatic living resources: Order 12.07.2004 № 248/273. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1446-04>. Accessed on: Nov. 06, 2020.
- [18] Water and soil monitoring data of Cherkasy Regional Department of Internal Affairs of Dniprovsky District Department of Internal Affairs. [Online]. Available: <http://openenvironment.org.ua/water/>. Accessed on: Nov. 03, 2020.
- [19] A. V. Grycenko, O. G. Vasenko, G. A. Vernichenko et al., *Methods of ecological assessment of surface water quality by relevant categories*. Hharkiv: UkrNDIEP, 2012. [in Ukrainian].
- [20] Organization and implementation of observations of surface water pollution (in the system of the Ministry of Energy and Natural Resources) KND211.1.1.106. Kyiv, 2003. [in Ukrainian].
- [21] O. Rybalova, and S. Artemiev "Development of a procedure for assessing the environmental risk of the surface water status deterioration", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, iss. 10 (89), pp. 67-76, 2017.
- [22] About phosphates, phosphonates and problems of water pollution in Ukraine. [Online]. Available: <https://www.davr.gov.ua/pro-fosfati-fosfonati-ta-problemi-zabrudnennya-vodojm-v-ukraini>. Accessed on: Nov. 16, 2020.
- [23] Nutrients in freshwater in Europe. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/nutrients-in-freshwater/nutrients-in-freshwater-assessment-published-9>. Accessed on: Nov. 16, 2020.
- [24] The Urban Waste Water Treatment Directive (UWWTD): Council Directive 91/271/EEC concerning urban waste-water treatment. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31991L0271>. Accessed on: Nov. 16, 2020.

O. O. Myslyuk, Ph.D., associate professor,
e-mail: o.mysliuk@chdtu.edu.ua

O. M. Khomenko, Ph.D., associate professor,
O. V. Yehorova, Ph.D.

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

CURRENT NATURAL AND ANTHROPOGENIC THREATS TO ECOLOGICAL WELL-BEING OF FRESHWATER ECOSYSTEMS

The hydroecological situation on many water bodies on the territory of Ukraine has significantly deteriorated in recent decades, resulting in imbalances in hydroecosystems, deterioration of water quality, reduction of fish diversity and degradation of its physiological condition. In the light of the growing anthropogenic pressure on the environment, it is especially important to study the current state of water bodies to maintain ecological balance and ensure the sustainability of their use and to develop the water protection strategies. In order to comprehensively assess the ecological situation on water bodies of Ukraine for effective management of water protection activities on the example of the Ros river, the current state of the river basin, its hydrochemical characteristics over the past 28 years have been analyzed, the dynamics of average annual air temperature in the region has been studied, the water quality indicators by ecological and hygienic criteria have been calculated. The losses caused to fisheries during the mass slaughter of fish in August 2018 have been calculated. It is shown that both natural (climate change) and anthropogenic (high river control, specific features of the Stebliv Reservoir dam, high plowing of the river basin, systematic entry of pollutants into the

aquatic environment from municipal and industrial enterprises and wastewater from agricultural lands) factors are the main reasons for the transformation of the aquatic ecosystem. For the first time, the ecological risk of affecting the well-being of the aquatic ecosystem of the Ros river has been assessed for the long term and it has been shown that the river water quality is unsatisfactory and there is a high risk of further degradation of the hydroecosystem. The greatest potential ecological risk of affecting the ecological well-being in the Ros river, reducing biodiversity and simplifying the trophic structure, comes from nitrogen compounds and polyphosphates. It is necessary to develop an adequate and reliable management strategy for the integrated use of water resources and implementation of proactive measures to minimize the risks of transformation of rivers hydroecosystems, which will contribute to their revival, environmental well-being and conservation of aquatic organisms biodiversity.

Keywords: *surface waters, rivers transformation, ecological index of water quality, pollution index, potential ecological risk.*

УДК 614.841:536.46

[0000-0002-5670-6788] **Р. Б. Мотрічук¹**,

e-mail: r.motrichuk@gmail.com

[0000-0002-0240-1807] **О. В. Кириченко¹**, *д.т.н., професор*,

e-mail: okskir@meta.ua

[0000-0003-0722-9353] **В. А. Вашенко²**, *д.т.н., професор*,

e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua

[0000-0002-0234-8655] **С. О. Колінько²**, *к.ф.-м.н., доцент*,

e-mail: s.kolinko@chdtu.edu.ua

[0000-0003-3065-5772] **Т. І. Бутенко²**, *к.т.н., доцент*,

e-mail: but82016@gmail.com

[0000-0002-2373-2429] **Є. П. Кириченко¹**,

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

[0000-0002-2805-572X] **В. В. Цибулін²**

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України,

вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

²Черкаський державний технологічний університет,

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

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ТА СКЛАД ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛЕВИХ СУМІШЕЙ

Представлено результати термодинамічних розрахунків залежностей температури та складу продуктів згоряння піротехнічних сумішей з порошків магнію та нітрату калію від коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,1 \dots 3,0$, величини органічної добавки $\epsilon = 5 \dots 20\%$ і зовнішнього тиску $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$ Па, що визначають вибухонебезпечні режими їх згоряння. Дослідження проводилися за допомогою методів термодинамічного аналізу процесів горіння сумішей з урахуванням фазової нерівноважності їх продуктів згоряння. За даними термодинамічного розрахунку температура продуктів згоряння істотно залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача в суміші та тиску і має максимум. З даних термодинамічних розрахунків температури продуктів згоряння сумішей магній + нітрат калію + парафін, стеарин, нафталін, антрацен впливає, що введення добавок розглядуваних органічних речовин у суміш магнію з нітратом натрію не призводить до істотної зміни загального характеру залежності температури продуктів згоряння від коефіцієнта надлишку окиснювача і тиску для подвійної суміші.

Ключові слова: *піротехнічні суміші, термодинамічні розрахунки, нітратовмісний окиснювач, металеве пальне, процеси горіння, пожежна безпека.*

Вступ. Важливими властивостями піротехнічних нітратно-металевих сумішей (ПНМС), що визначають їх пожежну небезпеку для оточуючих об'єктів, є температура та склад їх продуктів згоряння (особливо високотемпературні конденсовані продукти (конденсат)), які можна регулювати, наприклад, шляхом зміни співвідношення компонентів у системі, зовнішнього тиску, складу навколиш-

нього середовища та ін. [1–7]. Це дає можливість на стадії проектування виробів на основі зазначених сумішей прогнозувати такі важливі діапазони зміни температури та складу продуктів згоряння [8–14] – області з максимальною температурою, для яких може здійснюватися стабільний, стійкий процес горіння, коли суміш, що запалала, є потенційно пожежонебезпечною для навколишнього середовища

(рисунок 1). Водночас високі температури горіння ПНМС і хімічна активність продуктів згоряння нині практично виключають можливість безпосереднього вимірювання цих параметрів. Тому нині використовуються термодинамічні методи розрахунку температури та складу продуктів згоряння різних паливних систем піротехнічного типу [1, 2, 5, 15]. Як

показують наявні розрахунки та їх зіставлення з окремими експериментальними даними (двокомпонентні суміші Al, Ti, Zr з NaNO_3 [16–20], температури горіння яких можуть досягати 3000...4500 K), відмінності між ними не перевищують 9...12 %, що вказує на близькість дійсного процесу горіння системи до ідеального рівноважного процесу.

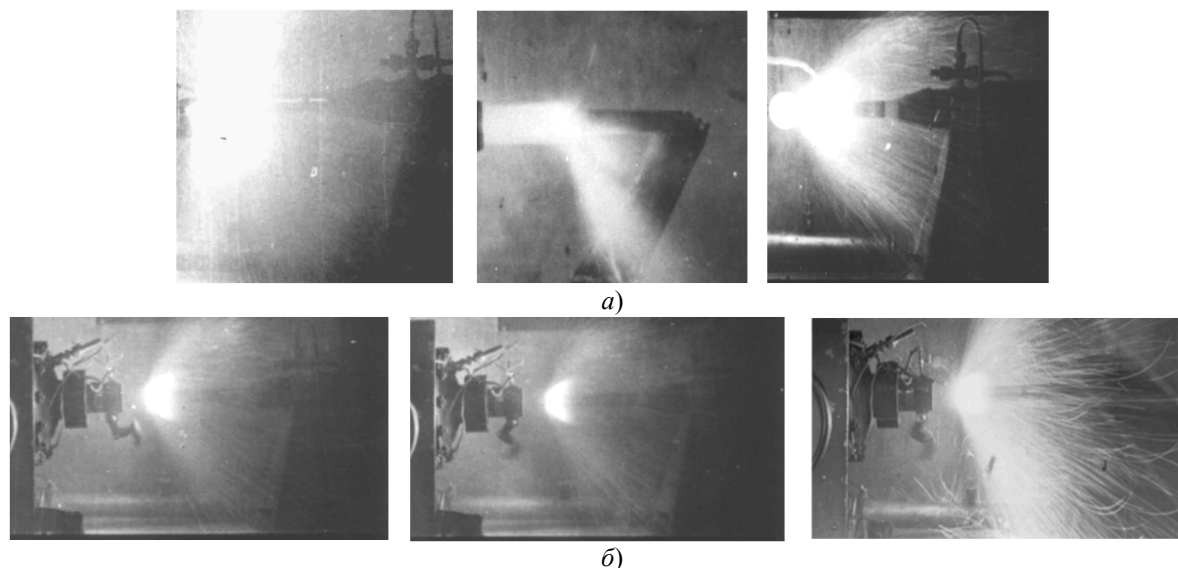


Рисунок 1 – Кінокадри загальної картини штатного спрацьовування серійних освітлювальних патронів та снарядів (а), сигнальних та імітаційних засобів (б), отриманих на стандартному піротехнічному обладнанні [2, 5, 12]

Що стосується розглядуваних сумішей (наприклад сумішей з порошків магнію та нітрату калію), які широко використовуються при спорядженні різних піротехнічних виробів (освітлювальних, сигнальних, трасувальних та ін.) [2, 3–7], то методи розрахунку температури та складу їх продуктів згоряння нині відсутні.

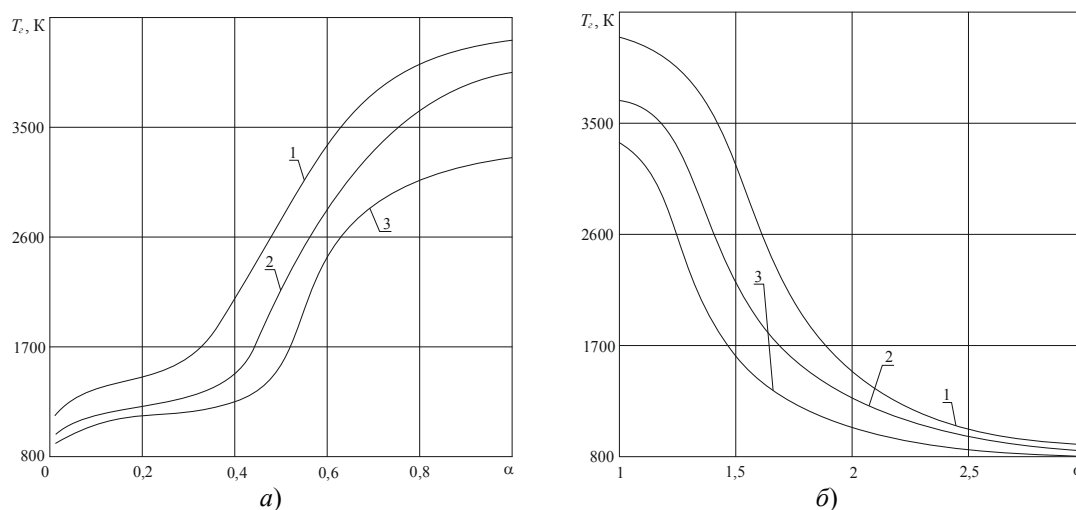
Метою роботи є визначення за допомогою термодинамічних методів розрахунку залежностей температури і складу продуктів згоряння піротехнічних сумішей з порошків магнію та нітрату калію від співвідношення компонентів і зовнішнього тиску.

Результати досліджень та їх аналіз. Усі дослідження проводилися за допомогою методів термодинамічного аналізу процесів горіння сумішей з урахуванням фазової нерівноважності їх продуктів згоряння [12, 18–20]. Водночас враховувалась можливість утворення таких газоподібних та конденсованих продуктів: гази – O^r , N^r , K^r , Mg^r , N_4^r , O_2^r , O_3^r , N_2^r , N_3^r , NO^r , NO_2^r , N_2O^r , Mg_2^r , MgO^r , K_2^r ,

KO^r , K_2O^r , K_2O_2^r ; конденсати – Mg^k , K^k , MgO^k , K_2O^k .

Температура продуктів згоряння. За даними термодинамічного розрахунку, температура продуктів згоряння істотно залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача в суміші та тиску (рисунок 2) і має максимум T_{max} . В інтервалі тисків $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$ Па цей максимум розташований в області $\alpha = 1,0 \dots 1,15$. Зміна тиску від 10^5 до 10^7 Па (до $\alpha = 3,0$) призводить до зростання температури, і T_{max} збільшується з 3080 до 4150 K.

Склад продуктів згоряння. Якісний та кількісний склад газоподібних і конденсованих продуктів згоряння сильно залежить від α та P . За даними розрахунків, у газоподібних і конденсованих продуктах згоряння містяться десятитисячні частки N^r , NO_2^r , тисячні – Mg_2^r , K_2^r , соті – O^r , NO^r , KO^r , K^k , десяті – Mg^r , K^r , O_2^r , N_2^r , MgO^r , MgO^k , Mg^k , K_2O^k .



а) криві для співвідношень $\alpha = 0,01 \dots 1,0$; б) криві для співвідношень $\alpha = 1,0 \dots 3,0$

Рисунок 2 – Залежність температури продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача при тисках: 1 – $P = 3 \cdot 10^7$ Па; 2 – $P = 0,5 \cdot 10^7$ Па; 3 – $P = 10^5$ Па

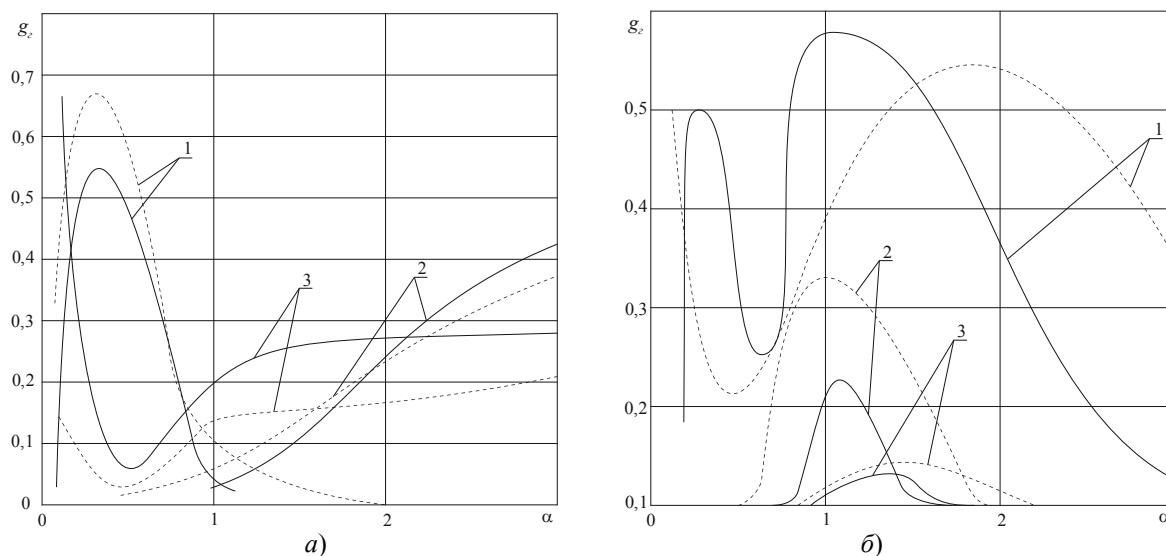
Поява в продуктах згоряння в помітних кількостях атомарного і молекулярного кисню спостерігається лише при $\alpha > 1,0$ (рисунок 3), а вміст конденсованих магнію і оксиду калію можливий відповідно при $\alpha = 0,01 \dots 0,30$ та $\alpha > 2,0$ (рисунок 4). Зі збільшенням α (від $\alpha = 1,0$) частка молекулярного кисню в продуктах згоряння збільшується до насичення при $\alpha = 3,0$ (рисунок 3). Водночас характер впливу тиску на вміст молекулярного кисню в продуктах згоряння неоднаковий для різних співвідношень компонентів. Невелика кількість атомарного кисню в продуктах згоряння спостерігається тільки при $\alpha = 0,6 \dots 2,2$ і збільшується при знижених тисках (рисунок 3). При тиску $P = 10^5$ Па максимум вмісту атомарного кисню досягається при $\alpha = 1,4$, а при тиску $P = 3 \cdot 10^7$ Па максимум вмісту атомарного кисню спостерігається при $\alpha = 1,2$. При співвідношеннях до $\alpha = 2,0$ в продуктах згоряння є газоподібний магній, залежність вмісту якого від α має максимум, що зміщується у бік великих α (рисунок 3): при тиску $P = 10^5$ Па максимум вмісту газоподібного магнію відпо-

відає $\alpha = 0,25$, при $P = 3 \cdot 10^7$ Па $\alpha = 0,34$. Газоподібний MgO^r у продуктах згоряння спостерігається в області $\alpha = 0,35 \dots 1,9$, зменшується зі збільшенням тиску і має максимум, що зміщується у бік великих α при збільшенні тиску. Вміст конденсованого магнію спостерігається при $\alpha = 0,15 \dots 0,35$ і зростає зі збільшенням тиску (рисунок 4). Водночас зі збільшенням α вміст його в продуктах згоряння різко зменшується. В продуктах згоряння в значних кількостях спостерігається оксид магнію (рисунок 4). Залежність вмісту конденсованого оксиду магнію має максимум при $\alpha = 0,95$. При всіх тисках на висхідній гілці кривої до $\alpha = 0,4$ і на низхідній гілці кривої з $\alpha = 2,1$ вміст оксиду магнію в продуктах згоряння не залежить від α . У продуктах згоряння при $\alpha = 2,1$ утворюється оксид калію, вміст якого залежить від тиску і збільшується при його підвищенні. Окрім цього, з аналізу розрахункових даних виходить, що за складом продуктів згоряння можна виділити три характерні діапазони по α (таблиця 1).

Таблиця 1 – Якісний склад кінцевих продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію при різних значеннях α і P

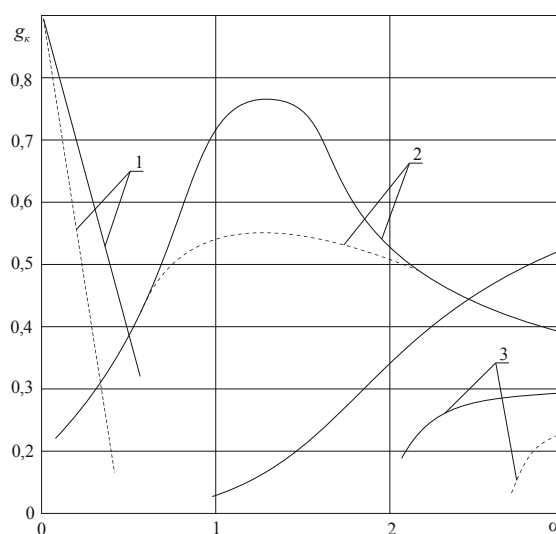
Діапазон зміни α	Діапазон зміни температури при тисках $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$ Па, К	Основні продукти згоряння	
		газоподібні	конденсовані
0,01...0,5	1060...3000	$\text{K}^r, \text{Mg}^r, \text{N}_2^r$	$\text{Mg}^k, \text{MgO}^k$
0,5...2,0	2640...2900	$\text{K}^r, \text{N}_2^r, \text{O}_2^r, \text{MgO}^r$	MgO^k
2,0...4,0	580...2340	$\text{K}^r, \text{N}_2^r, \text{O}_2^r$	$\text{MgO}^k, \text{K}_2\text{O}^k$

Примітка. Кисень в атомарному стані з'являється при $\alpha = 0,6 \dots 2,2$.



а) газоподібні продукти Mg^I (1), O_2^I (2), N_2^I (3); б) газоподібні продукти K^I (4), MgO^I (5), O^I (6):
 ---- при тиску $P = 10^5$ Па; — при тиску $P = 3 \cdot 10^7$ Па

Рисунок 3 – Залежність від α об'ємного вмісту g_α газоподібних продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію



1 – Mg^k , 2 – MgO^k , 3 – K_2O^k ; ---- при тиску $P = 10^5$ Па; — при тиску $P = 3 \cdot 10^7$ Па

Рисунок 4 – Залежність від α вмісту масової частки конденсованих продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію

Вплив добавок парафіну, стеарину, нафталіну та антрацену на температуру та склад продуктів згоряння сумішей магнію з нітратом калію. Температуру і склад продуктів згоряння знаходили в результаті термодинамічних розрахунків, аналогічних розрахункам

для подвійної суміші магнію з нітратом калію. Водночас разом із зазначеним вище передбачуваним складом продуктів згоряння враховувалася також наявність таких сполук, для яких нині відомі термодинамічні функції: гази – H , C , H_2 , OH , H_2O , HO_2 , H_2O_2 , NH , NH_2 ,

NH_3 , N_2H_4 , NHO , C_2 , C_3 , CO , CO_2 , C_3O_2 , CH , CH_2 , CH_3 , CH_4 , CHO , CONH_2 , CN , CHN , C_2N , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2N_2 , MgH , MgOH , MgO_2H_2 , KOH , $\text{K}_2\text{O}_2\text{H}_2$, KH ; конденсати – C^{K} , KOH^{K} , $\text{H}_2\text{O}^{\text{K}}$.

З даних термодинамічних розрахунків температури продуктів згоряння сумішей магній + нітрат калію + парафін, стеарин, нафталін, антрацен впливає, що введення добавок розглянутих органічних речовин у суміш магнію з нітратом натрію не призводить до істотної зміни загального характеру залежності температури продуктів згоряння від коефіцієнта надлишку окиснювача і тиску (рисунки 5–8), розглянутого вище для подвійної суміші. Аналіз результатів розрахунків показує, що незалежно від природи добавки крива $T_c(\alpha)$, також як і у разі подвійної суміші, при різних тисках має максимум $T_{c\text{max}}$. Наявність добавки впливає на температуру T_c наступним чином. Значення T_c (для суміші з добавкою парафіну, нафталіну, антрацену) при $\alpha = 0,1$, на відміну від подвійної суміші та суміші з добавкою стеарину, більше, ніж при $\alpha = 6,0$. Добавка стеарину приводить до помітного зменшення T_c при усіх значеннях коефіцієнта надлишку окиснювача і тиску. Добавки парафіну, наф-

таліну і антрацену в суміш ведуть до суттєвого зменшення T_c в області знижених тисків (цей ефект не залежить від α), в області підвищених тисків для $\alpha > 5,0$, навпаки, збільшення добавок цих речовин призводить до підвищення T_c . При введенні добавок стеарину, нафталіну і антрацену $T_{c\text{max}}$ зміщується у бік надлишку окиснювача (з $\alpha_{T_{c\text{max}}} = 0,9 \dots 1,0$ для подвійної суміші на $\alpha_{T_{c\text{max}}} = 2,0 \dots 3,0$ для потрібної суміші), чого не спостерігається при введенні добавки парафіну в суміш. Збільшення тиску від 10^5 Па до $3 \cdot 10^7$ Па при введенні добавки парафіну не впливає на положення $T_{c\text{max}}$, а у випадку введення добавок стеарину, нафталіну і антрацену $T_{c\text{max}}$ зміщується у бік стехіометрії (з $\alpha_{T_{c\text{max}}} = 2,0 \dots 3,0$ для $P = 10^5$ Па на $\alpha_{T_{c\text{max}}} = 0,9 \dots 1,0$ для $P = 3 \cdot 10^7$ Па). Збільшення добавки парафіну не впливає на залежність $T_c(\alpha)$ незалежно від тиску, а збільшення добавок стеарину, нафталіну і антрацену при знижених тисках призводить до зміщення положення максимуму у бік стехіометрії, а при підвищених тисках – не позначається на залежності $T_c(\alpha)$.

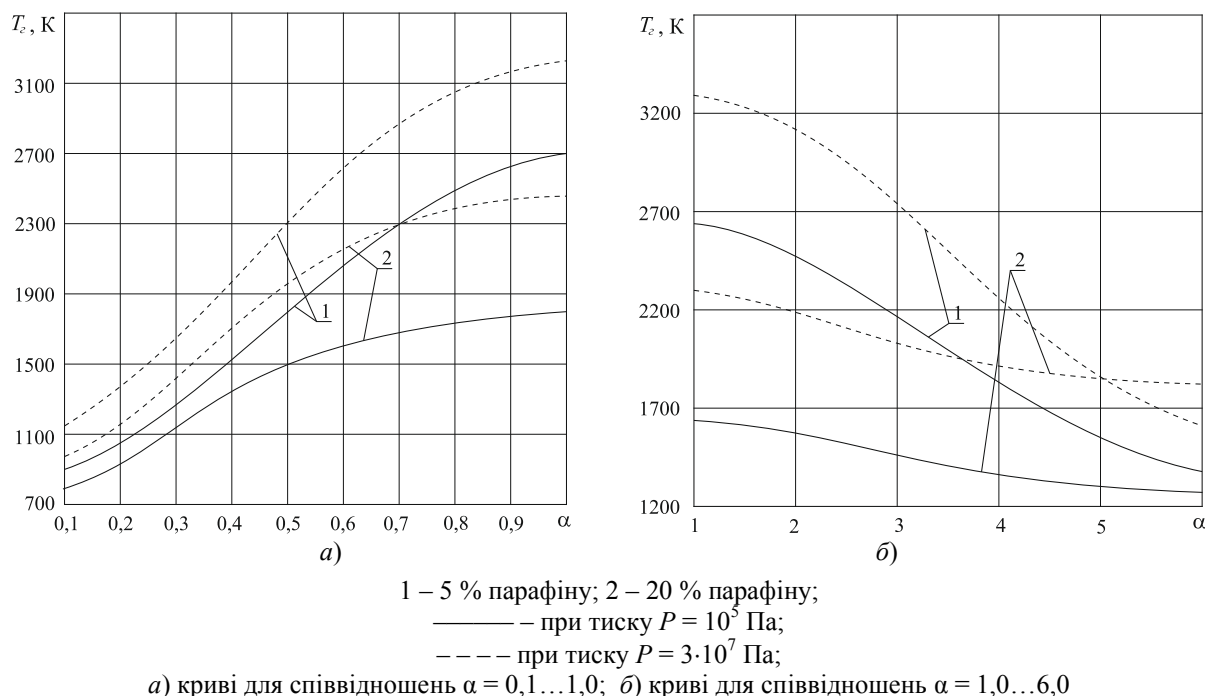


Рисунок 5 – Вплив добавок парафіну на залежність температури продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача

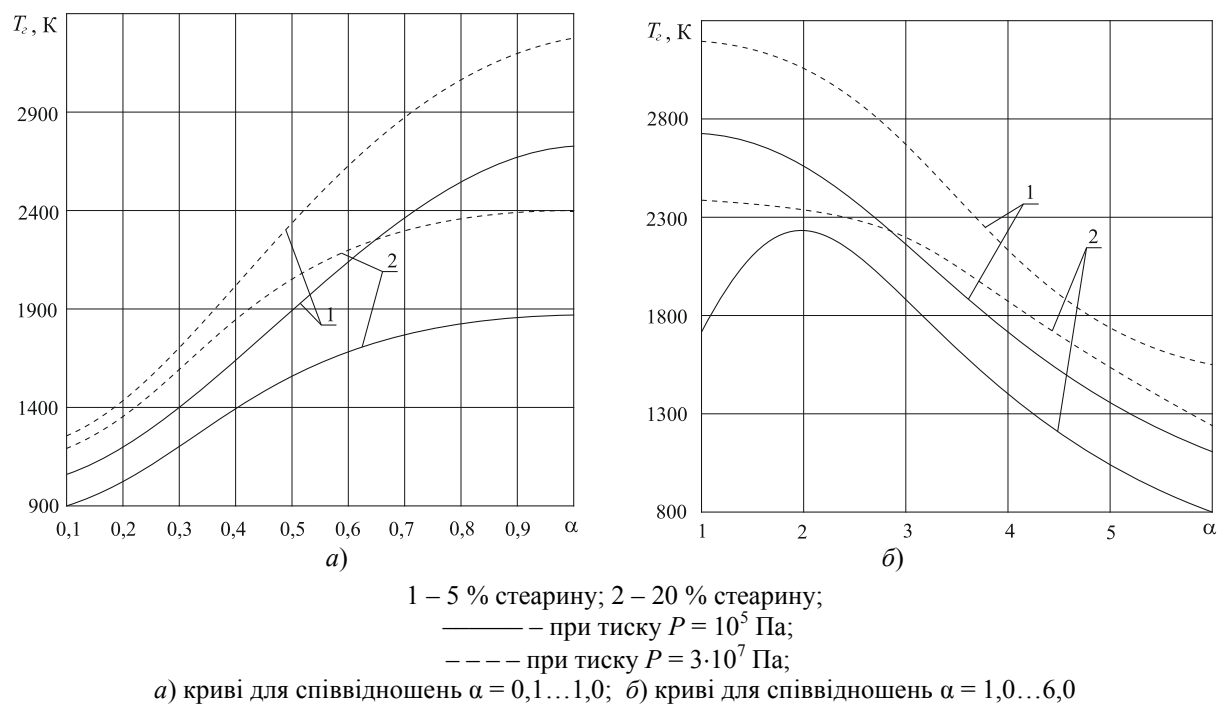


Рисунок 6 – Вплив добавок стеарину на залежність температури продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача

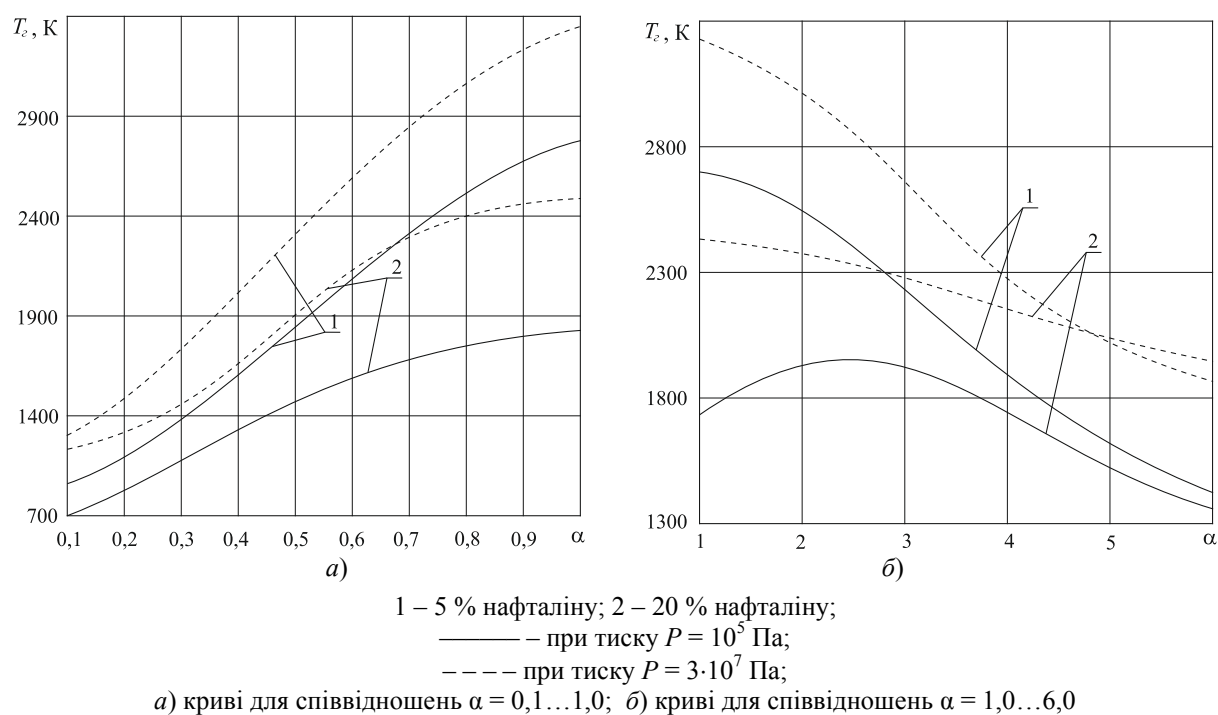


Рисунок 7 – Вплив добавок нафталіну на залежність температури продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача

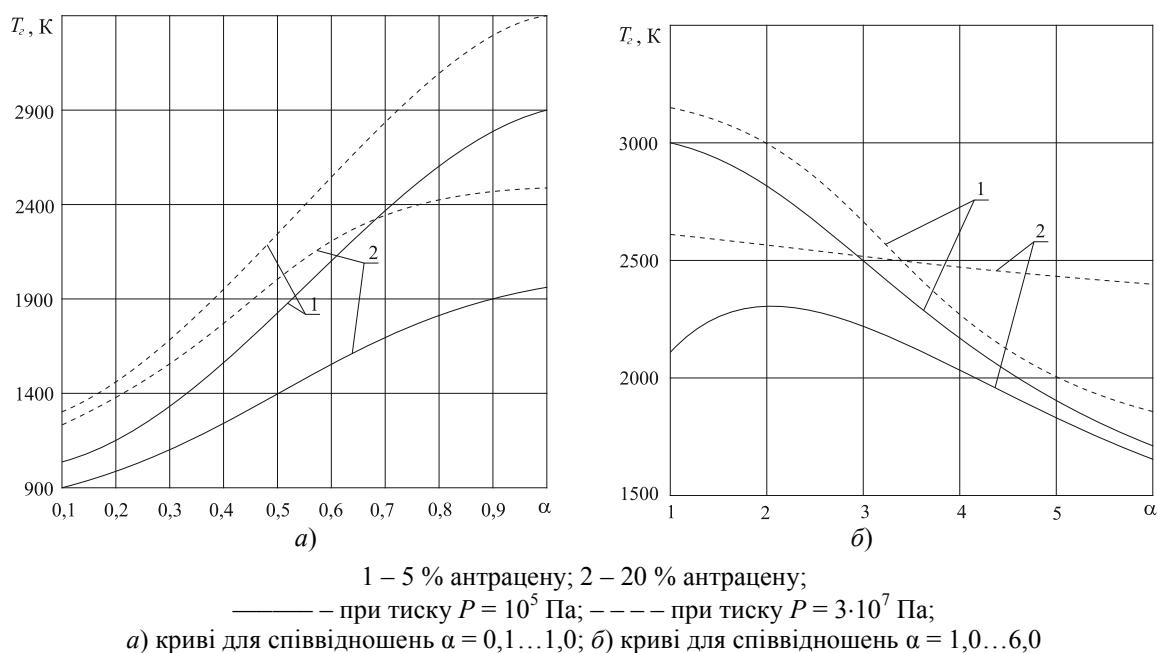


Рисунок 8 – Вплив добавок антрацену на залежність температури продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача

Наявність добавок парафіну, стеарину, нафталіну і антрацену впливає на якісний і кількісний склад продуктів згоряння сумішей магнію з нітратом калію. За даними розрахунку, незалежно від природи добавки, основними продуктами згоряння (десяті й соті частки) є: гази – H_2^r , N_2^r , CO^r , K^r , Mg^r ; конденсати – Mg^k , MgO^k . Порівняння отриманого складу продуктів згоряння зі складом продуктів згоряння подвійної суміші вказує на відсутність у про-

дуктах згоряння потрібної суміші O_2^r , MgO^r , K_2O^k . На рисунках 9–12 на прикладі суміші магнію з нітратом калію і добавками нафталіну показано залежність концентрацій продуктів згоряння, що містяться в найбільшій кількості, від коефіцієнта надлишку окиснювача і тиску. З цих даних можна бачити, що також, як і у разі подвійної суміші, якісний і кількісний склад продуктів згоряння найбільше залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача.

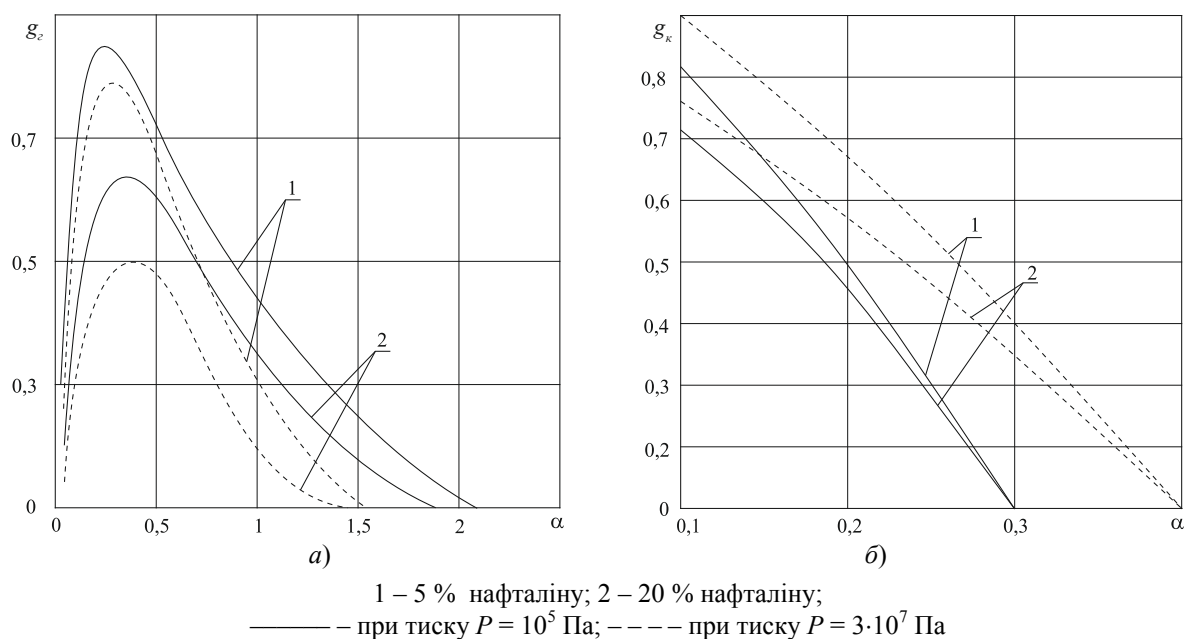


Рисунок 9 – Вплив добавок нафталіну на залежність від α об'ємного вмісту Mg^r (а) і масової частки конденсованого Mg^k (б) в продуктах згоряння суміші магнію з нітратом калію

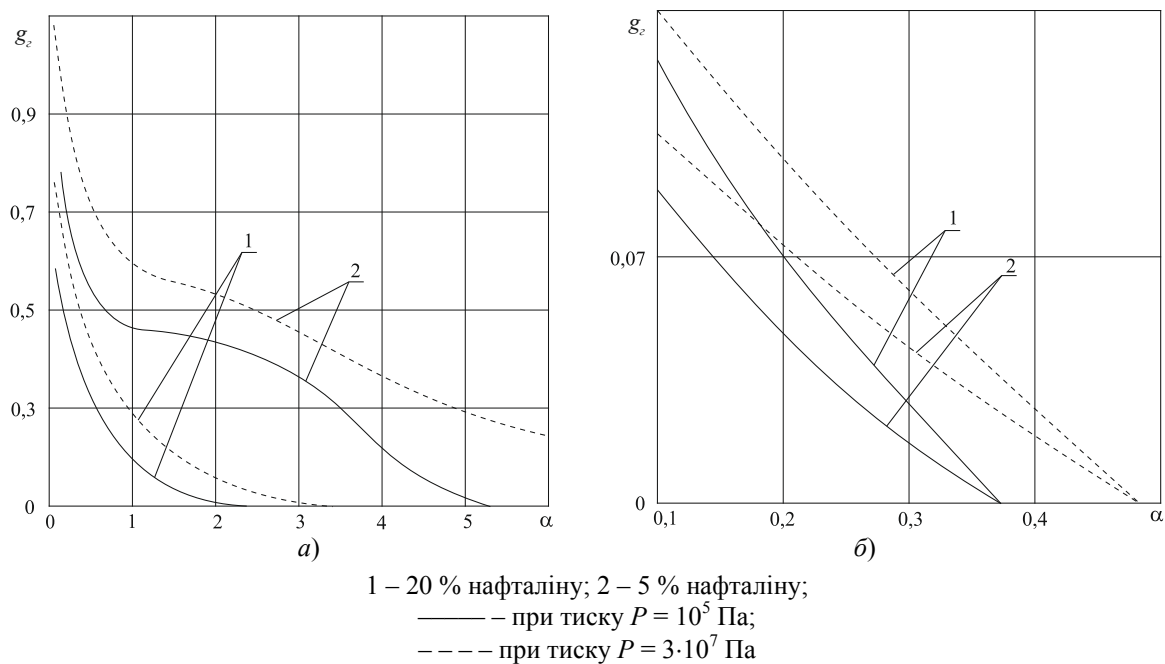


Рисунок 10 – Вплив добавок нафталіну на залежність від α об'ємного вмісту H_2^r (a) і N_2^r (б) у продуктах згоряння суміші магнію з нітратом калію

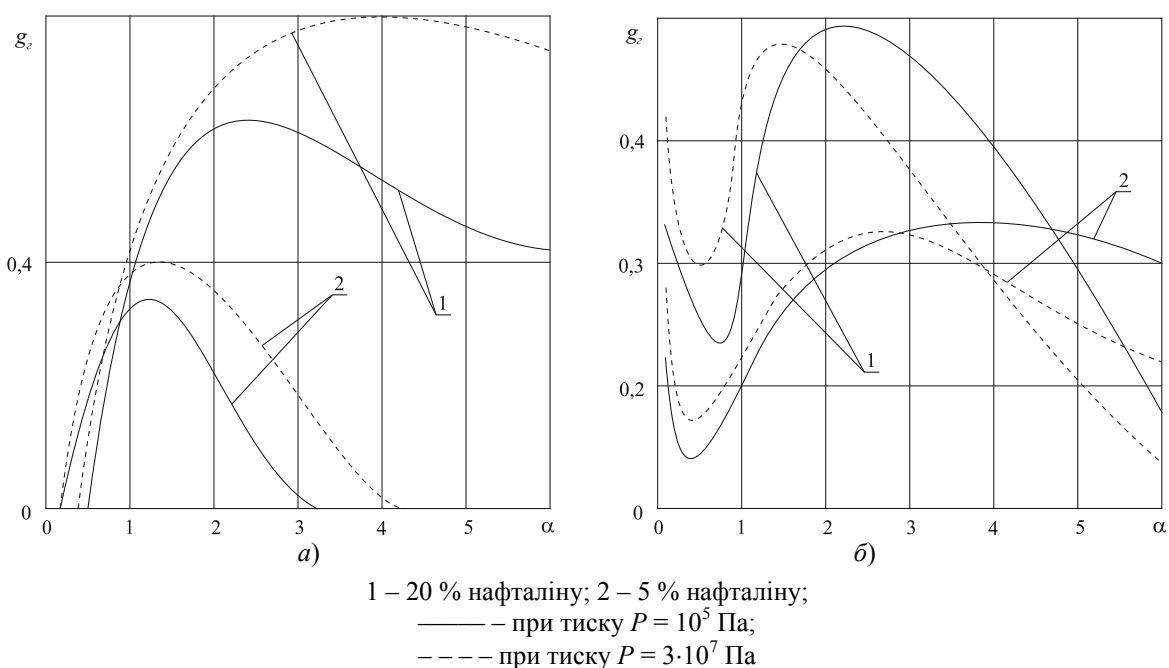


Рисунок 11 – Вплив добавок нафталіну на залежність від α об'ємного вмісту CO^r (a) і K^r (б) у продуктах згоряння суміші магнію з нітратом калію

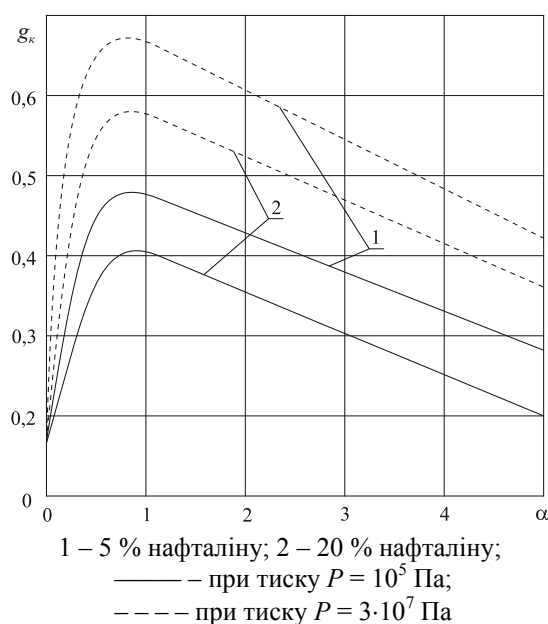


Рисунок 12 – Вплив добавок нафталіну на залежність від α масової частки конденсованого MgO^k в продуктах згоряння суміші магнію з нітратом калію

Висновки. В результаті проведених термодинамічних розрахунків температури та складу продуктів сумішей з порошків магнію та нітрату калію вперше встановлено наступні закономірності:

1. Температура продуктів згоряння найбільш суттєво залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача α та має максимальні значення $T_{cmax} = 3080...4150$ К при $\alpha = \alpha_{T_{cmax}} = 1,0...1,15$ і тисках $P = 10^5...3 \cdot 10^7$ Па; введення добавок органічних речовин у суміш приводить до зменшення T_c , а також неоднозначно впливає на характер залежностей $T_c(\alpha)$: для добавок парафіну положення $\alpha_{T_{cmax}}$ на кривій $T_c(\alpha)$ не змінюється, а для добавок стеарину, нафталіну та антрацену – зміщується у бік надлишку металевого пального.

2. Якісний і кількісний склад продуктів згоряння сумішей найбільш суттєво залежить від α та P , водночас характерним діапазоном їх зміни відповідає певний склад газоподібних та конденсованих продуктів згоряння сумішей: десятитисячні частки N^r , NO_2^r ; тисячні – Mg_2^r , K_2^r ; соті – O^r , NO^r , KO^r , K^r ; десятки – Mg^r , MgO^r , K_2O^r , O_2^r , MgO^k , Mg^k , N_2^r . Введення в суміш органічних добавок приводить до помітної зміни якісного та кількісного складу її продуктів згоряння: основними продуктами (десяті та соті частки) є гази N_2^r , H_2^r , CO^r , K^r , Mg^r та конденсати Mg^k , MgO^k , а O_2^r , MgO^r та K_2O^r вже відсутні.

Список використаних джерел

- [1] А. А. Шидловский, *Основы пиротехники*. Москва, Россия: Машиностроение, 1973.
- [2] Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. *Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Россия: Машиностроение, 1982.
- [3] В. В. Тарасов, и Ю. Г. Якушенков, *Инфракрасные системы «смотрящего» типа*. Москва, Россия: Логос, 2004.
- [4] А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. В. Бурак, и А. Ю. Денисенко, *Танковые ночные системы и приборы наблюдения*. Черкассы, Украина: Фотоприбор, 2007.
- [5] В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, и В. В. Цыбулин, *Процессы горения металлизированных конденсированных систем*. Киев, Украина: Наукова думка, 2008.
- [6] А. В. Молодык, "История развития научно-технического направления "Оптические головки самонаведения", на 2-й Укр. наук.-техн. конф. Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: зб. тез доп. Київ: КП СПБ "Арсенал", 2016.
- [7] А. В. Молодык, Н. И. Носов, Г. А. Смолляр, и Д. В. Лозбин, "Опыт и перспективы решения теплофизических проблем создания оптико-электронных специзделий ИК-техники", на 2-й Укр. наук.-техн. конф. Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: зб. тез доп. Київ: КП СПБ "Арсенал", 2016.
- [8] Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, В. Е. Татаров, и В. В. Лепесий, "Разработка рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности фейерверочных пиротехнических изделий", *Пожаровзрывобезопасность: Междунар. науч.-практ. журн.*, № 3, с. 24-41, 2002.
- [9] Г. Н. Кириллов, Ю. И. Дешевых, А. Н. Гилетич, Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, А. Н. Нестругин, и А. М. Пшеничников, *Требования пожарной безопасности при обращении с пиротехнической продукцией. Обзорно-аналит. материал*. Москва, Россия: ВНИИПО и ДНД МЧС России, 2010.
- [10] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цыбулін, та В. М. Тупицький, "Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкості

- та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів", на *I Всеукр. наук.-практ. конф. Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту*. Харків: Нац. ун-т цивільного захисту України, 2012.
- [11] О. В. Кириченко, "Влияние повышенных температур нагрева и внешних давлений на скорость и пределы горения пиротехнических нитратно-циркониевых смесей", *Научный вестник УкрНДПБ*, № 2 (26), с. 104-110, 2012.
- [12] О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, та Ю. Г. Лега, *Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратомісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів*. Київ, Україна: Наукова думка, 2012.
- [13] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, та В. М. Тупицький, "Швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів", *Проблеми пожежної безпеки*, № 34, с. 73-95, 2013.
- [14] О. В. Кириченко, "Математичне моделювання процесу нагріву металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту", *Научный вестник УкрНДПБ*, № 1 (27), с. 173-186, 2013.
- [15] В. А. Ващенко, П. И. Заика, Д. М. Краснов, С. И. Стащенко, и Ю. И. Кикоть, "Термодинамические основы прогнозирования пределов горения металлизированных конденсированных систем", *Вестник Сумського державного університету*, № 2 (13), с. 89-98, 1999.
- [16] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, П. І. Заїка, та В. М. Тупицький, "Термодинамічні розрахунки температури та складу продуктів згорання нітратно-цирконієвих сумішей", *Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. пр. АПБ ім. Героїв Чорнобиля*, № 6, с. 62-65, 2010.
- [17] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, та В. М. Тупицький, "Залежність температури та складу продуктів згорання піротехнічних сумішей магнію з нітратомісними окислювачами від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску", на *II Міжнар. наук.-практ. конф. Техногенна безпека: теорія, практика, інновації*. Львів: ЛДУБЖ, 2011.
- [18] О. В. Кириченко, и В. В. Липей, "Метод термодинамического расчета температуры и состава продуктов сгорания высокометаллизированных пиротехнических смесей", на *V Междунар. науч.-практ. конф. студентов и курсантов. Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*. Минск: ГУО "ГИИ" МЧС Республики Беларусь, 2011.
- [19] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, та В. В. Цибулін, "Термодинамічний аналіз та прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних втратно-металічних сумішей", на *III Міжнар. наук.-практ. конф. Безпека життєдіяльності в XXI столітті*. Дніпропетровськ: ПГАСА, 2011.
- [20] О. В. Кириченко, В. Д. Акіншин, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, та В. М. Тупицький, "Керування базою даних по термодинамічним характеристикам піротехнічних нітратно-металевих сумішей, що визначають їх пожежонебезпечні властивості в умовах зовнішніх впливів", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Пожежна безпека – 2011*. Харків: Нац. ун-т цивільного захисту, 2011.

References

- [1] A. A. Shidlovskii, *Bases of pyrotechnics*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1973 [in Russian].
- [2] N. A. Silin, V. A. Vaschenko, L. Ya. Kashporov et al., *Combustion of metalized heterogeneous condensed systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1982 [in Russian].
- [3] V. V. Tarasov, and Yu. G. Yakushenkov, "Looking" type infrared systems. Moscow, Russia: Logos, 2004 [in Russian].
- [4] A. R. Glushchenko, V. I. Gordienko, A. V. Burak, and A. Yu. Denisenko, *Tank night systems and surveillance devices*. Cherkassy, Ukraine: Fotopribor, 2007 [in Russian].
- [5] V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, Yu. G. Lega, P. I. Zaika, I. V. Yatsenko, and V. V. Tsybulin, *Combustion processes of metallized condensed systems*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2008 [in Russian].
- [6] A. V. Molodyk, "The history of the development of scientific and technical direction "Optical homing heads", in *Coll. of Abstracts 2nd Ukr. Sci.-Tech. Conf. Special Instrument Making: State and Prospects*. Kyiv: Arsenal, 2016 [in Russian].
- [7] A. V. Molodyk, N. I. Nosov, G. A. Smolar, and D. V. Lozbin, "Experience and pro-

- spects for solving thermos-physical problems of creating optoelectronic special products for infrared technology", in *Coll. of Abstracts 2nd Ukr. Sci.-Tech. Conf. Special Instrument Making: State and Prospects*. Kyiv: Arsenal, 2016 [in Russian].
- [8] L. P. Vogman, V. A. Zuykov, V. E. Tatarov, and V. V. Lepesiy, "Development of recommendations for ensuring fire safety of fireworks pyrotechnic products", *Pozharo-vzryvobezopasnost*, no. 3, pp. 24-41, 2002 [in Russian].
- [9] G. N. Kirillov, Yu. I. Deshevykh, A. N. Giletich, L. P. Vogman, V. A. Zuykov, A. N. Nestrugin, and A. M. Pshenichnikov, *Fire safety requirements for handling pyrotechnic products. Review and analytical material*. Moscow, Russia: VNIPO i DND MChS Rossii, 2010 [in Russian].
- [10] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, and V. M. Tupytsky, "Experimental and statistical models for obtaining a database on the rate and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal influences", in *Proc. Ist All-Ukr. Sci.-Pract. Conf. Current Management Issues in the Field of Civil Protection*. Kharkiv: Nats. unt tsyvilnoho zakhystu Ukrainy, 2012 [in Ukrainian].
- [11] O. V. Kirichenko, "Influence of elevated heating temperatures and external pressures on the rate and limits of combustion of pyrotechnic nitrate-zirconium mixtures", *Naukovyy visnyk Ukrayinskoho naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoyi bezpeky*, no. 2 (26), pp. 104-110, 2012 [in Russian].
- [12] O. V. Kyrychenko, P. S. Pashkovsky, V. A. Vaschenko, and Yu. G. Lega, *The bases of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in the conditions of external thermal influences*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2012 [in Ukrainian].
- [13] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, and V. M. Tupytsky, "Speed and limits of combustion of pyrotechnic nitrate-magnesium mixtures under conditions of external thermal influences", *Problemy pozharoy bezopasnosti*, no. 34, pp. 73-95, 2013 [in Ukrainian].
- [14] O. V. Kyrychenko, "Mathematical modeling of the process of heating of metal housings of pyrotechnic articles in terms of shot and flight", *Naukovyy visnyk Ukrayinskoho naukovo-doslidnoho instytutu tsyvilnoho zakhystu*, no. 1 (27), pp. 173-186, 2013 [in Ukrainian].
- [15] V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, D. M. Krasnov, S. I. Stashenko, and Yu. I. Kikot, "Thermodynamic foundations for predicting the combustion limits of metallized condensed systems", *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu*, no. 2 (13), pp. 89-98, 1999 [in Russian].
- [16] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, P. I. Zayika, and V. M. Tupytsky, "Thermodynamic calculations of temperature and composition of combustion products of nitrate-zirconium mixtures", *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka: coll. of research papers of the Academy of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl*, no. 6, pp. 62-65, 2010 [in Ukrainian].
- [17] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, and V. M. Tupytsky, "Dependence of temperature and composition of combustion products of pyrotechnic mixtures of magnesium with nitrate-containing oxidants on the ratio of components and external pressure", in *Proc. II Int. Sci.-Tech. Conf. Man-Caused Safety: Theory, Practice, Innovations*. Lviv: LDUBZh, 2011 [in Ukrainian].
- [18] O. V. Kirichenko, and V. V. Lihey, "Method of thermodynamic calculation of temperature and composition of combustion products of highly metallic pyrotechnic mixtures", in *Proc. V Int. Sci.-Tech. Conf. of Studentov and Cadets. Ensuring Life Safety: Problems and Prospects*. Minsk: GUO "GII" MChS Respubliki Belarus, 2011 [in Russian].
- [19] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, and V. V. Tsybulin, "Thermodynamic analysis and forecasting of fire-hazardous properties of pyrotechnic loss-metal mixtures", in *Proc. III Int. Sci.-Tech. Conf. Life Safety in the XXI Century*. Dnipropetrovsk: PHASA, 2011 [in Ukrainian].
- [20] O. V. Kyrychenko, V. D. Akinshyn, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, and V. M. Tupytsky, "Management of the database on thermodynamic characteristics of pyrotechnic nitrate-metal mixtures that determine their flammable properties under external influences", in *Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. Fire Safety – 2011*. Kharkiv: Nats. unt tsyvilnoho zakhystu, 2011 [in Ukrainian].

R. B. Motrichuk¹,

e-mail: r.motrichuk@gmail.com

O. V. Kyrychenko¹, *Dr.Tech.Sc., professor,*

e-mail: okskir@meta.ua

V. A. Vaschenko², *Dr.Tech.Sc., professor,*

e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua

S. O. Kolinko², *Ph.D., associate professor,*

e-mail: s.kolinko@chdtu.edu.ua

T. I. Butenko², *Ph.D., associate professor,*

e-mail: but82016@gmail.com

Ye. P. Kyrychenko¹,

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

V. V. Tsybulin²

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl
of the National University of Civil Defense of Ukraine,
Onoprienko str., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

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

REGULARITIES OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND EXTERNAL FACTORS ON THE TEMPERATURE AND COMPOSITION OF COMBUSTION PRODUCTS OF PYROTECHNICAL NITRATE-METAL MIXTURES

Methods for calculating the temperature and composition of combustion products of mixtures of magnesium and potassium nitrate powders, which are widely used in the equipment of various pyrotechnic articles (lighting, signaling, tracing, etc.), are currently absent. The aim of this work is to determine the use of thermodynamic methods to calculate the dependences of the temperature and composition of combustion products of pyrotechnic mixtures of magnesium and potassium nitrate powders on the ratio of components and external pressure. The results of thermodynamic calculations of the dependences of the temperature and composition of combustion products of pyrotechnic mixtures of magnesium and potassium nitrate powders on the coefficient of excess oxidant $\alpha = 0,1 \dots 3,0$, the value of organic additive $\varepsilon = 5 \dots 20\%$ and external pressure $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$ Pa, which determine the explosive modes of their combustion, are obtained. The research has been carried out using the methods of thermodynamic analysis of combustion processes of mixtures taking into account the phase imbalance of their combustion products. According to the thermodynamic calculation, the temperature of the combustion products significantly depends on the coefficient of excess oxidant in the mixture and pressure and has a maximum. From the data of thermodynamic calculations of the temperature of combustion products of mixtures of magnesium + potassium nitrate + paraffin, stearin, naphthalene, anthracene it follows that the introduction of additives of organic matter into the mixture of magnesium with sodium nitrate does not significantly change the overall temperature of combustion products, pressure for double mixture. The analysis of the results of calculations shows that regardless of the nature of the additive, the curve $T_c(\alpha)$, as in the case of a double mixture, at different pressures has a maximum. When adding paraffin, naphthalene and anthracene to the mixture, the value of T_c at $\alpha = 0,1$, in contrast to the double mixture and the mixture with the addition of stearin, is greater than at $\alpha = 6,0$. The introduction of the addition of stearin into the mixture, regardless of the coefficient of excess oxidant and pressure, leads to a significant reduction in T_c . The introduction of the same additives of paraffin, naphthalene and anthracene in the mixture leads to a significant decrease in T_c , regardless of α only in the region of low pressure, in the region of high pressure for large α ($\alpha > 5,0$), on the contrary, increasing the addition of these substances leads to an increase in T_c . When adding stearin, naphthalene and anthracene additives to the mixture, the position of the maximum T_{cmax} is shifted towards the excess of oxidant, which is not observed when adding paraffin to the mixture.

Keywords: *pyrotechnic mixtures, thermodynamic calculations, nitrate-containing oxidizer, metal fuel, combustion processes, fire safety.*

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 539.3

[0000-0003-0789-4409] **П. О. Стеблянко**, *д.ф.-м.н., професор*,
e-mail: caf-vmi@ukr.net

Університет митної справи та фінансів
вул. В. Вернадського, 2/4, м. Дніпро, 49000, Україна
[0000-0002-3428-4094] **К. Е. Дьомічев**, *к.т.н., доцент*,

e-mail: demichevk@gmail.com

Київський міжнародний університет
вул. Львівська, 49, м. Київ, 03115, Україна
[0000-0001-8688-043X] **О. Д. Петров**, *Ph.D.*

e-mail: caf-vmi@ukr.net

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
просп. Гагаріна, 72, м. Дніпро, 49000, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ СТРИЖНЯ З ТРИЛІНІЙНОГО ДВОФАЗНОГО МАТЕРІАЛУ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРИ

В роботі сформульовано феноменологічну модель для опису властивостей сплавів із пам'яттю форм та пам'яттю в точці зміни температури. Встановлено, що класичні матеріальні діаграми – це конверт певного сімейства матеріальних діаграм, побудований за певними законами зміни швидкості та розриву фронту деформації. Для використання феноменологічної моделі з метою дослідження двофазних матеріалів з різними модулями пружності розв'язано додаткову задачу, яка пов'язана з розбудовою миттєвої термомеханічної поверхні. В роботі проведено числове дослідження, як результат показано типову залежність для швидкості розповсюдження фазового переходу від часу. Графік залежності має три ділянки. На першій ділянці швидкість дорівнює нулю, а на третій – досягає постійного значення. Між ними міститься ділянка зі змінною швидкістю. В результаті обчислення дотичного модуля на кожному кроці інтегрування за часом інтегральна діаграма матеріалу, побудована в роботі, теж має три характерні ділянки.

Ключові слова: математичне моделювання, матеріали з пам'яттю форм, фазовий перехід, феноменологічна модель, інтелектуальні матеріали.

Вступ. В умовах сучасного науково-технічного прогресу в різних галузях науки та техніки знаходить застосування все більша кількість нових матеріалів.

Зростання виробництва псевдопружно-пластичних матеріалів або матеріалів з пам'яттю форм, які мають фазові переходи, та їх широке застосування зумовлюють потребу створення нових математичних та комп'ютерних моделей і методів розрахунку з огляду на реально технологічні навантаження та властивості матеріалу.

Сплави, які мають властивість пам'яті форми, псевдопружність та псевдопружно-пластичність, являють собою особливу групу сплавів, що володіють здатністю відновлювати колишню форму навіть після досить великих деформацій. Якщо при низьких температурах матеріал з пам'яттю форми, псевдо-

пружністю та псевдопружнопластичністю деформується пластично, то при цьому деформація може бути поновлена за допомогою порівняно незначного збільшення температури. Механізмом такого поновлення є перетворення з мартенситної фази у початкову аустенітну фазу.

Ключова характеристика матеріалів з пам'яттю форми, псевдопружністю та псевдопружнопластичністю – виникнення мартенситного фазового перетворення між фазами аустеніту і різними варіантами низькотемпературної, низько-симетричної мартенситної фази. Мартенситне перетворення являє собою, головним чином, перетворення зсуву, яке позбавлено дифузії при фазових переходах у твердому тілі. Воно супроводжується створенням ядра і збільшенням мартенситної фази з вихідної фази аустеніту.

Такі характеристики роблять матеріали з пам'яттю форми, псевдопружністю та псевдопружнопластичністю зручними для використання в радіоелектронних елементах конструкцій і пристроях або як складових частин у деяких передових композиційних матеріалах. Сплав NiTi застосовується в більшості випадків через його пам'ять та структурні властивості.

Для моделювання поведінки елементів конструкцій з таких матеріалів потрібно визначати нестационарний термомеханічний стан не тільки на псевдопружній стадії деформування, а й за її межею. Для побудови фізичних співвідношень між напругою та деформацією необхідно знати положення фронту фазового переходу і функцію кінетичного відгуку [1-4]. Така задача є актуальною для математичного та комп'ютерного моделювання матеріалів, які мають фазові переходи, з урахуванням температури.

Метою дослідження є розробка феноменологічної моделі для опису властивостей матеріалу саме в точці при змінному в часі температурному полі. Для опису пружної деформації і деформації фазового перетворення використаємо теорію термомеханічних поверхонь псевдопружного матеріалу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах [8-10] розв'язано ряд стаціонарних і нестационарних задач теорії термопружнопластичності. Тут застосовувалися фізичні співвідношення, що описують прості і близькі до них процеси деформування. Розглядалися і процеси деформування по траєкторіях малої кривизни. Використовувалися співвідношення теорії процесів малої кривизни при неізотермічних процесах деформування елемента тіла, які розроблені і отримали експериментальне обґрунтування [4].

Перші сплави з пам'яттю форм були розроблені в середині минулого століття, однак строгих і надійних визначень моделей континуального рівня, необхідного для інженерних застосувань матеріалів, поки не існує. Зв'язок між мікроскопічною і макроскопічною поведінкою дуже складний і досі не розроблений до ступеня, необхідного таким моделям. Частково це пов'язано з досить сильною залежністю механічної реакції на температуру, швидкість навантаження, діапазон деформації, геометрію досліджуваного тіла,

термомеханічну історію, природу навколишнього середовища, а також взаємодією між самими цими параметрами. Різні приклади такого моделювання наведено, наприклад, у роботах [11, 12]. Такі сплави, як NiTi, CuZnAl, CuAlNi, AuCd та інші можуть відновлювати деформації до 3 %. Іншими важливими характеристиками деяких із цих матеріалів є внутрішнє демпфірування, псевдопружності і висока межа плинності.

Характерною рисою діаграми матеріалу з пам'яттю форм при активному навантаженні є ділянки ідеальної пластичності [13]. Аналогічні ділянки мають місце і при розвантаженні, але при певних температурах.

В роботі [5] запропоновано варіант розв'язку задачі моделювання двофазного матеріалу при силовому навантаженні. Крива напруга-деформації для двофазного псевдопружного матеріалу розглядається як лінійна залежність, що відповідає з урахуванням відповідної точності поставленій автором задачі – розтягування матеріалу. При складному навантаженні, силовому і температурному, крива напруга-деформація буде мати нелінійну залежність.

В роботах [14-15] авторами запропоновано використання теорії термомеханічної поверхні псевдопружного матеріалу для моделювання поведінки елементів конструкцій, існування якої з достатньою мірою точності експериментально підтверджено в роботі [8]. Ця поверхня з певною мірою точності не залежить від виду напруженого стану для деяких класів ізотропних матеріалів. В результаті її можна визначати за допомогою експериментів при силових навантаженнях, зокрема на розтягування циліндричних зразків.

Феноменологічний підхід до моделювання псевдопружних матеріалів при різних видах навантаження запропоновано в роботах [4, 6, 9].

Клас моделей для полікристалічних сплавів з пам'яттю форми – це феноменологічні моделі, які для опису змін мікроструктури через фазове перетворення виходять з термомеханіки континууму з внутрішніми змінними. У подібних моделях зазвичай задають функцію макроскопічної енергії, яка залежить від змінних стану і внутрішніх змінних, що описують ступінь фазового перетворення. Для внутрішніх змінних записують-

ся рівняння еволюції. Макроскопічна енергія і рівняння еволюції приймаються в деякій функціональній формі, яка повинна бути сумісна з термодинамікою. Фундаментальна структура всіх цих моделей є подібною і може класифікуватися як визначальні моделі з внутрішніми змінними стану.

Феноменологічні співвідношення безпосередньо не залежать від параметрів матеріалу на мікрорівні, а залежать від набору параметрів на макрорівні, які визначаються з експериментальних спостережень. Такі моделі можуть бути простими, наприклад моделювання одноосової псевдопружної реакції матеріалів з пам'яттю форми кусково-лінійною функцією, або можуть бути складними, як у тривимірних моделях, що використовують багато параметрів, які повинні бути визначені з великої кількості експериментів. Феноменологічні моделі легко адаптуються до числових методів розв'язання граничних задач на макроскопічному рівні.

Постановка задачі. Узагальнена залежність між напругою σ і деформацією γ , в матеріальній точці моделюється кривою, що зображена на рисунку 1. При побудові такої діаграми задаються точки площини $(\sigma_M(T), \gamma_M(T))$ і $(\sigma_m(T), \gamma_m(T))$, функції $\gamma = \psi_i(\sigma, T)$, $i = 1, 2, 3$ і визначається змінна деформація перетворення $\gamma_T = \psi_3(\sigma, T) - \psi_1(\sigma, T)$.

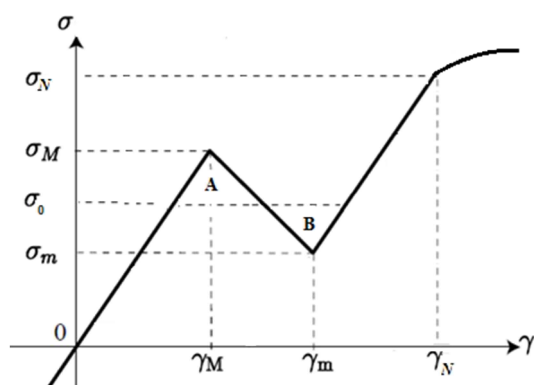


Рисунок 1 – Крива напруга-деформація для двофазного псевдопружного матеріалу при сталій температурі

Функції $\psi_i(\sigma, T)$ повинні задовольняти наступним вимогам:

$$\begin{aligned} \psi_1(0, T) &= 0, \quad \psi_1(\sigma_M, T) = \gamma_M(T), \\ \psi_1'(\sigma, T) &> 0, \quad \psi_2(\sigma_M, T) = \gamma_M(T), \\ \psi_2(\sigma_m, T) &= \gamma_m(T), \quad \psi_2'(\sigma, T) < 0, \\ \psi_2(\sigma_M, T) &= \gamma_M(T), \quad \psi_2(\sigma_m, T) = \gamma_m(T), \\ \psi_2'(\sigma, T) &< 0, \quad \psi_3(\sigma_m, T) = \gamma_m(T), \\ \psi_3'(\sigma, T) &> 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Поле зміщень у зразку повинно бути неперервним:

$$u(x) = \begin{cases} \psi_3(\sigma, T)x, & 0 \leq x < s, \\ \psi_1(\sigma, T)x + \gamma_T(\sigma, T)s, & s \leq x \leq L. \end{cases} \quad (2)$$

Відповідний кусково-однорідний розподіл деформації в стрижні дається формулою

$$\gamma(x) = \begin{cases} \psi_3(\sigma, T), & 0 \leq x < s, \\ \psi_1(\sigma, T), & s \leq x \leq L. \end{cases} \quad (3)$$

Залежність між збільшенням довжини $u(L) = \delta$ стрижня і напругою визначається виразом (s – положення границі розділу фаз):

$$\delta = \psi_3(\sigma, T)s + \psi_1(\sigma, T)(L - s). \quad (4)$$

Рівняння (4) дає змогу визначити сімейство $\delta(\sigma, s, T)$. Якщо δ задано, то можна знайти напругу σ , розв'язуючи відповідну крайову задачу нелінійної пружності. Водночас з виразу (4) не можна зразу визначити σ , оскільки невідомо положення границі розділу фаз.

Для однозначного розв'язку цієї задачі необхідно надати допоміжну інформацію, окрім рівняння балансу (4), фізичних співвідношень $\gamma = \psi_i(\sigma, T)$, $i = 1, 2, 3$, граничних умов і вимог до гладкості. Зазвичай ці вимоги достатні при відсутності нестійких ділянок діаграми, для звичайних еластичних матеріалів, для яких напруга монотонно зростає зі збільшенням деформації. Порушення єдності виникає в (4), якщо задано σ , а не δ . Ця проблема може бути вирішена шляхом введення поняття рушійної сили f . Вона визначається так:

$$f(\sigma, T) = \int_{\sigma_0}^{\sigma} \gamma_T(\sigma, T) d\sigma, \quad (5)$$

де $\sigma_0 = (\sigma_M + \sigma_m)/2$ – напруга Максвела. Напругу Максвела можна інтерпретувати геометрично як напругу, при якій дві площі, обмежені кривою напруга-деформація, мають рівну площу. Оскільки напруга в стані рівноваги в змішаній фазі повинна знаходитися між

σ_m і σ_M , то діапазон можливих значень рушійної сили $[f_m, f_M]$.

Розглянемо квазістатичний процес, в якому треба визначити функції часу $\sigma = \sigma(t)$, $s = s(t)$, $\delta = \delta(t)$, $T = T(t)$.

Похідна за часом від виразу (1) дає наступне нелінійне рівняння:

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \gamma_T(\sigma)\dot{s} + A_\sigma\dot{\sigma} + A_T\dot{T}, \\ A_\sigma &= \frac{\partial \gamma_T}{\partial \sigma}s + \frac{\partial \psi_1}{\partial \sigma}L, \\ A_T &= \frac{\partial \gamma_T}{\partial T}s + \frac{\partial \psi_1}{\partial T}L.\end{aligned}\quad (6)$$

Точкою позначено похідні за часом.

В загальному випадку дотичний модуль діаграми матеріалу можна визначити з (2) так:

$$\frac{d\sigma}{d\delta} = \frac{1 - \gamma_T(\sigma)\dot{s}/\dot{\delta} - A_T\dot{T}/\dot{\delta}}{A_\sigma}.\quad (7)$$

При його обчисленні треба попередньо визначити функції $\sigma = \sigma(t)$, $s = s(t)$, а для цього до рівняння (6) необхідно додати функцію кінетичного відгуку $\dot{s} = \Phi(f)$ (рис. 2), вираз для рушійної сили (5) і закон зміни температури в часі.

Моделювання трилінійного двофазного матеріалу. Для трилінійного двофазного матеріалу з різними модулями пружності $\mu_1 \neq \mu_3$ і відповідно змінною трансформаційною деформацією γ_T на основі наведених вище формул можна записати залежності між напругою і збільшенням довжини зразка, а також для рушійної сили.

Для отримання розрахункових формул уточненої моделі було розглянуто допоміжну задачу, яка пов'язана з розбудовою миттєвої термомеханічної поверхні. Нехай у тривимірному просторі γ, T, σ задано координати чотирьох точок $P_i(\gamma_i, T_i, \sigma_i)$, $i = 1; 2; 3; 4$. Рівняння термомеханічної поверхні, яка проходить через ці точки, запишемо так:

$$\sigma = a\gamma + bT + c\gamma T + d.\quad (8)$$

Невідомі коефіцієнти a, b, c, d розшукуються з системи, яка побудована на основі цього виразу для заданих чотирьох точок P_i миттєвої термомеханічної поверхні. Після їх обчислення можна будувати таку поверхню за двома сусідніми діаграмами, отриманими для $T = T_1$ і $T = T_2$, на інтервалі $T \in [T_1; T_2]$.

При активному навантаженні сумарна термомеханічна поверхня для псевдопружного матеріалу складається з трьох окремих поверхонь. Це поверхня для пружної частини, поверхня, де здійснюється стрибок деформацій, викликаних фазовим перетворенням, і частини поверхні, для якої матеріал продовжує себе вести пружно (після фазового переходу) і переходить у пластичний стан у точці $(\gamma_N; \sigma_N)$. Аналогічно термомеханічна поверхня задається і при розвантаженні [7].

Рівняння першої такої ділянки $\gamma \in [0; \gamma_M]$, $\sigma \in [0; \sigma_M]$ має вигляд

$$\sigma = a_1\gamma + b_1T + c_1\gamma T + d_1.\quad (9)$$

Звідси отримаємо систему, з якої знайдемо коефіцієнти у виразі (9):

$$\begin{aligned}b_1T_1 + d_1 &= 0, \quad b_1T_2 + d_1 = 0, \\ a_1 + c_1T_1 &= \sigma_M(T_1)/\gamma_M(T_1) = \mu_1(T_1), \\ a_1 + c_1T_2 &= \sigma_M(T_2)/\gamma_M(T_2) = \mu_1(T_2).\end{aligned}\quad (10)$$

Коефіцієнти обраховуємо так:

$$\begin{aligned}b_1 &= 0, \quad d_1 = 0, \quad a_1 = \mu_1(T_1) - c_1T_1, \\ c_1 &= (\mu_1(T_2) - \mu_1(T_1))/(T_2 - T_1),\end{aligned}\quad (11)$$

а з формули (8) отримаємо вираз для термомеханічної поверхні на першій ділянці

$$\sigma = \gamma[\mu_1(T_1) + c_1(T - T_1)].\quad (12)$$

Рівняння поверхні (9) на псевдопружній частині третьої ділянки $\gamma \in [\gamma_m; \gamma_N]$, $\sigma \in [\sigma_m; \sigma_N]$ має вигляд

$$\sigma = a_3\gamma + b_3T + c_3\gamma T + d_3.\quad (13)$$

Коефіцієнти у виразі (13) знаходимо за допомогою заданих точок термомеханічної поверхні

$$\begin{aligned}(\gamma_m(T_1); \sigma_m(T_1)), (\gamma_m(T_2); \sigma_m(T_2)), \\ (\gamma_N(T_1); \sigma_N(T_1)), (\gamma_N(T_2); \sigma_N(T_2)).\end{aligned}$$

Зазначимо, що після переходу в пластичний стан друга нелінійна частина третьої ділянки термомеханічної поверхні матеріалу задається відомим способом [6, 7].

Числові результати. Розглянемо числовий приклад, коли визначаються функції $\sigma = \sigma(t)$, $s = s(t)$ при сталій температурі $T \in [T_1; T_2]$.

На основі формул (5) і (6) запишемо:

$$\dot{\delta} = (k\sigma + b)\dot{s} + (ks + L/\mu_1)\dot{\sigma} + \left[\left(\frac{dk}{dT}\sigma + \frac{db}{dT} \right)s - \frac{L}{\mu_1^2(T)} \frac{d\mu_1(T)}{dT} \right] \dot{T}. \quad (14)$$

$$f(\sigma) = \left(k \frac{\sigma^2}{2} + b\sigma \right) - \left(k \frac{\sigma_0^2}{2} + b\sigma_0 \right), \quad (15)$$

де введено

$$\begin{aligned} k(T) &= 1/\mu_3(T) - 1/\mu_1(T), \\ b(T) &= \gamma_m(T) - \sigma_m(T)/\mu_3(T). \end{aligned} \quad (16)$$

Звідси отримаємо

$$\dot{f}(\sigma) = \gamma_T(\sigma)\dot{\sigma} = (k\sigma + b)\dot{\sigma}. \quad (17)$$

Для трилінійного двофазного матеріалу з однаковими модулями пружності $\mu_1 \equiv \mu_3 = \mu$ отримаємо $k = 0$, $b \equiv \gamma_T = \gamma_m - \sigma_m/\mu$.

В результаті цього спроститься диференціальне рівняння (14)

$$\dot{\delta} = b\dot{s} + L\dot{\sigma}/\mu$$

і вираз для рушійної сили (15)

$$f(\sigma) = b(\sigma - \sigma_0).$$

Границі зміни рушійної сили будуть такими:

$$f_m = b(\sigma_m - \sigma_0), \quad f_M = b(\sigma_M - \sigma_0). \quad (18)$$

Нехай функція кінетичного відгуку $\dot{s} = \Phi(f)$ буде мати вигляд (рисунок 2)

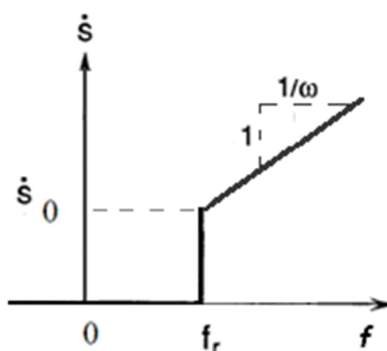


Рисунок 2 – Схематичний графік функції кінетичного відгуку

Ця функція може бути задана аналітично [5]:

$$\dot{s} = \begin{cases} 0; & f \in [0; f_r]; \\ \dot{s}_0 + \omega(f - f_r). & \end{cases} \quad (19)$$

На першій ділянці (до фазового переходу) $\dot{s} \equiv 0; s \equiv 0$. Внаслідок цього рівняння (14) набуде вигляду

$$\dot{\delta} = \psi'_1(\sigma)L\dot{\sigma}. \quad (20)$$

Звідси отримаємо формулу для обчислення дотичного модуля діаграми:

$$\frac{d\sigma}{d\delta} = \frac{1}{\psi'_1(\sigma)L}. \quad (21)$$

На другій ділянці (після фазового переходу) рівняння (14) з урахуванням (19) набуде вигляду

$$\dot{\delta} = \gamma_T(\dot{s}_0 + \omega(f - f_r)) + (\gamma'_T s + \psi'_1 L) \frac{\dot{f}}{\gamma_T}, \quad (22)$$

де

$$s = (\dot{s}_0 - \omega f_r)(t - t_r) + \omega \int_{t_r}^t f(\tau) d\tau. \quad (23)$$

В результаті

$$\dot{f} = \frac{\gamma_T}{\gamma'_T s + \psi'_1 L} \left[\dot{\delta} - \gamma_T(\dot{s}_0 + \omega(f - f_r)) \right]. \quad (24)$$

Для випадку трилінійного двофазного матеріалу з однаковими модулями пружності отримаємо:

$$\dot{f} = \frac{\mu b}{L} \left[\dot{\delta} - b(\dot{s}_0 + \omega(f - f_r)) \right]. \quad (25)$$

Після інтегрування можна записати

$$f(t) = \alpha_* + (f_r - \alpha_*)e^{-(t-t_r)/\beta},$$

$$\beta = \frac{\mu b^2 \omega}{L}, \quad \alpha_* = (\dot{\delta} / b - \dot{s}_0 + f_r) / \omega, \quad (26)$$

$$t \in [t_r; \infty), f(t_r) = f_r, f(t_r) = f_r < f_M.$$

З метою спрощення запису введемо позначення

$$c_1 = b^2 + 2k(c + f_r), \quad F = f - f_r.$$

Перепишемо (23), (24) таким чином:

$$\dot{F} = \Phi(F, s), \quad s = \dot{s}_0(t - t_r) + \omega \int_{t_r}^t F(\tau) d\tau,$$

$$\Phi(F, s) = \frac{\gamma_T(F)}{ks + \frac{L}{\mu_1}} \left[\dot{\delta} - \gamma_T(F)(\dot{s}_0 + \omega F) \right], \quad (27)$$

$$\gamma_T(F) = \sqrt{c_1 + 2kF}.$$

На першій ділянці (до фазового переходу) $\dot{s} \equiv 0; s \equiv 0; t \in [0; t_r]$.

З формул (14) і (15) отримаємо:

$$\dot{\sigma} = \frac{\mu_1}{L} \dot{\delta} \Rightarrow \sigma = \frac{\mu_1}{L} \dot{\delta} \cdot t, \quad (28)$$

$$\dot{f}(\sigma) = (k\sigma + b)\dot{\sigma} = \left(\frac{k\mu_1 \dot{\delta}}{L} t + b \right) \frac{\mu_1}{L} \dot{\delta}.$$

Інтегруючи останню рівність, отримаємо:

$$f(t) = k \left(\frac{\mu_1 \dot{\delta}}{L} \right)^2 \cdot \frac{t^2}{2} + \frac{b \mu_1 \dot{\delta}}{L} \cdot t, \quad (29)$$

$$t \in [0; t_r], f(0) = 0, f(t_r) = f_r < f_M.$$

На другій ділянці систему рівнянь (27) будемо розв'язувати наближено при наступних умовах:

$$s(t_r) = 0, F(t_r) = 0. \quad (30)$$

Для цього введемо сітку за часом і зробимо позначення:

$$t_p = t_{p-1} + \tau, p = 1; 2; 3; \dots, t_0 = t_r,$$

$$s^p = s(t_p), F^p = F(t_p), \quad (31)$$

$$\Phi^p = \Phi(F^p, s^p), \gamma_T^p = \gamma_T(F^p).$$

В результаті диференціальне рівняння та інтеграл (27) можна замінити еквівалентними різницеvim рівняннями і сумою. Звідси отримаємо розрахункові формули для рушійної сили F :

$$F^{p+1} = F^p + \tau \cdot \Phi(F^p, s^p),$$

$$s^p = p \cdot \dot{s}_0 \cdot \tau + \omega \cdot J^p, \quad (32)$$

$$J^p = J^{p-1} + \frac{\tau}{2} (F^{p-1} + F^p),$$

$$J^0 = 0, F^0 = 0.$$

При числовому розв'язанні системи (27) за допомогою наведених різницеvim формул спочатку задаються $L, \omega, \dot{s}_0, \dot{\delta}, \gamma_M, \sigma_M, \gamma_m, \sigma_m, \mu_1, \mu_3, \tau$. Потім обчислюються $k, k_0, k_1, b, \sigma_0, c, \mu_2$ і після цього $t_r, f_r, c_1, b, \sigma_0, \mu_2$.

Результати розрахунків наведено нижче. На рисунку 3, а показано типову залежність для швидкості розповсюдження фазового переходу від часу. Графік має три ділянки. На першій ділянці швидкість дорівнює нулю, а на третій – досягає постійного значення. Між ними міститься ділянка зі змінною швидкістю. В результаті обчислення дотичного модуля на кожному кроці інтегрування за часом для інтегральної діаграми матеріалу (рисунку 3, б) теж маємо три характерні ділянки.

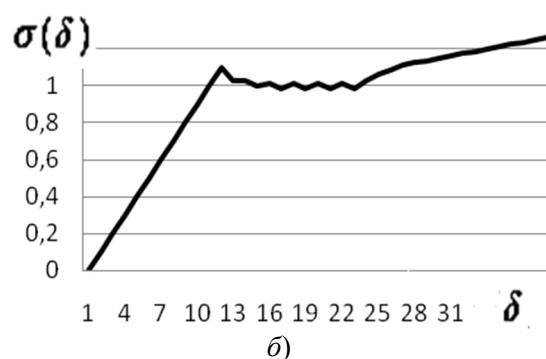
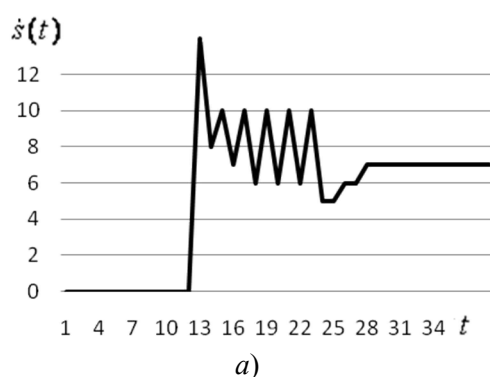


Рисунок 3 – Швидкість розповсюдження фазового переходу (а) та інтегральна діаграма матеріалу (б)

Висновки. Як встановлено в експериментальних дослідженнях, поведінка матеріалу в точці тіла в загальному випадку відрізняється від поведінки зразка в цілому. У роботі формулюється феноменологічна модель для опису властивостей матеріалу саме в точці при змінному в часі температурному полі. Для опису пружної деформації і деформації фазового перетворення використовувалася термомеханічна поверхня псевдопружного матеріалу, що складається з трьох прямолінійних ділянок. Таке трактування теорії призводить до нестійкої діаграми напруження-деформація і вимагає рішення граничної за-

дачі з урахуванням розвитку фронту деформації перетворення. Таке трактування дало можливість описати ряд експериментальних даних на різних зразках при різних умовах навантаження і температури. Встановлено, що класичні діаграми матеріалів являють собою криву, що огинає деяке сімейство діаграм матеріалу, побудоване для певних законів зміни швидкості фронту розриву деформацій.

Перша ділянка відповідає пружній поведінці матеріалу. Третя – характеризує зміцнення матеріалу. Між ними міститься ділянка, яка нагадує поведінку ідеально пластичного матеріалу.

Список використаних джерел

- [1] R. Abeyaratne, J. K. Knowles, *Evolution of phase transitions*. Cambridge University Press, 2006.
- [2] A. Petrov, Yu. Chernyakov, P. Steblyanko, K. Domichev, and V. Haydurov, "Development of the method with enhanced accuracy for solving problems from the theory of thermo-pseudoelastic-plasticity", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4/7 (94), pp. 25-33, 2018 (Scopus).
- [3] J. A. Shaw, and S. Kyriakides, "On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy", *Acta Materialia*, no. 45, pp. 683-700, 1997.
- [4] P. Steblyanko, Yu. Chernyakov, A. Petrov, and V. Loboda, "Phenomenological model of pseudo-elastic-plastic material under non-stationary combining loading", *Structural Integrity*, vol. 8, Theoretical, Applied and Experimental Mechanics, Springer Verlag, 2019, pp. 205-208.
- [5] О. Д. Петров, "Комп'ютерне моделювання поведінки стрижня з трилінійного двофазного матеріалу при розтягуванні", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали статей* (ISBN 978-617-7468-26-3), Івано-Франківськ, 2018, с. 234-237.
- [6] А. Д. Петров, К. Э. Демичев, П. А. Стеблянюк, и Ю. А. Черняков, "Экспериментальное обоснование варианта модели поведения материала с памятью формы и псевдоупругостью", *Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*, № 80, с. 81-87, 2017.
- [7] П. Стеблянюк, А. Галишин, и А. Петров, "Описание термомеханической поверхности материала при помощи двумерного сплайна", на *Міжнар. наук. конф. Математичні проблеми технічної механіки*, (квіт. 14–17, 2015). Дніпродзержинськ, 2015, с. 126.
- [8] Yu. N. Shevchenko, P. A. Steblyanko, and A. D. Petrov, "Numerical methods in nonstationary problems of the theory of thermoplasticity", *Problems of computing mechanics and durability of designs: coll. of sci. works*, no. 22, Dnepropetrovsk, 2014, pp. 250-264.
- [9] K. Domichev, P. Steblyanko, and A. Petrov, "Phenomenological modeling of volume nanomaterials with form memory", *Innovative Solutions in Modern Science: sci. journ.*, Dubai, no. 4 (40), pp. 5-17, 2020.
- [10] К. Е. Дьомічев, П. О. Стеблянюк, та О. Д. Петров, "Моделювання поведінки тіла з псевдопружно-пластичного матеріалу при нестационарному навантаженні", на *II Міжнар. конф. Функціональні матеріали для інноваційної енергетики*, Київ, 2020, с. 54.
- [11] К. Е. Дьомічев, П. О. Стеблянюк, та О. Д. Петров, "Моделювання миттєвої термомеханічної поверхні трилінійного двофазного матеріалу при нестационарному навантаженні", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Пріоритетні шляхи розвитку науки та освіти*, Львів, 2020, с. 61-63.
- [12] К. Е. Дьомічев, та О. Д. Петров, "Математичне моделювання псевдо-пружно-пластичних тіл з урахуванням нелінійності", на *XXXVIII Наук.-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України*, Київ, 2020, с. 10-12.
- [13] K. Domichev, P. Steblyanko, and A. Petrov, "Mathematical modeling of structural elements from functionally heterogeneous materials" in *Міжнар. наук.-практ. конф. Science, research, development, technics and technology*, Krakow, 2020, pp. 27-29.
- [14] К. Е. Дьомічев, "Математичне та комп'ютерне моделювання нестационарного напружено-деформованого пружно-пластичного стану тіл під дією фізико-механічних полів", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Актуальні питання сьогодення*, Вінниця, 2018, с. 82-85.
- [15] К. Е. Дьомічев, О. Д. Петров, та П. О. Стеблянюк, "Математичне моделювання поведінки тіл із функціональних структурно неоднорідних матеріалів під дією нестационарного навантаження", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Новітні технології в освіті, науці та виробництві*, Покровськ: ДонНТУ, 2020, с. 211-213.

References

- [1] R. Abeyaratne, J. K. Knowles, *Evolution of phase transitions*. Cambridge University Press, 2006.

- [2] A. Petrov, Yu. Chernyakov, P. Steblyanko, K. Domichev, and V. Haydurov, "Development of the method with enhanced accuracy for solving problems from the theory of thermo-pseudoelastic-plasticity", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4/7 (94), pp. 25-33, 2018 (Scopus).
- [3] J. A. Shaw, and S. Kyriakides, "On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy", *Acta Materialia*, no. 45, pp. 683-700, 1997.
- [4] P. Steblyanko, Yu. Chernyakov, A. Petrov, and V. Loboda, "Phenomenological model of pseudo-elastic-plastic material under non-stationary combining loading", *Structural Integrity*, vol. 8, Theoretical, Applied and Experimental Mechanics, Springer Verlag, 2019, pp. 205-208.
- [5] A. D. Petrov, "Computer simulation of the behavior of a rod made of three-phase two-phase tensile material", in *Int. Sci.-Pract. Conf. Information technologies and computer modeling*, (ISBN 978-617-7468-26-3), Ivano-Frankivsk, 2018, pp. 234-237. [in Ukrainian].
- [6] A. D. Petrov, K. E. Domichev, P. A. Steblyanko, and Yu. A. Chernyakov, "Experimental substantiation of a variant of the material behavior model with shape memory and pseudoelasticity", *Modeling and information technologies: coll. of sci. works of Pukhov Institute of Modeling Problems in Energy, National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 80, pp. 81-87, 2017. [in Russian].
- [7] P. Steblyanko, A. Galishin, and A. Petrov, "Description of the thermomechanical surface of a material using a two-dimensional spline", in *Int. Sci. Conf. Mathematical problems of technical mechanics*, Dniprodzerzhynsk, 2015, p. 126. [in Russian].
- [8] Yu. N. Shevchenko, P. A. Steblyanko, and A. D. Petrov, "Numerical methods in nonstationary problems of the theory of thermoplasticity", *Problems of computing mechanics and durability of designs: coll. of sci. works*, no. 22, Dnepropetrovsk, 2014, pp. 250-264.
- [9] K. Domichev, P. Steblyanko, and A. Petrov, "Phenomenological modeling of volume nanomaterials with form memory", *Innovative Solutions in Modern Science: sci. journ.*, Dubai, no. 4 (40), pp. 5-17, 2020.
- [10] K. E. Domichev, P. O. Steblyanko, and A. D. Petrov, "Modeling of body behavior from pseudoelastic-plastic material under non-stationary loading", in *II Int. Conf. Functional Materials for Innovative Energy*, Kyiv, 2020, p. 54. [in Ukrainian].
- [11] K. E. Domichev, P. O. Steblyanko, and A. D. Petrov, "Modeling of instantaneous thermomechanical surface of three-linear two-phase material under non-stationary loading", in *Int. Sci.-Pract. Conf. Priority ways of the development of science and education*, Lviv, 2020, pp. 61-63. [in Ukrainian].
- [12] K. E. Domichev, and A. D. Petrov, "Mathematical modeling of pseudo-elastic-plastic bodies taking into account nonlinearity", in *XXXVIII Sci.-Tech. Conf. of Young Scientists and Specialists of Pukhov Institute of Modeling Problems in Energy, National Academy of Sciences of Ukraine*, Kyiv, 2020, pp. 10-12. [in Ukrainian].
- [13] K. Domichev, P. Steblyanko, and A. Petrov, "Mathematical modeling of structural elements from functionally heterogeneous materials" in *Міжнар. наук.-практ. конф. Science, research, development, technics and technology*, Krakow, 2020, pp. 27-29.
- [14] K. E. Domichev, "Mathematical and computer modeling of the nonstationary stress-strain elastic-plastic state of bodies under the action of physical and mechanical fields", in *Int. Sci.-Pract. Conf. Current issues of today*, Vinnytsia, 2018, pp. 82-85. [in Ukrainian].
- [15] K. E. Domichev, A. D. Petrov, and P. O. Steblyanko, "Mathematical modeling of the behavior of bodies from functional structurally inhomogeneous materials under the action of nonstationary loading", in *Int. Sci.-Pract. Conf. The latest technologies in education, science and industry*, Pokrovsk: DonNTU, 2020, pp. 211-213. [in Ukrainian].

P. O. Steblyanko, *Dr.Phys.-Math.Sc., professor*,
e-mail: caf-vmi@ukr.net

University of Customs and Finance
V. Vernadskoho St., 2/4, Dnipro, 49000, Ukraine

K. E. Domichev, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: demichevk@gmail.com

Kyiv International University
Lvovskaya St., 49, Kyiv, 03115, Ukraine

A. D. Petrov, *Ph.D.*
e-mail: caf-vmi@ukr.net
Dnipro National University named after Oles Honchar
Gagarin Ave., 72, Dnipro, 49000, Ukraine

SIMULATION OF THE BEHAVIOR OF A ROD FROM THREE-LINEAR TWO-PHASE MATERIAL TAKING INTO ACCOUNT TEMPERATURE

In the conditions of modern scientific and technological progress in various fields of science and technology an increasing number of new materials find application. The growth of production of pseudo-elastic-plastic materials or materials with shape memory which have phase transitions and their wide application necessitate the creation of new mathematical and computer models and calculation methods taking into account real technological loads and material properties. To simulate the behavior of structural elements made of such materials it is necessary to determine the unsteady thermomechanical state not only at the pseudo-elastic stage of deformation, but also beyond the elastic limit at significant plastic deformations. In order to construct physical relations between the stress and strain, it is necessary to know the position of the phase transition front and the kinetic response function. Such a problem is relevant for mathematical and computer simulation of materials having phase transitions with regard to temperature.

The paper formulates a nonlinear phenomenological model for describing the properties of alloys with memory at the material point and during temperature changes. It has been established that classical material diagrams are a curve enveloping a certain family of material diagrams constructed according to certain laws of changes in the rate and discontinuity of the deformation front. In order to use the phenomenological model to investigate two-phase materials with different elastic moduli, an additional problem related to the development of the instantaneous thermomechanical surface is introduced. A numerical study has been carried out in the work, as a result of which a typical dependence for the phase transition propagation velocity in time has been obtained. The graph of the dependence of the phase transition propagation velocity on time has three sections. On the first section the speed is zero, and on the third it reaches a constant value. Between them there is a section with a variable velocity. As a result of calculating the tangential modulus at each time integration step, the integral material diagram constructed in the work also has three characteristic sections. The phenomenological model obtained in the paper can be used for mathematical and computer modeling of functional materials.

Keywords: *mathematical simulation, shape memory materials, phase transition, phenomenological model, intelligent materials.*

[0000-0002-3873-5307] **И. М. Билоник**¹, к.т.н., доцент,**Н. Н. Береговенко**²,[0000-0002-8979-8076] **А. Е. Капустян**¹, к.т.н., доцент,

e-mail: aek@zntu.edu.ua

А. А. Шумилов¹,[0000-0003-3274-0604] **Д. И. Билоник**¹,[0000-0001-9266-1137] **Е. Я. Губарь**³, к.т.н., профессор¹Национальный университет «Запорожская политехника»

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина

²ТОВ КазБеГ

ул. Юношеская, 1, г. Кривой Рог, Днепропетровская область, 50011, Украина

³Черкасский государственный технологический университет

б-р Шевченко, 460, г. Черкассы, 18006, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ НАПЛАВКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОЛОТКОВ УДАРНОГО МЕХАНИЗМА ВСТРЯХИВАНИЯ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ

В статье представлены основные данные по технологическим возможностям производства деталей для ударного механизма встряхивания осадительных электродов электрофильтров. Предложена и аналитически обоснована перспективность изменения технологического процесса изготовления молотка ударного механизма с целью максимального увеличения коэффициента полезного действия электрофильтра при увеличении эксплуатационной надежности молотков и снижении их стоимости. Установлено, что процесс изготовления молотка практически можно свести к одной операции – электрошлаковой наплавке ударной части на хвостовик. При этом для исходных заготовок (хвостовик и расходный электрод) применяются стандартные стали стандартного сортамента. В результате исследования качества металла наплавленной ударной части молотка установлено, что процесс электрошлаковой наплавки обеспечивает формирование монолитной и бездефектной структуры; микроструктура наплавленного металла – феррито-перлитная, достаточно однородная и дисперсная, что характерно для литого металла в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Ударные испытания молотков, полученных с использованием электрошлаковой наплавки, проводили на специально разработанном ударном стенде, который обеспечивает энерго-кинематические параметры удара молотка по балке встряхивания, аналогичные промышленному электрофильтру. Испытания, которые соответствовали продолжительности эксплуатации электрофильтра до полного цикла, показали их высокую надежность (разрушений не было) и тем самым подтвердили возможность их промышленного применения. Рассчитанный ожидаемый экономический эффект от применения технологии электрошлаковой наплавки при изготовлении молотков ударного механизма встряхивания относительно разработанной конструкции молотка составил около 350–400 грн за штуку. Полученные в работе результаты могут быть использованы на производстве, при проектировании технологических процессов изготовления деталей, имеющих сложный технологический процесс изготовления.

Ключевые слова: электрошлаковая наплавка, молоток, осадительный электрод, неметаллические включения, надежность.

Введение. В настоящее время электрошлаковая технология (наплавка, сварка, приплавление, литье) нашла широкое применение для изготовления машиностроительных деталей, а также их ремонта и восстановления. Особенности кристаллизации и рафинирования, присущие электрошлаковому процессу,

обеспечивают высокое качество литого металла, свойства которого не уступают свойствам деформированного металла такого же химического состава, получаемого по технологиям открытой выплавки. Следует также отметить, что детали, полученные с использованием электрошлаковой технологии, имеют

минимальные допуски на механическую обработку, а в ряде случаев вообще не требуют выполнения финишных механических операций. Данные преимущества ставят электрошлаковую технологию в ряд востребованных и конкурентно способных.

Анализ литературных источников.

У истоков создания, дальнейшего развития и совершенствования электрошлаковой технологии стоят известные ученые с мировым именем: Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Г. С. Маринский, В. Я. Сиенко, К. А. Казачков, Г. А. Бойко, Л. М. Ступак, Ю. Г. Емельяненко, Ю. А. Шульте, И. К. Гаревских, Ю. В. Латаш, С. А. Лейбензон, Ю. М. Кусков, И. А. Рябцев.

Впервые в промышленном масштабе электрошлаковая технология (электрошлаковый переплав) была освоена на заводе «Днепропецсталь» им. А. Н. Кузьмина. Металл, прошедший электрошлаковый переплав, показал кардинальное улучшение качества. Существенно улучшились не только механические свойства, но и специальные, такие как жаропрочность, коррозионная стойкость, хладостойкость, выносливость, деформируемость, свариваемость [1]. Это способствовало широчайшему применению электрошлакового металла в самых ответственных сферах промышленного производства [1-3].

Особое направление электрошлаковой технологии представляет электрошлаковая наплавка (ЭШН) [4-6]. Благодаря гибкости электрошлакового процесса реализуется широкий спектр технологических схем. ЭШН применимо к порошковым проволокам, пластинчатым электродам и порошковым коробчатым электродам [7-10].

Электрошлаковая технология позволяет получать такие ответственные изделия, как коленчатые валы судовых дизелей, запорная арматура атомных электростанций, детали подвижного состава железнодорожного транспорта, военной техники и многое другое [11]. Наиболее эффективно применение электрошлаковой технологии, с позиций ресурсосбережения, для получения деталей с резко отличающимися геометрическими размерами. В этом случае деталь изготавливают, как правило, из двух частей. Одна часть – из стандартного проката, к которой наплавляется (приплавляется) вторая часть. В качестве примера можно привести такие детали электровозов, как поперечный вал уравнильной муфты (рисунок 1, а), крестовина (рисунок 1, б),

серьга подвески (рисунок 1, в) [12]. Применение данных деталей в трансмиссии электровоза свидетельствует об их высоком качестве и надежности.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Детали электровозов, получаемые с использованием электрошлаковой наплавки

В работах [13-15] убедительно показаны эффективность и целесообразность применения электрошлаковой технологии для изго-

товления бил молотков молотковых дробилок. На хвостовик била (молотка) из углеродистой стали наплавляют ударную часть из износостойкого высоколегированного материала. Полученные била не требуют окончательной механической обработки.

Приведенные в литературном обзоре сведения дают основание исследовать возможность применения технологии ЭШН для изготовления молотков ударного механизма балки встряхивания осадительных электродов электрофильтров.

Конструкции молотков, наиболее часто применяемых в настоящее время, приведены на рисунке 2, а, б. Изготовление данных молотков требует привлечения нескольких технологических процессов: механическая обработка (токарные, фрезерные операции, сверление), горячая гибка хвостовиков и корпусов, предварительная сборка и сварка. Учитывая, что в зависимости от конструкции электрофильтра в молотках может быть порядка 300–500 шт., их изготовление является весьма затратной составляющей.

Цель данной работы: исследование возможности применения для изготовления молотков ударного механизма встряхивания – электрошлаковой наплавки (ЭШН) при одновременном улучшении качественных характеристик металла ударной части молотка.

Задачи:

1. Наплавить на хвостовик молотка ударную часть.
2. Исследовать качество наплавленного металла и зоны сплавления хвостовика с ударной частью.
3. Провести испытания надежности полученного изделия.
4. Дать экономическую оценку предлагаемой технологии.

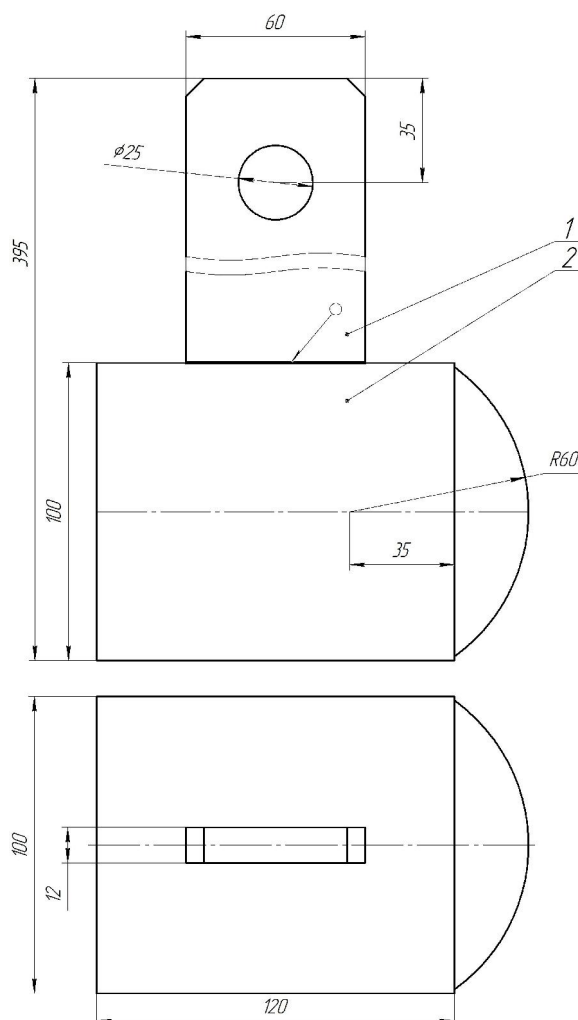
Изложение основного материала. Для проведения данной работы выбрали молоток, конструкция которого представлена на рисунке 2, в. Молоток состоит из двух деталей – хвостовика и ударной части. Хвостовик – пластина из Стали 20. Ударная часть (Сталь 20) имеет форму прямоугольного параллелепипеда сечением 100×100 мм и высотой 120 мм. Контактная часть молотка, которая непосредственно передает энергию удара наковальни балки встряхивания, имеет форму сферы. Диаметр основания сферы – 80 мм, радиус образующей – 60 мм.



а)



б)



в) чертеж молотка:

1 – хвостовик, 2 – ударная часть

Рисунок 2 – Конструкции применяемых молотков (а, б) и предлагаемого для получения ЭШН (в)

Следует отметить, что в ударных процессах, если контактирующие поверхности представляют собой плоскость (наковальня) и сферу (молоток), то передача энергии ударного импульса от ударника в волновод происходит с максимальным коэффициентом полезного действия [16]. Для нашего случая это также немаловажно. ЭШН ударной части молотка производили в медном разъемном водоохлаждаемом кристаллизаторе сечением 102×102 мм с использованием поддона, формирующего сферическую форму контактной части молотка.

Применяемая оснастка обеспечила необходимые размеры и форму изделия без финишной механической обработки. Для ЭШН использовали установку А-550 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона и флюс АНФ-6.

Расходуемый электрод – Сталь 20. Наплавку начинали твердым стартом. Параметры режима ЭШН выбрали согласно рекомендациям [17]. Ток наплавки – 1700–1800 А; напряжение – 41 В. Процесс проводили по однофазной классической схеме. Время наплавки составило 0,25–0,3 ч. Молотки, полученные с использованием ЭШН, представлены на рисунке 3, а. На рисунке 3, б видно сформированную сферическую контактную часть молотка и зону сплавления ударной части с хвостовиком. В результате контроля полученного изделия на соответствие геометрическим размерам, массе, а также наличию дефектов в зоне сплавления замечаний не выявлено.

Качество металла наплавленной ударной части оценивали по следующим показателям: макро- и микроструктура, эксплуатационная надежность.

Макроструктура ударной части молотка и зоны сплавления с хвостовиком представлена на рисунке 4, а.

Как видно, макроструктура металла, наплавленного в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе, имеет характерное для электрошлаковой отливки строение – направленный рост кристаллов, угол наклона столбчатых кристаллов к оси отливки – $40\text{--}45^\circ$. Макроструктура плотная, однородная, дефекты усадочного, ликвационного и технологического характера отсутствуют.

Микроструктура Стали 20 ударной части молотка (рисунок 4, б) – феррито-перлитная, достаточно однородная и дисперсная, что характерно для литого металла ЭШН в водоохлаждаемом кристаллизаторе.



а)



б)

Рисунок 3 – Молотки, полученные ЭШН ударной части (а), фрагмент сплавления ударной части с хвостовиком (б)

Для того чтобы определить возможность промышленного применения молотков из Стали 20, полученных с использованием ЭШН, были проведены испытания опытных молотков на специальном ударном стенде.

Для проектирования стенда рассчитали параметры ударного взаимодействия молотка с наковальней балки встряхивания осадительного электрода.



а) макроструктура

б) микроструктура, $\times 300$ **Рисунок 4 – Структура зоны сплавления ударной части с хвостовиком**

В основу расчета, приняты параметры ударного механизма электрофилтра ПДГС-3-70. В частности, масса молотка – 10,3 кг; расстояние от оси вращения молотка до центра массы бойка $l = 0,25$; частота вра-

щения вала – 25 мин^{-1} ; масса системы $m = 1000 \text{ кг}$; коэффициент восстановления $K = 0,063$. Методика расчета параметров приведена в работе [18]. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры ударного воздействия молотка на наковальню

Название характеристики	Размерность	Условное обозначение	Значение
Скорость бойка перед ударом по наковальне	м/с	V	6,3
Ускорение бойка перед ударом	м/с ²	A	157
Кинетическая энергия бойка до падения	Дж	a_0	0,22
Кинетическая энергия бойка перед ударом	Дж	Q	75,1

Испытательный ударный стенд (рисунок 5) состоит из рамы 1, на которой расположен электромеханический привод, включающий электродвигатель 2, ременную передачу 3 и червячный редуктор 4. Привод предназначен для вращения молоткового вала 5, установленного в двух подшипниковых опорах 6, которые смонтированы на раме 1. На валу 5 с шагом 250 мм и углом поворота 40° закреплены девять молотков 7.

При вращении вала 5 удар каждого из молотков 6 воспринимает наковальня 8, заваренная в волновод 9. Волновод соединен с системой демпферов 10, регулируя жесткость которых, обеспечивают условие ударного нагружения. Количество ударных циклов фиксирует механический датчик.

Воспроизведение на стенде реальных условий эксплуатации ударного механизма электрофилтра обеспечивает высокую достоверность результатов испытаний.

При испытании 50 опытных молотков количество ударных циклов для каждого из них составило 450 тыс., что соответствовало продолжительности эксплуатации электрофилтра до полного цикла. В результате испытаний ни один из опытных молотков не был разрушен. Это свидетельствует о надежности полученных изделий и о возможности их промышленного применения.

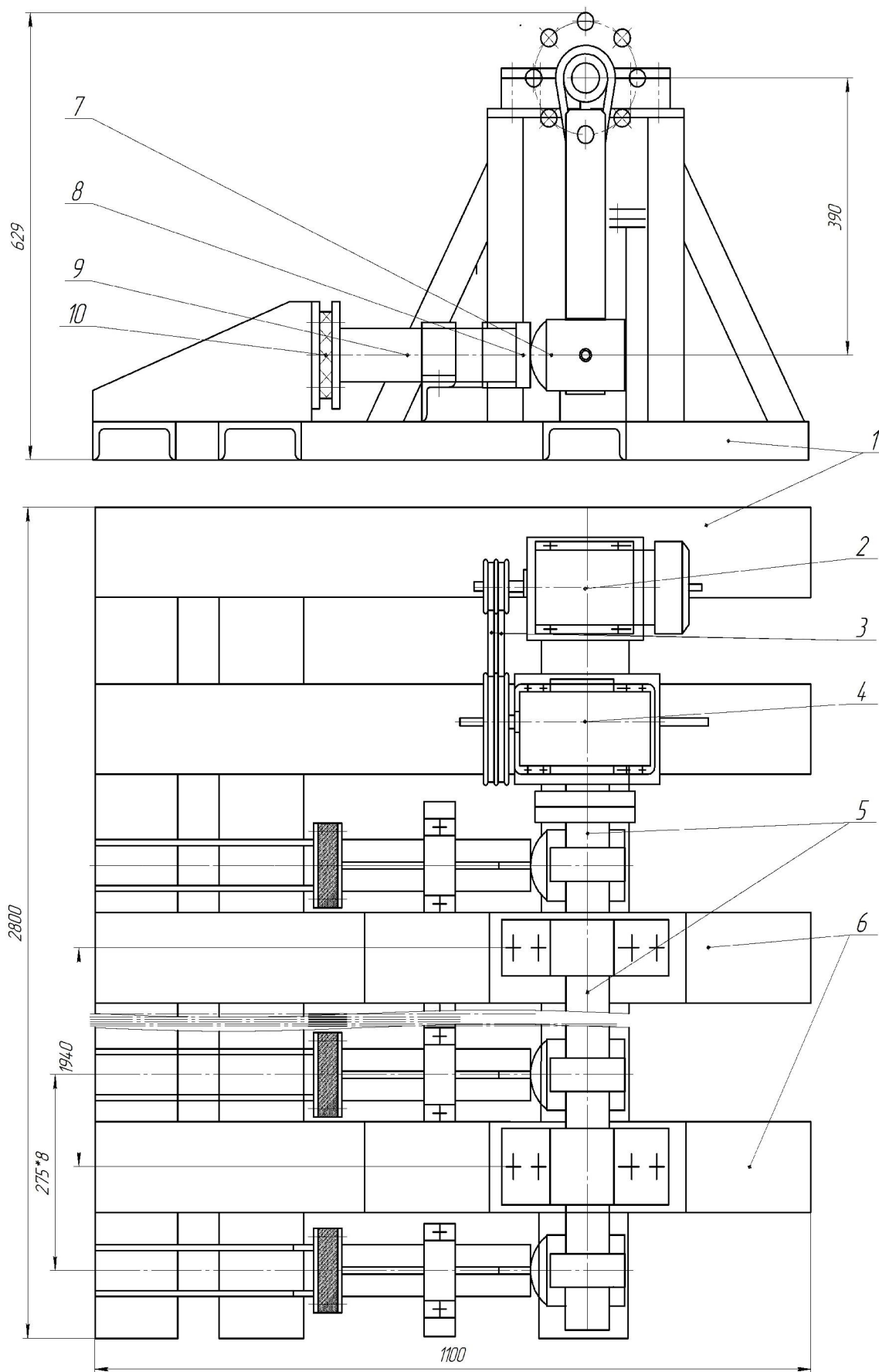


Рисунок 5 – Ударный стенд

Рассчитанный ожидаемый экономический эффект от применения технологии электрошлаковой наплавки при изготовлении молотков ударного механизма встряхивания применительно к конструкции молотка, представленной на рисунке 2, в, составил порядка 350–400 грн на штуку.

Выводы:

1. Экспериментально опробована технология электрошлаковой наплавки для изготовления молотков ударного механизма встряхивания осадительных электродов электрофильтров.

2. Установлено, что процесс изготовления молотка, практически, можно свести к одной операции – электрошлаковой наплавке. При этом, для исходных заготовок (хвостовик и расходный электрод) применяются стандартные стали стандартного сортамента.

3. В результате исследования качества металла наплавленной ударной части молотка установлено, что процесс электрошлаковой наплавки обеспечивает формирование монолитной и бездефектной структуры;

4. Ударные испытания молотков, полученных с использованием электрошлаковой наплавки, показали их высокую надежность (разрушений не было) и тем самым подтвердили возможность их промышленного применения.

Список использованных источников

- [1] Ю. М. Кусков, В. Н. Скороходов, А. И. Рябцев, и И. А. Сарычев, *Электрошлаковая наплавка*. Москва, Россия: Наука и техника, 2001.
- [2] М. И. Гасик, и Ю. С. Пройдак, "Применение ЭШП для повышения качества металла цельнокатаных железнодорожных колес", *Современная электрошлаковая металлургия*, № 1, с. 35-44, 2019.
- [3] Л. Б. Медовар, А. В. Чернец, и Ц. Ф. Грабовский, "Опыт изготовления и применения быстрорежущих валков ЭШН", *Проблемы спец. электрометаллургии*, № 3, с. 3-9, 2000.
- [4] Б. Е. Патон, и Л. Б. Медовар, "Новые электрошлаковые технологии и материалы", *Автоматическая сварка*, № 10-11, с. 188-193, 2003.
- [5] Ю. М. Кусков, "Электрошлаковая наплавка: достижение и перспективы (обзор)", *Сварочное производство*, № 10, с. 32-36, 2001.
- [6] И. М. Билоник, С. В. Давидченко, Д. И. Билоник, С. А. Шумикин, и А. В. Кононенко, "Получение заготовок запорного клапана из стали 08X18H10T методом электрошлаковой выплавки с дополнительным подогревом расходного электрода", *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, № 2, с. 39-42, 2018.
- [7] А. А. Артемьев, И. В. Зорин, и Н. Т. Соколов, "Электрошлаковая наплавка торцевых поверхностей изделий с использованием двухконтурной схемы питания шлаковой ванны", *Автоматическая сварка*, № 1, с. 12-16, 2008.
- [8] Н. А. Калинин, И. М. Билоник, П. К. Штанько, и А. А. Шумилов, "Исследование характера оплавления электродного торца при электрошлаковой наплавке порошковым электродом", *Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія*, вип. 120, с. 247-252, 2011.
- [9] Ю. М. Кусков, В. Г. Соловьев, и П. П. Осечка, "Электрошлаковая наплавка электродов большого сечения на постоянном токе в токоподводящем кристаллизаторе", *Автоматическая сварка*, № 3, с. 38-42, 2012.
- [10] Ю. М. Кусков, В. Г. Соловьев, В. А. Жданов, "Торцевая электрошлаковая наплавка торцов заготовок с использованием расходного и нерасходного электродов", *Автоматическая сварка*, № 2, с. 48-52, 2017.
- [11] М. Л. Жадкевич, А. Г. Богаченко, и В. Л. Шевцов, "Электрошлаковые технологии получения высоконагруженных деталей и инструмента", *Металлообработка*, № 4, с. 30-36, 2003.
- [12] Е. Н. Парахневич, "Физико-механические свойства металла при электрошлаковой наплавке стали 20ХН3А на сталь 45ХН", *Металл и литье Украины*, № 1, с. 28-31, 2013.
- [13] В. В. Чигарев, и В. Е. Агарков, "Обзор работоспособности и износостойкости бил молотковых дробилок", *Сборник научных трудов ПГТУ. Серия: Технические науки*, вып. 24, с. 40-45, 2012.
- [14] В. В. Вашковец, и М. В. Тепляшин, "Разработка технологического процесса восстановления бил молотковых мельниц электрошлаковой наплавкой", *Ползуновский альманах*, № 3, с. 37-39, 2008.

- [15] В. Г. Комков, и М. В. Тепляшин, "Технология восстановительной наплавки бил молотковых мельниц", *Ученые заметки ТОГУ*, т. 5, № 4, с. 655-661, 2014.
- [16] Д. Л. Соловьев, "Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием", дис. докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки", 05.02.08 "Технология машиностроения", Орел, 2005.
- [17] А. Н. Юсин, "Разработка рациональных режимов электрошлакового переплава роликов и стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовки", дис. канд. техн. наук: спец. 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов", Магнитогорск, 2004.
- [18] И. М. Билоник, П. К. Штанько, А. С. Петрашев, и А. А. Шумилов, "Определение силовых параметров взаимодействия бойка с наковальней в механизме встряхивания электрофилтра", на *XIV Международн. науч.-техн. конф. Надежность и долговечность механизмов, элементов конструкций и биомеханических систем*: сб. тезисов, 2006, с. 101-105.
- [6] I. M. Bilonik, S. V. Davidchenko, D. I. Bilonik, S. A. Shumikin, and A. V. Kononenko, "Obtaining blanks of a shut-off valve from steel 08X18H10T by electros slag smelting with additional heating of the consumable electrode", *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, no. 2, pp. 39-42, 2018. [in Russian].
- [7] A. A. Artemyev, I. V. Zoryn, and N. T. Sokolov, "Electros slag surfacing of the end surfaces of products using a two-circuit power supply to the slag bath", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 1, pp. 12-16, 2008. [in Russian].
- [8] N. A. Kalin, I. M. Bilonik, P. K. Shtanko, and A. A. Shumilov, "Investigation of the nature of the electrode end fusion during electros slag surfacing with a powder electrode", *Visnyk SevNTU. Seriya: Mekhanika, enerhetyka, ekolohiia*, iss. 120, pp. 247-252, 2011. [in Russian].
- [9] Yu. M. Kuskov, V. G. Solovyev, and P. P. Osechka, "Electros slag surfacing of electrodes of large cross-section at direct current in a current-supplying mold", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 3, pp. 38-42, 2012. [in Russian].
- [10] Yu. M. Kuskov, V. G. Solovyev, and V. A. Zhdanov, "End-face electros slag surfacing of workpiece ends using consumable and non-consumable electrodes", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 2, pp. 48-52, 2017. [in Russian].
- [11] M. L. Zhadkevich, A. G. Bogachenko, and V. L. Shevtsov, "Electros slag technologies for producing highly loaded parts and tools", *Metalloobrabotka*, no. 4, pp. 30-36, 2003. [in Russian].
- [12] Ye. N. Parakhnevich, "Physical and mechanical properties of metal during electros slag surfacing of steel 20XH3A on steel 45XH", *Metall i litye Ukrainy*, no. 1, pp. 28-31, 2013. [in Russian].
- [13] V. V. Chigarev, and V. Ye. Agarko, "The-overview of performance and durability of beat hammer crushers", *Sbornik nauchnykh trudov PGU. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*, iss. 24, pp. 40-45, 2012. [in Russian].
- [14] V. V. Vashkovets, and M. V. Tepliashyn, "Development of technological process of recovery of beat hammer mills by electros slag surfacing", *Polzunovskiy almanakh*, no. 3, pp. 37-39, 2008. [in Russian].

References

- [1] Yu. M. Kuskov, V. N. Skorokhodov, A. I. Riabtsev, and I. A. Sarychev, *Electros slag surfacing*. Moscow, Russia: Nauka i tekhnika, 2001. [in Russian].
- [2] M. I. Gasik, and Yu. S. Proidak, "The use of ESN to improve the quality of solid-rolled railway wheels metal", *Sovremennaya elektros slagovaya metallurgiya*, no. 1, pp. 35-44, 2019. [in Russian].
- [3] L. B. Medovar, A. V. Chernets, and Ts. F. Grabovskiy, "Experience in the manufacture and use of fast-cutting ESN rolls", *Problemy spets. elektrometallurgiyi*, no. 3, pp. 3-9, 2000. [in Russian].
- [4] B. E. Paton, and L. B. Medovar, "New electros slag technologies and materials", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 10-11, pp. 188-193, 2003. [in Russian].
- [5] Yu. M. Kuskov, "Electros slag surfacing: achievements and prospects (overview)", *Svarochnoye proizvodstvo*, no. 10, pp. 32-36, 2001. [in Russian].

- [15] V. G. Komkov, and M. V. Teplishyn, "Technology of restoration surfacing of hammer mills", *Uchenye zametki TOGU*, no. 4, pp. 655-661, 2014. [in Russian].
- [16] D. L. Solovyev, "Technology and equipment for static-impulse treatment by surface plastic deformation", thesis of D.Sc. in Engineering: spec. 05.03.01 "Technologies and equipment for mechanical and physico-technical processing", 05.02.08 "Mechanical engineering technology", Orel, 2005. [in Russian].
- [17] A. N. Yusin, "Development of rational modes of electrosag remelting of rollers and walls of molds of continuous casting machines", thesis of Ph.D. in Tech. Sciences: spec. 05.16.02 "Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals", Magnitogorsk, 2004. [in Russian].
- [18] I. M. Bilonik, P. K. Shtanko, A. S. Petrashev, and A. A. Shumilov, "Determination of force parameters of the interaction of the striker with the anvil in the shaking mechanism of electrostatic precipitator", in *XIV Int. Sci. and Tech. Conf. Reliability and durability of mechanisms, structural elements and biomechanical systems*: coll. of sci. works, 2006, pp. 101-105. [in Russian].

I. M. Bilonyk¹, *Ph.D., associate professor*,
M. M. Berehovenko²,
O. Ye. Kapustian¹, *Ph.D., associate professor*,
 e-mail: aek@zntu.edu.ua
O. A. Shumylov¹,
D. I. Bilonyk¹,
Ye. Ya. Hubar³, *Ph.D., professor*

¹Zaporizhzhia Polytechnic National University
 Zhukovsky St., 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine

²TOV (LLC) KaZBeH
 Yunatska St., 1, Kryvyi Rih, 50011, Ukraine

³Cherkasy State Technological University
 Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

APPLICATION OF ELECTROSLAG SURFACING FOR MANUFACTURE OF HAMMERS OF IMPACT SHOCKING MECHANISM OF ELECTROFILTERS SEDIMENTING ELECTRODES

The article presents the basic data on technological capabilities of the production of parts for the shocking mechanism of shaking the precipitating electrodes of electrostatic precipitators. The prospect of changing the manufacturing process of the hammer of impact mechanism in order to maximize the efficiency of electrostatic precipitator while simultaneously increasing the operational reliability of hammers and reducing the cost of their production is proposed and analytically substantiated. It is established that the process of making a hammer can be practically reduced to one operation – electrosag surfacing. In this case, for original workpieces (a shank and consumable electrode), standard steels of a standard assortment are used. As a result of studying the quality of metal of the welded shock part of a hammer it is established that the process of electrosag surfacing provides the formation of monolithic and defect-free structure; the microstructure of welded metal is ferrite-pearlite one, rather homogeneous and dispersed, which is typical for cast metal in a water-cooled mold. Impact tests of hammers obtained using electrosag surfacing were carried out on a specially designed impact stand, which provides energy-kinematic parameters of hammer impact on a shaking beam similar to an industrial electrostatic precipitator. The tests have shown their high reliability (there was no damage) and thus confirmed the possibility of their industrial use. The calculated expected economic effect from the use of electrosag surfacing technology in the manufacture of hammers of the percussion shaking mechanism relative to the developed design of the hammer was about 350–400 UAH per piece. The results obtained in the work can be used in production, in the design of technological processes for the manufacture of parts with a complex manufacturing process.

Keywords: electrosag surfacing, hammer, precipitating electrode, non-metallic inclusions, reliability.

І. М. Білоник¹, к.т.н., доцент,
М. М. Береговенко²,
О. Є. Капустян¹, к.т.н., доцент,
e-mail: aek@zntu.edu.ua
О. А. Шумілов¹,
Д. І. Білоник¹,
Є. Я. Губар³, к.т.н., професор

¹Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна

²ТОВ КаЗБеГ

вул. Юнацька, 1, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська область, 50011, Україна

³Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МОЛОТКІВ УДАРНОГО МЕХАНІЗМУ СТРУШУВАННЯ ОСАДЖУВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРІВ

У статті представлено основні дані про технологічні можливості виготовлення деталей для ударного механізму струшування осаджувальних електродів електрофільтрів. Запропоновано й аналітично обґрунтовано перспективність зміни технологічного процесу виготовлення молотка ударного механізму з метою максимального збільшення коефіцієнта корисної дії електрофільтру при одночасному збільшенні експлуатаційної надійності молотків і зниженні вартості їх виробництва. Встановлено, що процес виготовлення молотка практично можна звести до однієї операції – електрошлакового наплавлення. Водночас для вихідних заготовок (хвостовик і витратний електрод) застосовуються стандартні сталі стандартного сортаменту. В результаті дослідження якості металу наплавленої ударної частини молотка встановлено, що процес електрошлакового наплавлення забезпечує формування монолітної і бездефектної структури; мікроструктура наплавленого металу – ферито-перлітна, досить однорідна і дисперсна, що характерно для литого металу в водоохолоджуваному кристалізаторі. Ударні випробування молотків, отриманих з використанням електрошлакового наплавлення, проводили на спеціальному ударному стенді, який забезпечує енерго-кінематичні параметри удару молотка по балці струшування, аналогічні промислового електрофільтру. Випробування показали їх високу надійність (руйнувань не було) і тим самим підтвердили можливість їх промислового застосування. Розрахований очікуваний економічний ефект від застосування технології електрошлакового наплавлення при виготовленні молотків ударного механізму струшування стосовно розробленої конструкції молотка становив близько 350–400 грн за штуку. Отримані в роботі результати можуть бути використані на виробництві, при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей, що мають складний технологічний процес виготовлення.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, молоток, осаджувальний електрод, металеві включення, надійність.

[0000-0002-7978-1537] **О. О. Різник**, *магістрант*,

e-mail: riznyk.o@chpt.edu.ua

[0000-0002-0051-1316] **Н. А. Єфіменко**, *д.е.н., к.т.н., професор*

e-mail: yefimenko-nadezhda@ukr.net

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

б-р Шевченка, 81, м. Черкаси, 18000, Україна

МЕТОД ЕКСПЕРТНОЇ ОЦІНКИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА ПІДПРИЄМСТВАХ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

У статті запропоновано підходи до моделювання процесу контролю якості продукції на підприємствах машинобудівної галузі з метою оптимізації його результативності. Отримані результати дають можливість визначити профілі та тенденції стосовно якості продукції машинобудування, виявити пріоритети поліпшення її якості. Машинобудівному підприємству необхідно проводити моніторинг щодо задоволення споживачів, визначивши способи одержання цієї інформації, вчасно розробляти методи оцінювання та проводити аналіз отриманої інформації з метою задоволення потреб споживачів. Моделювання дає змогу вчасно виявити виникнення кризових явищ для кваліметричного оцінювання контролю якості виготовлення продукції машинобудівної галузі, відстежувати динаміку і тенденції змін, що відбуваються.

Ключові слова: кваліметричне оцінювання, модель, виробництво, стандарт, коефіцієнт вагомості.

Вступ. Проблема якості нині в усьому світі є однією з найактуальніших, і інтерес до неї неухильно зростає. Це пов'язано з тим, що якість продукції визначає пріоритети на ринку, економічну безпеку держави, багато в чому забезпечує стійкий розвиток цивілізації, збереження довкілля, здоров'я і благополуччя людини. У багатьох країнах світу, на різних континентах підвищення якості стало національною ідеєю в результаті величезних зусиль урядів, керівництва фірм і компаній, спрямованих на забезпечення високої якості продукції, послуг і робіт, процесів [4, 16].

Українське машинобудування поки що відстає у сфері вживання сучасних методів системи контролю. На сучасному етапі розвитку економіки України важливою умовою успішного функціонування машинобудівного підприємства є випуск високоякісної продукції, що сприяє підвищенню її конкурентоспроможності на вітчизняних та зарубіжних ринках збуту [12].

Мета дослідження: вдосконалення оцінювання якості продукції машинобудівної галузі за рахунок підвищення результативності її контролю з метою поліпшення конкурентоспроможності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [12] Л. В. Соколова та О. В. Стойка визначають тенденції й основні

напрями розвитку машинобудівного виробництва на сучасному етапі розвитку. Зроблено висновки про відсутність конкурентних переваг продукції машинобудування України на зовнішньому ринку, окреслено основні фактори, що стримують розвиток і модернізацію досліджуваної галузі. Серед напрямів стабілізації негативної ситуації, яка склалася у машинобудуванні, ряд авторів пропонують у рамках стратегії управління підприємством поетапно впроваджувати різноманітні бізнес-процеси, сучасні технології і методи, які дадуть змогу модернізувати підхід до управління якістю продукції машинобудівних підприємств, адаптувати його до світового рівня. С. Джордж і А. Ваймерських [4] описують, що у менеджменті галузі цілком продуктивними для управління підвищенням якості є стратегії і технології, які застосовуються успішними зарубіжними компаніями. В. В. Єфімов [16] системно досліджує аспекти поліпшення якості продукції, процесів, ресурсів. Р. А. Фатхутдінов [10] та Н. А. Єфіменко [5] вносять свої пропозиції, досліджуючи управління процесами відтворення капіталу на машинобудівних підприємствах. П. А. Орлов [7] вивчає стан, проблеми, напрями впровадження систем управління якістю. К. О. Черновська [13], О. В. Трайнев [9] та Л. М. Прокопишин [8] досліджують процес

формування та моделювання структурно-динамічного процесу результативності контролю якості. У [14] визначено основні поняття контролю якості, його типи. Міжнародним стандартом ДСТУ ISO 9001–2015 [2] окреслено вимоги до системи управління якістю. ДСТУ ISO 9000-2015 [3] подає рекомендації щодо поліпшення системи управління якістю. У книзі А. І. Вакуленко та ін. [1] подано визначення поняття «точність вимірювання». У роботі ми спираємося на трактування поняття кваліметрії, подане В. Н. Фоміним [11]. Н. В. Шуляр [15], С. В. Мартиненко [6] описують процес моніторингу та вимірювання процесів систем управління якістю.

Щоб оцінювання якості продукції машинобудівної галузі за кожним її рівнем було ефективним, насамперед, нами розглянуто методи, які використовуються для знаходження значень показників якості продукції.

Варто зауважити, що в роботах А. І. Вакуленко, О. І. Гарафонові, Н. А. Гарбуз [1], П. А. Орлова [7], Р. А. Фатхутдінова [10], В. Н. Фоміна [11] погляди щодо знаходження значень показників і визначення методів рівня якості продукції дещо різняться. Такі автори, як К. О. Черновська [13], М. І. Шаповал [14], В. Н. Фомін [11], Н. В. Шуляр [15] визначають дві групи методів для знаходження значень показників якості продукції (рисунок 1).

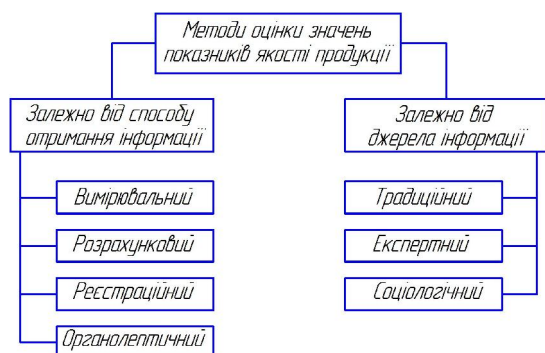


Рисунок 1 – Класифікація методів вимірювання показників якості машинобудівної продукції

Вимірний метод ґрунтується на використанні інформації, яку одержують з використання технічних вимірних засобів. Він призначений для точності отримання інформації, тобто за допомогою амперметра, вольтметра, спідометра визначається точність вимірювання показника. Використання реєстраційного методу дає можливість визначати продуктивність верстата шляхом підра-

хунку кількості операцій і деталей за одиницю часу, тобто цей метод базується на фіксації (реєстрації) здійснених подій з подальшим статистичним опрацюванням.

Розрахунковий метод визначається на основі інформації, яку одержали за допомогою теоретичних або емпіричних залежностей. Прикладом застосування розрахункового методу може бути час обробки деталі на верстаті залежно від довжини і діаметра оброблюваної деталі, швидкості руху верстата, а також обсягу вантажообороту залежно від вантажопідйомності та швидкості транспорту [14].

Реєстраційний метод. При його застосуванні використовується інформація, яку одержали шляхом підрахунку кількості подій, предметів або затрат на створення, експлуатацію продукції, кількість частин складного виробу (стандартних, уніфікованих, захищених авторським свідоцтвом тощо) [14].

Органолептичний метод базується на використанні інформації, яку одержують за допомогою органів чуття: зору, слуху, нюху, дотику, смаку, та застосовується при неможливості використання попередніх методів, що характерно для встановлення значень деяких естетичних показників якості, наприклад: чистота і рівномірність покриття поверхні, оцінка яскравості, контрастності та ін.

Розглянуті методи можуть застосовуватися спільно на різних стадіях життєвого циклу продукції. Так, вимірний і реєстраційний методи використовуються на стадіях розробки, виробництва і експлуатації продукції виробничо-технічного призначення, органолептичний і вимірний – на стадіях розробки і виробництва предметів споживання.

При традиційному методі здійснюється відбір інформації, необхідної для прийняття рішень (проводиться у лабораторіях, спеціальних центрах) [14]. Результати цього аналізу можуть мати суб'єктивний характер, оскільки все залежить від професійності, кваліфікації працівника, який проводить аналіз.

При застосуванні експертного методу проводиться розрахунок показників якості групами спеціалістів-експертів, які, як правило, користуються експертним методом одержання інформації про якість продукції. Цей метод застосовують тоді, коли недостатньо інформації для прийняття рішень, тому запрошуються експерти, які є спеціалістами у своїй діяльності.

При застосуванні *соціологічного методу* використовуються методи анкетування, опитування, для того щоб визначити думку фактичних і потенційних споживачів.

Виклад основного матеріалу. Оцінювання якості є не тільки основною й початковою стадією складного процесу керування якістю об'єктів [1]. Без знання про рівень властивостей і якості розглянутих об'єктів немає можливості для науково обґрунтованого прийняття необхідного керівного рішення й подальшого здійснення впливу на об'єкт із метою зміни якості. Контроль на основі впровадження кваліметричного оцінювання контролю якості виготовлення машинобудівної продукції припускає взаємодію підрозділів машинобудівного підприємства, кінцевою метою якої є високий рівень якості виробничого процесу у встановлений термін [11, 13, 14]. Оцінювання якості машинобудівної продукції передбачає визначення таких рівнів якості: абсолютний рівень якості вибору знаходять шляхом обчислення обраних для його вимірювання показників без їх порівняння з відповідними показниками аналогічних виробників; відносний рівень якості машинобудівної продукції передбачає порівняння її показників з абсолютними показниками якості найкращих аналогічних вітчизняних та зарубіжних зразків виробів; перспективний рівень передбачає оцінювання якості виробів з урахуванням пріоритетних напрямів і темпів розвитку науки і техніки; оптимальний рівень якості – рівень, за якого загальні суспільні витрати на виробництво й використання машинобудівної продукції за певних умов споживання були б мінімальними [15]. Специфікою кваліметричних вимірювань є відсутність конкретних фізичних мір якості тієї чи іншої продукції, а наявні стандартні зразки досліджуваної продукції не завжди відповідають метрологічним вимогам, які ставляться до мір, що, власне, і становить основну проблему оцінювання якості і відповідності продукції. Тому для реалізації процедури кваліметричних вимірювань доцільно використати віртуальну міру якості продукції, тобто теоретичний аналог відповідної фізичної міри якості.

Безпосереднє оцінювання рівня якості продукції в кваліметрії зазвичай здійснюють комплексним методом за одним із двох узагальнених показників якості – комплексним показником якості або профілем якості [14].

Оцінювання рівня якості продукції доцільно здійснювати за профілем якості як сукупності одиничних показників її якості [16], оскільки він значно повніше відображає якість продукції, ніж комплексний показник якості.

Комплексний показник сукупності властивостей K залежить від «зважених» параметрів властивостей k_i , що враховуються, тобто від показників окремих властивостей з урахуванням їх вагомості, значущості для K . Отже,

$$K=f(k_i), \quad (1)$$

де k_i – величина, що характеризує розмір i -ї властивості з урахуванням її значущості; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; де n – загальна кількість властивостей, що враховуються.

Профілі якості машинобудівної продукції доцільно систематизувати за наступними ознаками:

1. Залежно від призначення профілі якості поділяють на:

– оцінювані профілі якості, в яких числові значення одиничних показників якості, з яких складаються ці профілі, визначають експериментально вимірюванням відповідних властивостей досліджуваної продукції;

– базові профілі якості, за якими здійснюють порівняння оцінюваних профілів якості продукції під час визначення рівня її якості.

2. Залежно від повноти відображення якості досліджуваної продукції профілі якості поділяють на:

– комплексні профілі якості, що відображають якість досліджуваної продукції як цілісного об'єкта;

– групові профілі якості, що формують для кожної групи показників якості досліджуваної продукції, зокрема залежно від її функціонального призначення і потреб споживачів.

На основі процесного підходу існує необхідність побудови ієрархічної моделі кваліметричного оцінювання контролю якості виготовлення машинобудівної продукції (рисунк 1). На думку авторів, науковий і практичний інтерес має розширення методичного підходу до дій етапів, зокрема вимір і планування показників процесу, а також моніторинг процесів. Кваліметричне оцінювання контролю якості виготовлення машинобудівної продукції ґрунтується на використанні локальної системи показників внутрішньовиробничого процесу, зокрема: показника результативності – досягнення запланованого результату рівня якості кінцевої продукції з урахуванням

ризиків; показника ефективності – вартість (витрати, пов'язані з виконанням сучасної методики контролю якості процесу) і час, витрачений на процес.

Крім того, показник гнучкості може бути використаний як додаткова характеристика подальшого розвитку процесу, здатного визначити вплив процесу на навколишнє середовище, потенційні ризики для персоналу тощо [4]. Вибір «згортки» окремих показників властивості машинобудівної продукції в єдиний комплексний показник передбачає адекватність математичної моделі до завдань кваліметричного аналізу машинобудівної продукції [13]. Значна кількість літературних джерел наголошує на необхідності пошуку для окремих завдань та об'єктів кваліметричного аналізу машинобудівної продукції оптимального вигляду функції

$$U = f(q_1 w_1, q_2 w_2, \dots, q_i w_i), \quad (2)$$

де – $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_i\}_{i=1,n}$ – множина показників властивості; $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}_{i=1,n}$ – множина коефіцієнтів вагомості для кожного q_i , і робить висновок, що формула (2) має вирішальне значення для кваліметричного аналізу різних видів машинобудівної продукції. З цим можна погодитись, якщо кваліметричну оцінку машинобудівної продукції трактувати як абсолютну оцінку. Однак, якщо формувати оцінку як відносну, то вплив на результат оцінювання вигляду функції не матиме якогось істотного значення.

Основним елементом управління кваліметричного аналізу машинобудівної продукції є методика кваліметричного оцінювання. Тобто, управління процесом кваліметричного аналізу машинобудівної продукції варто базувати як на специфічних, відмінних від класичних, метрологічних заходах, так і на добре відомих і випробуваних процедурах, зокрема, шляхом розроблення, формалізації у вигляді нормативного документа й атестації відповідних методик [11].

Методику виконання кваліметричного аналізу машинобудівної продукції варто трактувати як систему правил, що дають можливість отримати комплексну оцінку якості і на її основі прийняти вірогідне рішення щодо оцінюваного об'єкта.

В методиці кваліметричної системи якості має бути вказано:

– групу об'єктів певного призначення, до якої методика може бути застосована, і від-

мінність цієї групи від аналогічних, до яких її не можна застосовувати;

– групу споживачів, з урахуванням вимог яких методика розроблена;

– мету оцінювання, опис ситуації оцінювання (умов функціонування або використання об'єкта, в яких виявляються його споживчі властивості);

– перелік застосовуваних показників властивості з їх означеннями і шкалами вимірювання; за необхідності – спосіб отримання оцінок показників;

– вимоги до засобів оцінювання, засобів вимірювальної техніки і допоміжних засобів;

– умови виконання досліджень і діапазон впливних величин за кожним показником властивості;

– методи і порядок виконання оцінювання і/або вимірювань за кожним показником властивості;

– показники точності результатів і форми їх подання з урахуванням факторів впливу за кожним показником властивості;

– за необхідності, спосіб відбору експертів, що оцінюють об'єкт; спосіб їх опитування;

– алгоритм дій з оцінками, отриманими за всіма показниками, для отримання комплексної оцінки;

– перелік рішень, що приймаються відповідно до значень комплексного кваліметричного аналізу якості машинобудівної продукції.

Кінцевою метою розроблення й атестації методики є досягнення гарантованої нею якості виконання дослідження. Тому важливим є аналіз складових, що забезпечують якість методики кваліметричного оцінювання, а саме: точність і необхідний рівень довіри до кваліметричного аналізу якості машинобудівної продукції.

Поняття «точність вимірювань» варто розглядати ширше як «точність експериментальних досліджень», передбачаючи, що воно охоплює як правильність, так і прецизійність результатів вимірювань, випробувань, а також кількісного оцінювання значень, що є показниками властивості продукції та отримуються з використанням засобів з нормованими характеристиками точності. Характеристика прецизійності, в свою чергу, передбачає такі складові, як збіжність і відтворюваність, що пов'язані з умовами повторного експерименту. За умови практичної реалізації кваліметричного аналізу якості машинобудівної продукції зазначені

умови варто доповнити впливом властивостей партії продукції, що приведе до специфічних складових відтворюваності і правильності. Необхідно розмежовувати вплив на відтворюваність результатів якості самого оцінювання, що характеризується певною методикою, і якості продукції

Результати досліджень і їх обговорення. Відповідно до потреб забезпечення точності кваліметричного аналізу якості машинобудівної продукції необхідно розрізняти поняття базового зразка продукції як еталону виробу і як зразка, необхідного для атестації методики кваліметричного оцінювання машинобудівної продукції [11].

В ході вирішення різних кваліметричних завдань на практиці широко використовуються експертні методи оцінювання, які в сукупності з вимірювальними методами дають змогу отримати якнайбільший обсяг інформації про об'єкт дослідження.

У зв'язку з цим на початковому етапі будь-якої експертизи основним завданням кваліметролога є грамотне формування експертної групи, в ході якого визначається оптимальна кількість експертів, необхідна для проведення експертизи, а також проводиться кількісне оцінювання якості експертної групи різними методами. Розрахунок кількості експертів, необхідної для виявлення якнайбільшої кількості даних, зводиться до знаходження такої їх кількості m , при якій вірогідність появи змістовно нової пропозиції із залученням $(m + 1)$ -го експерта стає меншою заздалегідь набутого значення α .

Виробникові важливо відстежувати стан цієї системи, що дало б йому змогу вже на стадії впровадження інновацій провести оцінювання продукції в одиницях задоволеності і відповідно до цього приймати оптимальні рішення по підвищенню якості продукції.

Перевагою використання споживчої бази порівняння є те, що вона має ряд рівнів, які дають споживачеві змогу віднести за інтенсивністю показників якості цю характеристику до того чи іншого рівня профілю якості, і тим самим зумовити відгук – від невдоволення до високої задоволеності

В результаті досліджень було виявлено, що оцінка показника якості, зростання якого небажане в продукції, може бути представлена залежністю (рисунк 2) рівня задоволеності (відгук споживача) від інформації стосовно показника якості.

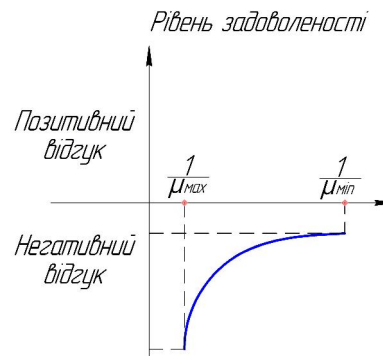


Рисунок 2 – Відгук споживача про інформацію з некорисною властивістю

Оцінка показника якості, зростання якого бажане в продукції, визначається залежністю (рисунк 3).

Для здійснення оцінювання використовуються дві реперні точки: μ_{min} і μ_0 , які дають споживачеві можливість розрізняти рівні – базовий, потрібний і бажаний.

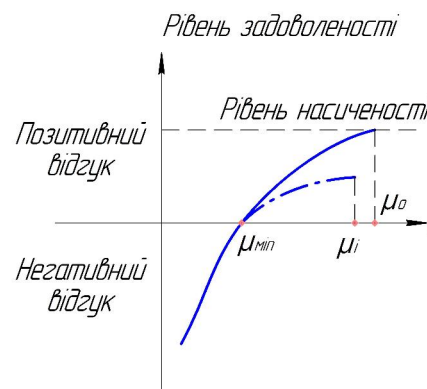


Рисунок 3 – Відгук споживача про інформацію з корисною властивістю

Оцінка показника якості, зростання якого є нейтральним, визначається залежно від виду кривої, зображеної на рисунку 4.

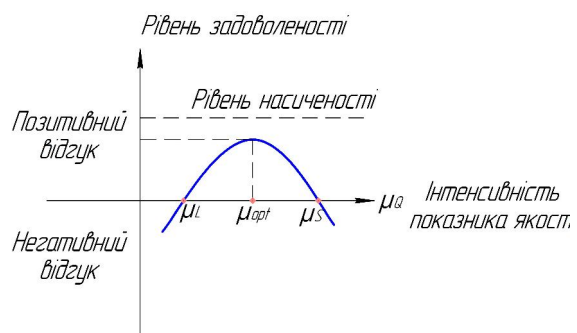


Рисунок 4 – Відгук споживача про інформацію з нейтральною властивістю

Найбільший позитивний відгук можливий при досягненні показника якості оптимального значення.

Для кожного виду оцінки побудовано математичні моделі відгуку споживача на вплив кожного типу показника якості [9].

Отже, отримуємо базу порівняння для кожного показника якості продукції, що складається з відповідних реперних точок:

- границі чутливості μ_{min} і точки насичення μ_0 – для оцінювання односторонніх показників якості, що зростають;
- точки насичення і границі мінімальної чутливості – для оцінювання односторонніх показників якості, що убують;
- граничні рівні μ_s , μ_1 і оптимальний рівень μ_{opt} – для оцінювання двосторонніх показників якості.

Таким чином можна виділити критерії формування рівнів профілю якості продукції (рисунок 5).

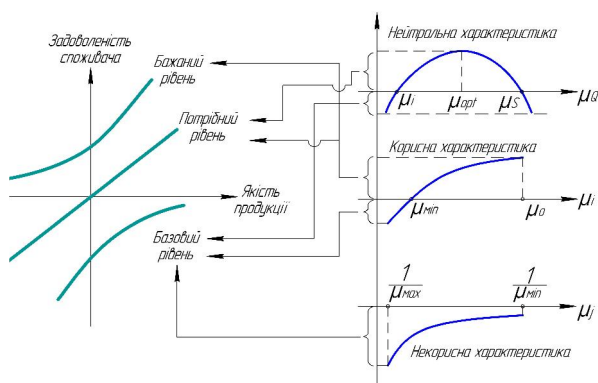


Рисунок 5 – Формування рівнів профілю якості

Базовий рівень профілю якості може наповнюватися усіма видами показників якості залежно від їх інтенсивності. Основою базового рівня є некорисні показники якості і корисні показники якості з рівнем інтенсивності, меншим або рівним порогу чутливості.

Необхідний рівень формується в основному за рахунок корисних показників якості. Внесок нейтральних показників якості є незначним.

Бажаний рівень визначається корисними показниками якості з високим рівнем інтенсивності відносно існуючого порогу насичення.

Висновки. В результаті дослідження запропоновано метод підвищення конкурентоспроможності продукції машинобудівної галузі в умовах глобального ринку шляхом

використання методології кваліметричного оцінювання якості, яка дає виробникові можливість виявляти найважливіші характеристики продукції з точки зору споживача, визначати ефективність власних потенційних конкурентних переваг у цій системі цінностей.

Забезпечення якості кваліметричного оцінювання є можливим лише за умови дотримання єдності та точності отримання результатів кваліметричного аналізу продукції машинобудівної галузі. Для цього кваліметричне оцінювання продукції машинобудування, за аналогією з іншими галузями, що мають своє метрологічне забезпечення, має базуватися на власній системі управління. В системі управління варто використовувати всі можливі заходи, такі як: верифікація обладнання, керування процесами оцінювання, застосування атестованих методик та ін., які сприятимуть досягненню цілей щодо якості машинобудівної продукції при керуванні ризиками отримання невірогідних результатів оцінювання.

В процесі встановлення номенклатури показників якості досліджуваної продукції на машинобудівному підприємстві та їх систематизації відповідно до концепції кваліметрії, насамперед, необхідно проаналізувати ті її властивості, які входять до складу якості продукції і забезпечують можливість оцінювання рівня її якості, зокрема при розробленні, виготовленні, експлуатації або споживанні продукції.

Список використаних джерел

- [1] А. В. Вакулєнко, О. І. Гарафонова, та Н. А. Гарбуз, *Управління якістю*. Київ, Україна: КНЕУ, 2010.
- [2] ДСТУ ISO 9001–2015. *Системи управління якістю. Вимоги. На заміну ДСТУ ISO 9001:95, ДСТУ ISO 9002:95, ДСТУ ISO 9003:95*. Київ: Держстандарт України, 2001.
- [3] ДСТУ ISO 9000–2001. *Система управління якістю. Настанови щодо поліпшення діяльності. Чинний від 10.01.2001 р.*
- [4] С. Джордж, и А. Ваймерских, *Всеобщее управление качеством: стратегии и технологии, применяемые сегодня в самых успешных компаниях (TQM)*. Санкт-Петербург, Россия: Виктория плюс, 2002.
- [5] Н. А. Єфіменко, "Управління процесами відтворення капіталу на машинобудівних підприємствах", *Вісник Хмельницького*

- національного університету. Серія: Економіка, № 5, с. 175-178, 2007.
- [6] С. В. Мартиненко, "Моніторинг та вимірювання процесів систем управління якістю з використанням системи управління ризиками", *Залізничний транспорт України*, № 3, с. 28-39, 2010.
- [7] П. А. Орлов, "Впровадження систем управління якістю: стан, проблеми, перспективи", *Стандартизація. Сертифікація. Якість*, № 6, с. 59-63, 2004.
- [8] Л. М. Прокопишин, "Механізм формування та використання управлінського потенціалу на підприємствах машинобудування", *Актуальні проблеми економіки*, № 7, с. 138-145, 2009.
- [9] О. В. Трайнев, "Алгоритмы создания и функционирования программно-технических комплексов для реализации задач принятия решений", *Автоматизация и современные технологии*, № 3, с. 23-29, 2006.
- [10] Р. А. Фатхутдинов, *Производственный менеджмент*, Санкт-Петербург, Россия: Питер, 2011.
- [11] В. Н. Фомин, *Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация*. Москва, Россия: Тандем, 2008.
- [12] Л. В. Соколова, та О. В. Стойка, "Сучасний стан машинобудування України та тенденції його розвитку за умов незбалансованої економіки", *Ефективна економіка*, № 11, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7378>. Дата звернення: Груд. 02, 2020.
- [13] К. О. Черновська, "Моделювання структурно-динамічного процесу результативності контролю якості продукції на машинобудівних підприємствах", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 127-132, 2015.
- [14] М. І. Шаповал, *Основи стандартизації, управління якістю і сертифікації: навч. посіб.* Київ, Україна: Вид-во СУ, 2001.
- [15] Н. В. Шуляр, "Моніторинг систем управління якістю машинобудівних підприємств", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*, № 635, с. 138-145, 2008.
- [16] В. В. Ефимов, *Улучшение качества продукции, процессов, ресурсов*. Москва, Россия: КноРус, 2016. ЭБС BOOKRU. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://book.ru/book/920749>

References

- [1] A. V. Vakulenko, O. I. Harafonova, and N. A. Harbuz, *Quality management*. Kyiv, Ukraine: KNEU, 2010. [in Ukrainian].
- [2] DSTU ISO 9001–2001. *Quality management systems. Requirements. To replace DSTU ISO 9001:95, DSTU ISO 9002:95, DSTU ISO 9003:95*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2001. [in Ukrainian].
- [3] DSTU ISO 9000-2001. *Quality management system. Guidelines for improving performance. Effective from Jan. 10, 2001*. [in Ukrainian].
- [4] S. George, and A. Vaymerskikh, *Total Quality Management: Strategies and Technologies Used in Today's Most Successful Companies (TQM)*. St. Petersburg, Russia: Viktoria Plus, 2002. [in Russian].
- [5] N. A. Efimenko, "Management of capital reproduction processes at machine-building enterprises", *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Ekonomika*, no. 5, pp. 175-178, 2007. [in Ukrainian].
- [6] S. V. Martynenko, "Monitoring and measurement of processes for quality management systems with the use of risk management", *Zaliznychnyi transport Ukrainy*, pp. 28-39, 2010. [in Ukrainian].
- [7] P. A. Orlov, "Implementation of quality management systems: status, problems, prospects", *Standartyzatsiia. Sertyfikatsiia. Yakist*, no. 6, pp. 59-63, 2004. [in Ukrainian].
- [8] L. M. Prokopyshyn, "Mechanism of formation and use of management capacity in the mechanical engineering", *Aktualni problemy ekonomiky*, no. 7, pp. 138-145, 2009. [in Ukrainian].
- [9] O. V. Traynev, "Algorithms for the creation and functioning of software and hardware complexes for the implementation of decision-making tasks", *Avtomatizatsiya I sovremennyye tekhnologii*, no. 3, pp. 23-29, 2006. [in Russian].
- [10] R. A. Fatkhutdinov, *Production Management*. St. Petersburg, Russia: Piter, 2003. [in Russian].

- [11] V. N. Fomin, *Qualimetry. Quality Management. Certification*. Moscow, Russia: Tandem, 2008. [in Russian].
- [12] L. V. Sokolova, and O. V. Stoika, "The current state of machine building in Ukraine and trends in its development in an unbalanced economy", *Efektivna ekonomika*, no. 11, 2019. [Online]. Available: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7378>. Accessed on: Dec. 02, 2020.
- [13] K. O. Chernovska, "Modeling of the structural-dynamic process of the effectiveness of product quality control at machine-building enterprises", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 3, pp. 127-132, 2015. [in Ukrainian].
- [14] M. I. Shapoval, *Fundamentals of Standardization, Quality Management and Certification*. Kyiv, Ukraine: Vyd-vo YeU, 2001. [in Ukrainian].
- [15] N. V. Shulyar, "Monitoring of quality management systems of machine-building enterprises", *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Menedzhment ta pidpriemnytstvo v Ukraini: etapy stanovlennia i problemy rozvytku*, no. 635, pp. 138-145, 2008. [in Ukrainian].
- [16] V. V. Efimov, *Improving the quality of products, processes, resources*. Moscow, Russia: KnoRus, 2016. EBC BOOKRU. [Online]. Available: <https://book.ru/book/920749>.

O. O. Riznyk, undergraduate,

e-mail: riznyk.o@chpt.edu.ua

N. A. Efimenko, D.Sc., Ph.D., professor

e-mail: yefimenko-nadezhda@ukr.net

Cherkasy National University named after Bohdan Khmelnytsky,
Shevchenko blvd, 81, Cherkasy, 18000, Ukraine

METHOD OF EXPERT ASSESSMENT OF PRODUCT QUALITY CONTROL AT ENTERPRISES OF MACHINE-BUILDING INDUSTRY

This article proposes modeling of the process of product quality control efficiency at machine-building enterprises. The obtained results allow to determine the profiles and trends regarding the quality of machine-building products, to identify priorities for improving product quality. Each machine-building enterprise needs to monitor customer satisfaction by identifying ways to obtain this information, develop evaluation methods in a timely manner and analyze the information obtained in order to meet the needs of consumers of machine-building products.

Modeling can diagnose the emergence of the crisis to assess qualimetric quality control manufacturing machinery products, trace trends and changes taking place.

The problem of quality is now one of the most pressing worldwide, and the interest in it is growing steadily. This is due to the fact that product quality determines market priorities, economic security of the state; largely ensures the sustainable development of civilization, preservation of the environment, human health and well-being

In most countries of the world, on different continents, quality improvement has become a national idea as a result of great efforts of governments, management of firms and companies aimed at ensuring high quality products, services and works, processes.

Ukrainian mechanical engineering is still lagging behind in the use of modern methods of control system. At the present stage of development of the economy of Ukraine, an important condition for the successful operation of the machine-building enterprise is the production of high quality products, which helps to increase its competitiveness in domestic and foreign markets.

Quality assessment is not only the main and initial stage of a complex process of quality management of objects. Without knowledge of the level of properties and quality of the considered objects, there is no possibility for scientifically substantiated acceptance of the necessary administrative decision and the further influence on an object for the purpose of change of quality. Today there is a need to introduce a qualimetric assessment of quality control of machine-building products on the scale

of the machine-building enterprise on the basis of the standard ISO 9001:2015. The effectiveness of management in machine-building enterprises should be based on a comprehensive approach to interdependence and interaction of technical processes. Control based on the introduction of qualimetric assessment of quality control of machine-building products involves the interaction of units of the machine-building enterprise, the ultimate goal of which is a high level of quality of the production process in a timely manner. Assessment of the quality of machine-building products involves determining the following levels of quality: the absolute level of quality of choice – found by calculating the selected indicators for its measurement without comparing them with the corresponding indicators of similar manufacturers; relative level of quality of machine-building products – provides comparison of its indicators with absolute indicators of quality of the best similar domestic and foreign samples of products; promising level – involves assessing the quality of products taking into account the priority areas and rates of development of science and technology; optimal level of quality – the level at which the total public costs of production and use of machine-building products under certain conditions of consumption would be minimal.

On the basis of the process approach there is a need to build a hierarchical model of qualimetric assessment of quality control of manufacturing products. According to the author, scientific and practical interest is the expansion of the methodological approach to the actions of the stages, in particular the measurement and planning of process indicators, as well as process monitoring.

Qualimetric assessment of quality control of machine-building products is based on the use of a local system of indicators of the internal production process, in particular: the performance indicator – achieving the planned result of the level of quality of final products, taking into account risks; the efficiency indicator – the cost (costs associated with the implementation of modern methods of process quality control) and time spent on the process.

In addition, the flexibility indicator can be used as an additional characteristic of the further development of the process, able to determine the impact of the process on the environment, potential risks to staff, etc.

Keywords: *qualimetric assessment, model, production, standard, weighting factor.*

CONTENTS

AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

- Bazilo C. V., Khlivnyi V. V., Bondarenko Yu. Yu.* Modification and practical application of piezoelectric transducers with separated electrodes 5
- Piltyay S. I., Bulashenko A. V., Kalinichenko Ye. I., Bulashenko O. V.* High performance waveguide polarizer for satellite information systems..... 14

INFORMATION TECHNOLOGIES

- Tryus Yu. V., Zaspа H. O., Kozhemiakin O. S., Ashyrova A. V.* Information and analytical system for educational activities support of structural divisions of higher education institutions..... 27
- Ptashkin R. L., Hozhyi O. O., Obruch Yu. Yu., Pavlov V. V., Kalinichenko R. A.* RAM analysis as one of the methods for computer forensics..... 39
- Oksamytna L. P., Svirzhevsky O. V.* Design and development of web-oriented currency exchange information service 48
- Balandina N. M., Vasilenko M. D., Slatvinska V. M., Sysoienko S. V.* Approach to modeling of behavioral manifestations in social engineering in the interests of information protection 57
- Faure E. V., Shvydkyi V. V., Shcherba A. I., Kharin O. O., Stupka B. A.* Method of cyclic synchronization based on permutations 67
- Prokopenko T. O., Mozhaiev M. O., Rudnytskyi S. V., Rudnytska Yu. V.* Programming of unloaded redundancy mode in computer systems of critical application 77
- Smirnova T. V., Mynailenko R. M., Dorenskyi O. P., Sysoienko S. V., Smirnov S. A.* Cloud automated system of intellectual support of decision-making for technological processes 84
- Vasylchenkov O. H., Yevsina N. O., Salnikov D. V., Buslov P. V.* Implementation of a filter with post-filtering decision-making on microprocessor architectures with vector extension to ensure performance indicators of forensic examination 93
- Usik P. S., Smirnov O. A., Myronets I. V., Buravchenko K. O., Yakymenko N. M.* Method of improving the efficiency of distributed data processing in computer systems of cellular operators 103

CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING, ECOLOGICAL SECURITY

- Pochynok V. V., Viazovik V. M.* Mathematical model of diffusion processes in electrocatalytic processing of CO₂ in organic compounds..... 111
- Myslyuk O. O., Khomenko O. M., Yehorova O. V.* Current natural and anthropogenic threats to ecological well-being of freshwater ecosystems..... 120
- Motrichuk R. B., Kyrychenko O. V., Vaschenko V. A., Kolinko S. O., Butenko T. I., Kyrychenko Ye. P., Tsybulin V. V.* Regularities of influence of technological parameters and external factors on the temperature and composition of combustion products of pyrotechnical nitrate-metal mixtures 131

MATERIALS SCIENCE, TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT
OF MODERN MACHINE-BUILDING AND FOOD PLANTS

- Steblyanko P. O., Domichev K. E., Petrov A. D.* Simulation of the behavior of a rod from three-linear two-phase material taking into account temperature 143
- Bilonyk I. M., Berehovenko M. M., Kapustian O. Ye., Shumylov O. A., Bilonyk D. I., Hubar Ye. Ya.* Application of electrosag surfacing for manufacture of hammers of impact shocking mechanism of electrofilters sedimenting electrodes..... 152
- Riznyk O. O., Efimenko N. A.* Method of expert assessment of product quality control at enterprises of machine-building industry 162