

ЗМІСТ

Burmistrov S. V., Panasco O. M., Vakulenko D. V. Matrix method of receiving the full composition of the groups of relativity of Boolean functions	3
Ukhina H. V., Bilenko A. A., Sytnikov V. S. Adjustable components in automated control systems of NPP technological processes.....	8
Базіло К. В. Дослідження впливу навантаження та розмірів електродів п'єзоелектричного диску на його амплітудно-частотні характеристики.....	15
Базіло К. В., Білокінь С. О., Бондаренко М. О., Медяник В. В. Дослідження мікроелектромеханічних п'єзоелектричних структур методом атомно-силової мікроскопії	21
Демчук І. М., Столяренко Г. С. Аналіз параметричної стохастичної системи синтезу гідрозин-сирцю з вторинної сировини в хвильовому реакторі	27
Дієго Фернандо Сепеда Гуаман. Особливості управління організаційними проектами у сфері обслуговування літаків	34
Кузьмінська Ю. М. Модель управління креативністю та ризиками команд освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації	42
Поволоцький Я. О., Усенко Р. Р. Оцінювання та вибір програмних засобів сучасних систем управління ІТ проектами	50
Нікольський В. В., Бережний К. Ю. Модель вимірювального зонду комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин.....	56
Тригуб О. А., Солтус А. П., Рудь Д. В. Оцінювання показників станцій технічного обслуговування у м. Черкаси.....	67
Цірук В. Г. Визначення параметрів металевого резонатора вібраційного гіроскопа акустичним методом	74
Броварець О. О. Використання сучасних інформаційно-технічних систем у агропромисловому виробництві.....	80
Плахотний О. П. Моделювання впливу амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів на процеси анодного розчинення при електрохімічній обробці дротяним електродом.....	87
Рудь М. П., Похил О. О., Заболотний С. В., Солтус А. П. Кінцевоелементне моделювання термомеханічної поведінки виробів з полімерних матеріалів при їх виготовленні методом пошарового наплавлення.....	97
Чернов С. К., Савіна О. Ю. Метод ціннісно-орієнтованого протиризикового функціонально-вартісного аналізу портфелів наукомістких проектів підприємств.....	105

CONTENTS

Burmistrov S. V., Panasco O. M., Vakulenko D. V. Matrix method of receiving the full composition of the groups of relativity of Boolean functions	3
Ukhina H. V., Bilenko A. A., Sytnikov V. S. Adjustable components in automated control systems of NPP technological processes	8
Bazilo C. V. The research of the effect of load value and dimensions of piezoelectric disk's electrodes on its amplitude-frequency characteristics	15
Bazilo C. V., Bilokin S. O., Bondarenko M. O., Medianyuk V. V. The study of microelectromechanical piezoelectric structures by the method of atomic force microscopy	21
Demchuk I. M., Stolyarenko G. S. Analysis of parametric stochastic system of the synthesis of hydrazine from secondary raw materials in wave reactor	27
Diego Fernando Cepeda Guaman. Features of management by organizational projects in the field of aircraft maintenance	34
Kuzminska Yu. M. The model of management by creativity and risks of educational project commands in the field of further training	42
Povolotsky Ya. O., Usenko R. R. Evaluation and selection of software tools of modern IT project management systems	50
Nikolskyi V. V., Berezhnyi K. Yu. Model of measuring probe of computer system for determining rheological characteristics of ship's technical liquids.....	56
Tryhub O. A., Soltus A. P., Rud D. V. Assessment of indices of vehicle service stations in Cherkasy city	67
Tsiruk V. H. Determination of parameters of metallic resonator of vibratory gyroscope by acoustic method	74
Brovarets O. O. The use of modern information and technical systems in agricultural production.....	80
Plakhotnyi O. P. Modeling of influence of amplitude-time parameters of electrical pulses on anode dissolution processes in wire electrochemical machining.....	87
Rud M. P., Pokhyl O. O., Zabolotnii S. V., Soltus A. P. Finite element modeling of thermomechanical behavior of polymeric materials products at their manufacture by the method of layer-by-layer building-up	97
Chernov S. K., Savina O. Yu. Method of value-oriented anti-risk function-cost analysis of the portfolios of science-based projects of enterprises	105

S. V. Burmistrov¹, Ph.D.,

e-mail: sergijburmistrov@yandex.ua

O. M. Panasco², Ph.D., associate professor,

e-mail: lena.pa@ukr.net

D. V. Vakulenko¹, 4th year student

e-mail: drsmile444@gmail.com

¹Cherkasy state business-college,

V. Chornovola str., 243, Cherkasy, 18028, Ukraine

²Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MATRIX METHOD OF RECEIVING THE FULL COMPOSITION OF THE GROUPS OF RELATIVITY OF BOOLEAN FUNCTIONS

The article describes a matrix method for obtaining the full composition of the groups of relativity of Boolean functions on the basis of a universal permutation matrix.

This method makes it possible to obtain the full composition of the group of relativity on the basis of one Boolean function of its composition, the name of the group of relativity (the smallest binary number of Boolean function in the group), to construct the minimal form for any of Boolean functions of the group without the process of minimization if at least one function from the group of relativity is already minimized.

The phenomenon of the groups of relativity in symbolic logic is due to the problem of numerology. It is due to the fact that all arguments of Boolean function are absolutely equal, but when constructing a truth table, columns must be put in a certain order. As a result, there are large groups of functions having the same properties, because they have the same internal structure. The advantage of group data is that they completely cover the full range of Boolean functions without overlapping one another. This makes it possible to significantly reduce the number of objects studied within the complete set $L(n)$ of all Boolean functions $f(n)$ by examining only one Boolean function from the whole group.

The full composition of the group of relativity based on the truth table of the function can be formed by performing two equivalence operations – by rearranging columns of arguments in places or by replacing the arguments columns with their inverses, without changing in both cases the values in the column of the result. It is these actions that underlie the implementation of the method. To simplify the implementation of the method, recursive procedures are replaced by cyclic ones.

This method is developed as a working tool for studying the relationships between the groups of relativity in terms of the decomposition of Boolean functions in order to find new effective methods of minimization.

Keywords: Boolean function, groups of relativity, universal matrix of permutations.

Relevance of research. The problem of minimizing Boolean functions (BFs) with a large number of arguments is one of the most laborious stages in the process of synthesizing digital units (CBs) of promising computer systems.

A key step in the development of new methods for minimizing BF is the study and research of patterns of the structure and internal organization of BF, as well as factors facilitating the process of their minimization.

In the research of BF whole groups of Boolean functions – groups of relativity (GR) [1] – are found, combining BF with the same proper-

ties (see Table 1). As a result, BF data inside the group have the same circuitry [2].

The main advantage of GR is the fact that the groups of relativity cover the complete set of BFs. Therefore, the study of only one BF from the GR instead of all BFs allows for a significant acceleration of the study of a complete set of BFs.

Taking into account the importance of the groups of relativity in the systematic study of the complete set of BFs, **the actual problem consists** in the development of an effective method for obtaining the full composition of GR based on one of its BFs.

Table 1

**Number of groups of relativity
of Boolean functions**

№	Number of arguments in BF	Number of BF in $L(n)$	Number of relational groups in $L(n)$
1	2	$2^4=16$	5
2	3	$2^8=56$	24
3	4	$2^{16}=65.536$	402
4	5	$2^{32}=4.294.967.296$	1.228.158
5	6	$2^{64} \approx 1,84467 \cdot 10^{19}$	400.507.806.843.728

Analysis of recent research and publications. Belarusian group of scientists under the guidance of Zakrevsky [3] pays considerable attention to the study of the properties and characteristics of BF structure. The laboratory of logical design, organized by him in 1971, gave a whole galaxy of scientists of this school: Bibilo P. N. [6], Pottosin Yu. V. [7], Cheremisinova L. D. [8], Toropov N. R. [9] and others.

Considerable attention to the research problem is given to this topic at Omsk State University [4]. Researches are conducted also in Ukraine [5]

Formulating the goals of the article. Solving the problem of minimizing BF with a large number of arguments based on unrepeatable Boolean functions enables to construct high-performance computer systems in positional binary numerical systems that perform arithmetic calculations similar to systems of residual classes (SOK), where each digit of the number is calculated separately without taking into account junior grades. For systematic research in this direction, there is a need to develop a simple method for the rapid acquisition of the full composition of BF in a specific GR based on one of its BFs.

The purpose of the article is to describe a developed matrix method for obtaining a complete membership of relational groups of Boolean functions.

Presenting main material. Boolean functions are a subset of logical functions that can be described using a truth table (TI BF) (Table 2).

The result column y specifies the binary number of a specific BF:

$$y = y_{n-1}y_{n-2} \dots y_3y_2y_1y_0,$$

where y_i is either 0 or 1.

Table 2

Table of truth of Boolean function

Line number	Columns of arguments						y
	x_n	x_{n-1}	x_{n-2}	...	x_2	x_1	
0	0	0	0	...	0	0	y_0
1	0	0	0	...	0	1	y_1
2	0	0	0	...	1	0	y_2
3	0	0	0	...	1	1	y_3
...	...	...	...	...	...	...	...
$n-2$	1	1	1	...	0	1	y_{n-2}
$n-1$	1	1	1	...	1	0	y_{n-1}

Obviously, one BF corresponds to a specific binary number. Binary numbers allow to see all BF states, to sort and group them by properties.

In [1] it is shown that the full GR composition on the basis of TI BF can be formed by performing two equivalence operations – by rearranging columns of arguments or by replacing the columns of arguments with their inverses, without changing in both cases the values in the result of column TI BF.

The subset of the permutation of arguments contains in the general case $n!$ variants of Boolean functions, and the subset of the substitution of arguments by their inversions – 2^n variants of BF. Therefore, the maximum amount of BF within one GR may be, if not taking into account the mutual overlapping of BF:

$$N \leq n! \cdot 2^n. \quad (1)$$

As it follows from the formula, the number of permutations, depending on the number of arguments, grows in an avalanche way (Table 3).

The matrix method for obtaining the full membership of the groups of the relativity of Boolean functions is based on the use of a universal permutation matrix. The versatile matrix of permutations is a table whose rows are all variants of permutations obtained as a result of permutations of columns and inversion of arguments in TI BF. Elements of the matrix are the index numbers of the binary number BF.

The method of obtaining the full membership of GR consists of two stages:

1. *Preparatory stage – the stage of obtaining a universal matrix of permutations.* The universal matrix is unique to BFs that contain a specific number of arguments. Therefore, it is built once and used in the future for the full GR.

Table 3
The size of the permutations matrix
for BF containing n arguments

№	Number of arguments	Matrix size	
		Number of characters per line	Number of rows
1	2	4	8
2	3	8	48
3	4	16	384
4	5	32	3 840
5	6	64	46 080
6	7	128	645 120
7	8	256	10 321 920
8	9	512	185 794 560
9	10	1024	3 715 891 200
10	11	2048	81 749 606 400
11	12	4096	1 961 990 553 600
12	3	8192	51 011 754 393

At the preparatory stage, one must first build a complete list of permutations of columns of arguments in places and inversions of columns of arguments in TI BF. Then, for each combination of arguments, the corresponding binary index number BF should be constructed.

The algorithm for obtaining a universal matrix of permutations has the form (Fig. 1).

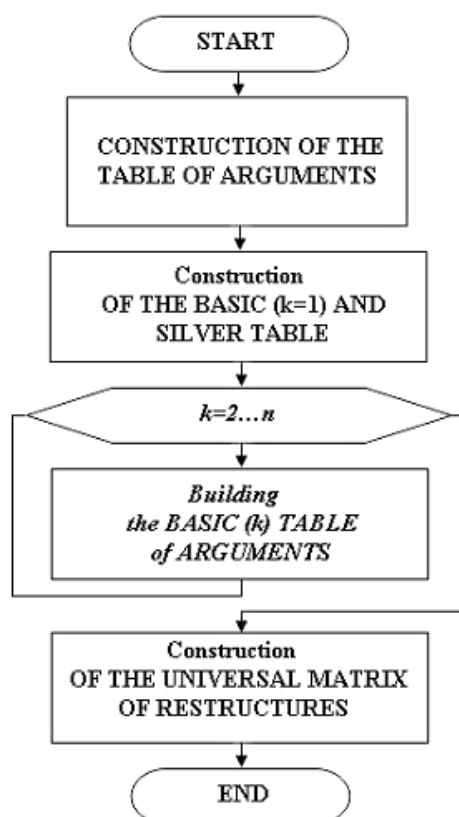


Fig. 1. Algorithm for obtaining a universal matrix of permutations

A universal matrix of permutations, the lines of which are indexes of the binary number BF, is the result of the preparatory stage. For BFs containing two arguments, it has the form (Table 4).

Table 4
Universal matrix for permutations
for BF containing two arguments

Combination options	Index in binary number BF				
1	3	2	1	0	
2	3	1	2	0	
3	2	3	0	1	
4	1	3	0	2	
5	1	0	3	2	
6	2	0	3	1	
7	0	1	2	3	
8	0	2	1	3	

2. The main stage – Stage of getting the full membership of GR.

To obtain the full membership of GR in the zero line of the universal permutation matrix, one must place the binary number of BF from the desired GR (Table 5) and, by index, construct all the BFs from the given GR.

Table 5
Application of a universal matrix
of permutations for building a complete GR

№	BF Binary Number				Result
	0	1	0	1	
	Index in BF binary number BF				
1	3	2	1	0	0101
2	3	1	2	0	0011
3	2	3	0	1	1010
4	1	3	0	2	1100
5	1	0	3	2	0101
6	2	0	3	1	0011
7	0	1	2	3	1010
8	0	2	1	3	1100

As a result, for the given BF **0101** the GR has been received with four BFs: **0011**, **0101**, **1010**, **1100**. The GR has the smallest number of BFs – **0011**.

Conclusions:

1. The phenomenon of the groups of relativity in symbolic logic is due to the problem of numerology. It is due to the fact that all arguments in BF are absolutely equal, but when constructing TI BF, they need to be put in a certain order.
2. A matrix method for obtaining a full composition of the groups of relativity of Boolean functions is developed in the article on the basis of a universal permutation matrix.
3. This method makes it possible to obtain the name of GR (the smallest binary number BF in GR), the complete GR composition based on one BF of its composition, to construct a minimal form for any of BFs from the GR without the minimization process, if at least one BF is already minimized from GR.
4. This method is a working tool for investigating the interrelationships between GRs in terms of BF decomposition. This makes it possible to significantly reduce the number of objects studied within the complete set $L(n)$ of all BFs $f(n)$ by examining only one BF from the entire group.

References

1. Bibilo, P. N. (2009) Decomposition of Boolean functions based on solving logical equations. Minsk: Belarussian Nuclei. 211 p. ISBN 978-985-08-1072-4
2. Kochkarev, Yu. A., Panteleev, N. N., Kazarinova, N. L. (1999) Classical and alternative minimal forms of logical functions: Catalog – reference book: monograph. G. E. Pukhov Institute for Modeling Problems in the Energy, Cherkasy Institute of Management. Cherkasy. 195 p.
3. Bibilo, P. N., Pottosin, Yu. V., Cheremisinova, L. D. (2017) On the scientific heritage of Corresponding Member A. D. Zakrevsky. *Informatics. Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus*. No. 1 (53). January-March. P. 112–124.
4. Filippov, V. M., Manokhina, T. V., Evdokimov, A. A., Sajats, D. S. (2016) Minimization of functions of the algebra of logic by the method of a non-directed graph. *International Journal of Applied and Fundamental Research. Technical sciences*. No. 8. P. 509–511.
5. Alekseychuk, A. N., Konyushok, S. N. (2014) The algebraically degenerate approximation of Boolean functions. *Cybernetics and system analysis*. No. 6. P. 112–124.
6. Bibilo, P. N. (2014) Application of binary selection diagrams in the synthesis of logic circuits. Minsk: Belarussian Nuclear. 231 p.
7. Pottosin, Yu. V. (2015) Energy-saving anti-convoy coding of states of asynchronous automaton. *PDM Annex*. No. 8. P. 120–123.
8. Cheremisinova, L. D., Novikov, D. Ya. (2008) Verification of the scheme realization of partial Boolean functions. *Bulletin of Tomsk State University. Management, Computing and Informatics*. No. 4 (5). P. 102–111.
9. Zakrevsky, A. D., Toropov, N. R. (2009) Minimization of Boolean functions of many variables in the DNF class-iterative method and program realization. *PDM. Annex*. No. 1 (3). P. 5–14.

С. В. Бурмістров¹, к.т.н.,

e-mail: sergijburmistrov@yandex.ua

О. М. Панаско², к.т.н., доцент,

e-mail: lena.pa@ukr.net

Д. В. Вакуленко¹, студент 4-го курсу

e-mail: drsmile444@gmail.com

¹Черкаський державний бізнес-коледж,

вул. В. Чорновола, 243, м. Черкаси, 18028, Україна

²Черкаський державний технологічний університет

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

МАТРИЧНИЙ МЕТОД ОТРИМАННЯ ПОВНОГО СКЛАДУ ГРУП РЕЛЯТИВНОСТІ БУЛЕВИХ ФУНКЦІЙ

У статті описано матричний метод отримання повного складу груп релятивності булевих функцій на основі універсальної матриці перестановок. Цей метод дає можливість отримати повний склад групи релятивності на основі однієї булевої функції із її складу, назву групи

релятивності (найменший бінарний номер булевої функції в групі), побудувати мінімальну форму для будь-якої булевої функції зі складу групи без виконання процесу мінімізації, якщо вже мінімізована хоча б одна функція зі складу групи релятивності.

Це дає можливість суттєво зменшити кількість досліджуваних об'єктів у межах повної множини $L(n)$ всіх булевих функцій $f(n)$, досліджуючи лише одну булеву функцію з усієї групи. Для спрощення реалізації методу рекурсивні процедури замінено на циклічні.

Цей метод розроблено як робочий інструмент для дослідження взаємозв'язків між групами релятивності з точки зору декомпозиції булевих функцій для пошуку нових ефективних методів мінімізації.

Ключові слова: булева функція, групи релятивності, універсальна матриця перестановок.

H. V. Ukhina,

e-mail: anyuta.uhina@gmail.com

A. A. Bilenko, PhD, associate professor,

e-mail: anatoliy.bilenko@gmail.com

V. S. Sytnikov, Dr.Sc., professor

e-mail: sitnvs@gmail.com

Odesa National Polytechnic University
Shevchenko ave., 1, Odesa, 65044, Ukraine

ADJUSTABLE COMPONENTS IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF NPP TECHNOLOGICAL PROCESSES

Transfer function coefficients' effect on the properties of amplitude-frequency characteristic, which should be taken into account at adjustable components designing, is considered. On the example of typical digital filters of the first order of low and high frequencies, the dependencies of the transfer function's numerator and denominator coefficients on the cutoff frequency, as well as the denominator coefficient's dependence on the ripple index are found.

Key words: low-level TP ACS, primary signal processing, characteristics correction, characteristics adjustment, separate and complex restructuring, transfer function coefficients, implementation of restructuring.

According to the regulatory requirements actually in force in Ukraine, each power unit of the nuclear power plant (NPP) does obligatorily include the monitoring and controlling system of technological process. At that, modern methods of managing and synthesizing multi-level hierarchical systems using high-performance multiprocessor complexes should be used. In Ukraine the Scientific-productional enterprise "Radiy" is the main producer of such complexes [1, 2].

The soft- and hardware complex for the automated control system (TP ACS) of technological processes, as a variant of NPP's specialized computer system, provides at the lower level the collection and initial processing of data from metering instruments and their sensors, that serve to generate safety control signals and to inform maintenance personnel about the state of whole systems, their elements and technological process. Quite often, when designing the TP ACS elements, the problem of correcting and rearranging these system's frequency-dependent components parameters arises. Such systems represent a combination of hard- and software arranged into a complex architecture embodying various interlinking. Such a specialized computer (microprocessor) system performs a large number of tasks, one of which refers to system characteristics control and correction, depending on the operation conditions and changes occurring in the envi-

ronment, the implemented technological process and the system itself.

When designing such components, it is required to solve the problem of analyzing the influence rendered by the data collection-and- processing path components' transfer function coefficients onto the amplitude-frequency response (AFR) characteristics. It should be noted that the frequency response characteristics control is possible both separately and in whole complex [3, 4]. A similar problem is typical for adaptive and adjustable devices, including filters, characterized with the same mathematical description [5].

This study objective is to analyze the effect of component's transfer function coefficients onto the frequency response properties, in order to simplify the design and control of soft- and hardware complexes used at the nuclear power plants' automated process control systems.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

- analyzing the influence of first-order component's transfer function coefficients onto the frequency response properties;
- elaborating and suggesting the ways to simplify the design of first-order component and its control.

The scientific novelty of this research consists in simplification of the first order frequency-dependent component's control, at the expense of separate or complex changes in the transfer function coefficients.

Here we shall consider the commonly used serial digital filters as a component of pre-processing and filtering path. It is well known that to simplify their adjustment and control the high-order components are built on the basis of the first and second order components. Therefore, the analysis of digital filter transfer function coefficients' effect on the filter's characteristics properties has been carried out based on the first-order transfer function of such form:

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 + b z^{-1}}, \quad (1)$$

where a_0, a_1, b – real coefficients of the numerator and denominator.

In this case, the low-pass filter (LPF) corresponds to the transfer function (1) and the numerator coefficient is $a_1 > 0$, and the high-pass filter (HPF) shall have $a_1 < 0$. It should be noted that normalized digital filters' numerator coefficients of the first order are equal, i.e.

$$a_0 = |a_1|, a_0 > 0. \quad (2)$$

Then we can write the transfer function (1) as follows

$$H(z) = a_0 \frac{1 \pm z^{-1}}{1 + b z^{-1}}, \quad (3)$$

where "+" in the numerator corresponds to LPF and "-" respectively to HPF

When substituting $z^{-1} = e^{-j\omega}$ or, according to Euler's formula, $z^{-1} = \cos \omega - j \sin \omega$, where ω – rated angular frequency, $\omega = 2\pi \frac{f}{f_d}$, $\omega \in [0, \pi]$, f, f_d – are respectively the linear frequency and discretisation frequency, then we shall get a complex transfer coefficient, used in basis to obtain both LPF and HPF amplitude-frequency responses.

Low-pass filter

The frequency-dependent LPF transfer coefficient is generally described by the expression [6, 7]

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{(a_0 + a_1)^2 - 2a_0 a_1 (1 - \cos \omega)}{(1 + b)^2 - 2b(1 - \cos \omega)}}$$

or taking into account (2) and (3)

$$H(\omega) = \frac{2a_0 \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)}{\sqrt{(1+b)^2 - 4b \sin^2\left(\frac{\omega}{2}\right)}}. \quad (4)$$

At zero frequency $\omega = 0$, the transfer coefficient $H(0)$ will be determined by the relation

$$H(0) = a_0 \frac{2}{1+b}. \quad (5)$$

Considering the fact that in the case of zero frequency of the first order normalized filter, the transfer coefficient is equal to one $H(0) = 1$ [4], then the numerator coefficient a_0 from (5), under the condition of filter stability $|b| < 1$ [4], is equal to

$$a_0 = \frac{1+b}{2}, \quad (6)$$

and the normalized LPF frequency response will have the form

$$H(\omega) = \frac{(1+b) \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)}{\sqrt{(1+b)^2 - 4b \sin^2\left(\frac{\omega}{2}\right)}}.$$

The cutoff frequency ω_c at the level c , $0 < c < 1$, is found from equation (4), $H(\omega_c) = c$, then

$$\omega_c = \arccos \left(- \frac{1 - 2c^2 \frac{1+b^2}{(1+b)^2}}{1 + 4c^2 \frac{b}{(1+b)^2}} \right).$$

In this case, the cutoff frequency ω_c level c is set for the Butterworth filter at 0.707 value level, and for Chebyshev filter and for elliptic filter its value is set accordingly to pulsation index within the passband ξ

$$c = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}, \quad (7)$$

and for Chebyshev inverse filter it shall be set with the pulsations index ξ in the attenuation band

$$c = \frac{\xi}{\sqrt{1 + \xi^2}}. \quad (8)$$

It is essential to note that most mathematical packages processing these data, set the ripple level in decibels when RP is the pulsation in the passband, RS is the pulsation in the attenuation band. However, in either case

$$c = \frac{1}{\sqrt{10^{0,1RP}}} \text{ or } c = \frac{1}{\sqrt{10^{0,1RS}}}$$

$$b = - \left\{ 1 - \frac{2c^2 \sin^2\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right)}{c^2 - \cos^2\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right)} \left(1 - \frac{\cos\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right)} \sqrt{\frac{1-c^2}{c^2}} \right) \right\}. \quad (9)$$

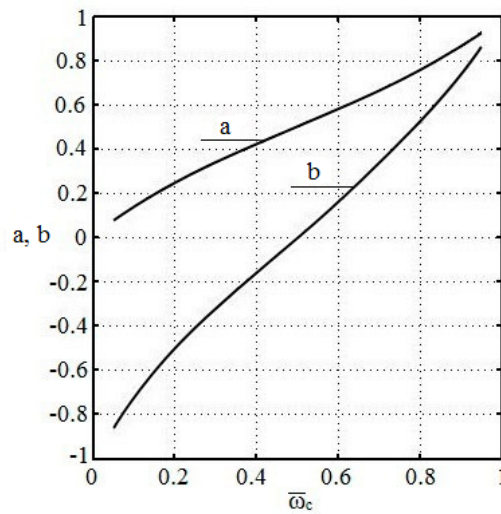


Fig. 1. Graphs of the dependence between the Butterworth LPF transfer function's numerator a_0 and denominator b and the filter's cutoff frequency $\bar{\omega}_c$

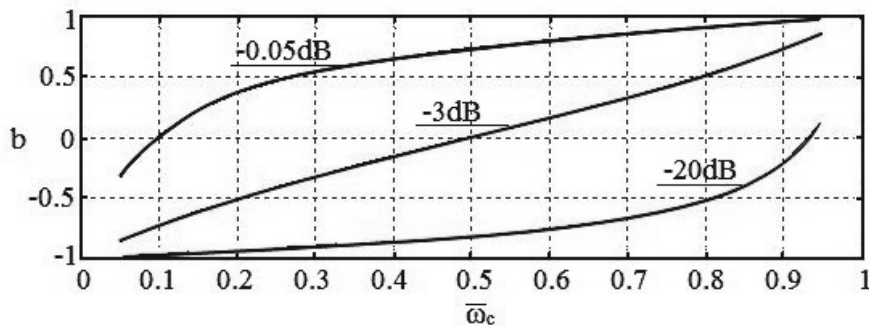


Fig. 2. Dependence of the inverse Chebyshev LPF transfer function denominator b coefficient on the filter cutoff frequency $\bar{\omega}_c$ at the pulsation index in the attenuation band $RS = -0,05 \text{ dB}$; $RS = -3 \text{ dB}$; $RS = -20 \text{ dB}$

However, such a representation of the dependence between the denominator b coefficient and the cutoff frequency $\bar{\omega}_c$ for level c is not satisfactorily good for practical realization. Let us introduce some dummy value ξ so that

$$c = \cos\left(\frac{\xi}{2}\right). \quad (10)$$

In other words, such a dummy value is $\xi = 2 \arccos(c)$.

Then, after substituting (10) into (9), we obtain a simpler expression for introducing to the

$$\text{system } b = \frac{\sin\left(\frac{\bar{\omega}_c - \xi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\bar{\omega}_c + \xi}{2}\right)}. \quad (11)$$

High-pass filter

For normalized HPF, whose transfer function is determined by the expression (3), the frequency-dependent transfer coefficient, with respect to (2), shall obtain such generalized representation:

$$H(\bar{\omega}) = \frac{2a_0 \sin\left(\frac{\bar{\omega}}{2}\right)}{\sqrt{(1+b)^2 - 4b \sin^2\left(\frac{\bar{\omega}}{2}\right)}}. \quad (12)$$

The transfer coefficient when $\bar{\omega} = \pi$ frequency is determined by the relation

$$H(\pi) = a_0 \frac{2}{1-b}. \quad (13)$$

Then, considering the normalized frequency response, the coefficient of numerator a_0 (13) shall be equal to

$$a_0 = \frac{1-b}{2}, |b| < 1, \quad (14)$$

and the normalized HPF frequency response will take the form

$$H(\bar{\omega}) = \frac{(1-b) \sin\left(\frac{\bar{\omega}}{2}\right)}{\sqrt{(1+b)^2 - 4b \sin^2\left(\frac{\bar{\omega}}{2}\right)}}.$$

At level c the cutoff frequency $\bar{\omega}_c$ in (12) is equal to

$$\bar{\omega}_c = \arccos \left(- \frac{1 - 2c^2 \frac{1+b^2}{(1-b)^2}}{1 + 4c^2 \frac{b}{(1+b)^2}} \right).$$

In this case, the c level when cut-off frequency $\bar{\omega}_c$ is set for the HPF in the same way as the LPF's one in accordance with formulas (7) and (8).

Depending on the cut-off frequency $\bar{\omega}_c$ and the level c , we have found a relation that determines the coefficient of HPF transfer function (3) denominator b

$$b = 1 - \frac{2c^2 \cos^2\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right)}{c^2 - \sin^2\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right)} \left(1 - \frac{\sin\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\bar{\omega}_c}{2}\right)} \sqrt{\frac{1-c^2}{c^2}} \right). \quad (15)$$

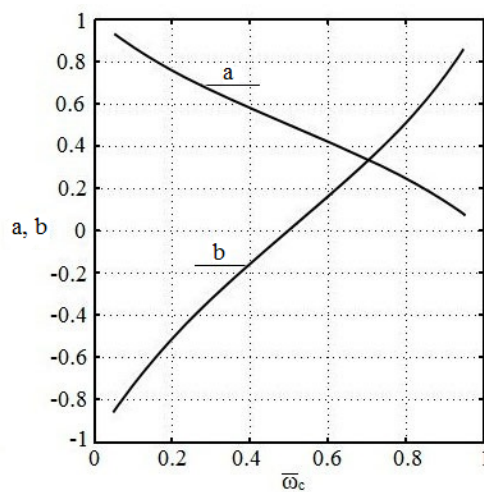


Fig. 3. Graphs of the Butterworth HPF transfer function numerator a_0 and denominator b coefficients depending on the filter cutoff frequency $\bar{\omega}_c$

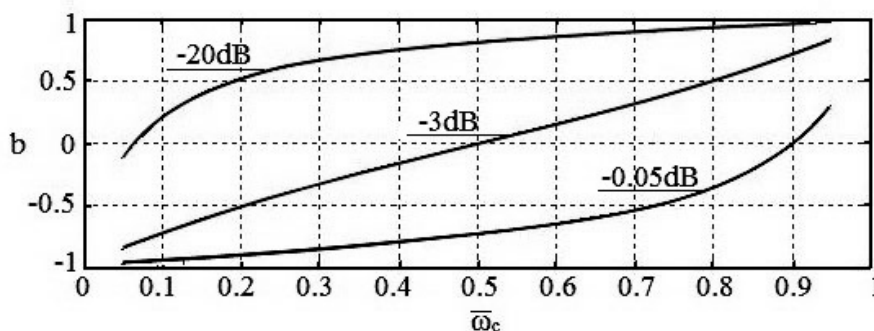


Fig. 4. Graphs of the inverse Chebyshev filter denominator coefficient b dependence on the filter cutoff frequency $\bar{\omega}_c$ when attenuation band pulsation index $RS = -0,05 \text{ dB}$; $RS = -3 \text{ dB}$; $RS = -20 \text{ dB}$

Applying relation (13), we get the expression for coefficient b (15) in the following form:

$$b = \frac{\cos\left(\frac{\bar{\omega}_c + \xi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\bar{\omega}_c - \xi}{2}\right)}. \quad (16)$$

In designing two variances of control implementation can be considered: both individual and complex option [8].

In case of individual control, the adjustment is carried out separately using the gain coefficient k and separately using the cutoff frequency $\bar{\omega}_c$, i.e. for each value of k and $\bar{\omega}_c$ it is necessary to recalculate the values a_0 and b in accordance with formulas (6, 9, 11) or (14-16). In most cases $k = \text{var}$.

When complex control integrating, i.e. when both coefficient k and frequency $\bar{\omega}_c$ are simultaneously adjusted, the coefficient k can take values $k = \text{var}$ as well as $k = \text{const}$. Since the ratio between the transfer function coefficients a_0 and b is rather complicated, these options should be considered separately.

In the case, where an option with variable coefficient $k = \text{var}$ is considered, the sequence shall be as follows:

- setting a new k_i coefficient value and $\bar{\omega}_{ci}$ cutoff frequency value;
- in accordance with formulas (9, 11) or (15-16), the coefficient b is given as b_i ;
- the numerator coefficient a_0 is recalculated from the condition (6) or (14) for new values of k_i and b_i . In this case, the coefficient a_0

is a function of the gain coefficient k_i and coefficient b_i , i.e. $a_0 = F(k_i, b_i)$.

In the case of a constant gain coefficient $k = \text{const}$, the procedure is the same as the above described sequence. However, for the value $k = \text{const}$, the coefficient a_0 is a function of only the coefficient b_i , i.e. $a_0 = F(b_i)$. Here, this dependence can be calculated preliminarily and stored in memory so as not to waste time on its new calculation [9, 10].

The design of frequency-dependent components of digital first-order filters with these components description represented using transfer functions characteristic for the first-order filters is considered. The considered digital filters frequency response analysis shows that when designing frequency-dependent components with respect to the specified cut-off frequency $\bar{\omega}_c$ and level c , we can surely find the values of the numerator a_0 and denominator b coefficients, and as to the normalized filters, we can find the necessary denominator b coefficient.

The carried out research confirmed the possibility of both by-components individual and complex integral frequency response control.

For changing the filter gain, it is sufficient to change the numerator a_0 coefficient without changing the denominator b coefficient. Here the linear individual control of gain coefficient is possible by changing the numerator a_0 coefficient, that is typical for adaptive filters.

When the denominator b coefficient is changed at non-standardized filters, both the gain and cutoff frequencies shall be rearranged that is specific for the complex control. However, to change the cutoff frequency at a constant ampli-

tude, it is necessary to correct the gain coefficient value using the coefficient of transfer function numerator a_0 respectively to the new denominator b coefficient value, in accordance, for example, with (6) and (14).

It follows from Figures 1–4 that there are linear sections on the graphs, where the cutoff frequency linear control is possible due to their approximation.

From the first-order LPF and HPF frequency response analysis, the following shall be noted as the conclusion:

- the numerator a_0 coefficient has no effect on the frequency response shape, but only determines the frequency response amplification level;

- the denominator b coefficients vary for different types of filters, except for the case of non-polynomial filters;

- within the same filter type, the LPF and HPF denominator b coefficients are different;

- non-polynomial filters have the same set of denominator b coefficients, and hence the same frequency response and phase response. The first-order filters characteristics are never influenced by the attenuation band ripple index. Therefore, the characteristics of both Chebyshev filter and elliptical filter having the same values of the passband ripple index and the cutoff frequency, shall be the same. In addition, at the same ripple index value in the attenuation band and the same cut-off frequency, Chebyshev inverse filter characteristics also coincide with the non-polynomial filters characteristics;

- with the denominator coefficient $b = 0$, the LPF becomes an averager in accordance with the algorithm of moving average for two points

$$H(z) = \frac{1}{2}(1 + z^{-1}),$$

and HPF becomes a differentiator up to the gain coefficient accuracy in accordance with the algorithm of difference by two points [11]

$$H(z) = \frac{1}{2}(1 - z^{-1}).$$

The carried out analysis allows an essentially simplified solution to the problem of designing and controlling the specialized computer systems frequency-dependent components with the possibility to correct and rearrange the characteristics of both an individual component and the system as a whole.

References

1. Disadvantages of existing automatic process control system at nuclear power plants and prospects of their development, available at: <http://tesiaes.ru/?p=13030>
2. Eliseev, V. V. (2013) Information and control systems HDM production NPP "Pulse". Status, prospects. *Nuclear & radiation safety*, No. 4 (60), pp. 61–64.
3. Guide to the calculation and design of ARC-schemes (1984), 368 p. [in Russian].
4. Sergienko, A. B. (2006) Digital signal processing. SPb: Piter, 751 p. [in Russian].
5. Tepin, V. P., Tepin, A. V. (2011) Programmable digital filters: synthesizing laws of transfer function control. *YuFU Bulletin. Engineering sciences*, No 1, pp. 50–57.
6. Koshita, S., Kumamoto, Y., Abe, M., Kawamata, M. (2013) Adaptive IIR band-pass/band-stop filtering using high-order transfer function and frequency transformation. *Interdisciplinary International Sciences*, vol. 9, pp. 163–172.
7. Koshita, S., Abe, M., Kawamata, M. (2017) Variable state-space digital filters using series approximations. *Digital Signal Processing*, vol. 60, pp. 338–349.
8. Ukhina, H. V., Bilenko, A. A., Sytnikov, V. S. (2016) Improving the efficiency software and hardware complexes in NPP APCS. *Nuclear and Radiation Safety*, No. 3 (71), pp. 70–76 [in Russian].
9. Stoyanov, G., Uzunov, I., Kawamata, M. (2000) Design of variable IIR digital filters using equal subfilters. *Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, vol. 1, November, pp. 141–146.
10. Stoyanov, G., Kawamata, M., Uzunov, I. (2001) Design and realization of variable IIR digital filters as a cascade of identical subfilters. *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E84-A, No. 8, August, pp. 34–47.
11. Ukhina, H. V., Saftuk, M. P., Sytnikov, V. S. (2014) Development algorithmization of computer systems dynamic components for CAD. *Computer systems and technologies in production management and economics: All-Ukrainian sci. and pract. conf. of the Chernivtsi Faculty*, pp. 120–122 [in Russian].

А. В. Ухина,

e-mail: anyuta.uhina@gmail.com

А. А. Биленко, к.т.н., доцент,

e-mail: anatoliy.bilenko@gmail.com

В. С. Ситніков, д.т.н., профессор

e-mail: sitnvs@gmail.com

Одесский национальный политехнический университет

пр. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ КОМПОНЕНТЫ В АСУ ТП АЭС

Рассмотрено влияние коэффициентов передаточной функции компоненты на свойства амплитудно-частотной характеристики, которые следует учитывать при проектировании перестраиваемых компонент. На примере типовых цифровых фильтров первого порядка нижних и верхних частот найдены зависимости коэффициентов числителя и знаменателя передаточной функции от частоты среза, а также зависимости коэффициента знаменателя от частоты среза в зависимости от показателя пульсаций.

Ключевые слова: АСУ ТП нижнего уровня, первичная обработка сигналов, коррекция характеристик, перестройка характеристик, раздельная и комплексная перестройка, коэффициенты передаточной функции, реализация перестройки.

К. В. Базіло, к.т.н., доцент

Черкаський державний технологічний університет

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАВАНТАЖЕННЯ ТА РОЗМІРІВ ЕЛЕКТРОДІВ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДИСКА НА ЙОГО АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

П'єзокераміка завдяки своїм унікальним властивостям має застосування в різних галузях техніки і технології. П'єзоелектричні диски з частковим електродуванням однієї або двох поверхонь досить часто використовуються для створення різних функціональних пристроїв п'єзоелектроніки. Дискові п'єзоелектричні пристрої широко застосовуються в елементах інформаційних систем.

Основною метою статті є дослідження амплітудно-частотних характеристик дискових п'єзокерамічних елементів залежно від геометричних розмірів електродів та впливу навантаження.

Ключові слова: п'єзоелектричний дисковий елемент, фізичні процеси, амплітудно-частотні характеристики.

Вступ. П'єзокераміка завдяки своїм унікальним властивостям має застосування в різних галузях техніки і технології. Виробники п'єзокераміки, елементів і компонентів на її базі, намагаючись повніше задовольнити сучасні вимоги ринку, проводять дослідження і конструкторські роботи з метою поліпшення параметрів кераміки, розробляють її нові типи, на що виділяються значні фінансові кошти. З метою здешевлення продукції розробляються нові технології, що є більш енергозберігаючими і дають можливість автоматизувати процеси виробництва [1, 2].

П'єзоелектричні диски з частковим електродуванням однієї або двох поверхонь досить часто використовуються для створення різних функціональних пристроїв п'єзоелектроніки [3]. Дискові п'єзоелектричні пристрої широко застосовуються в елементах інформаційних систем [4–8].

Основною **метою** статті є дослідження амплітудно-частотних характеристик дискових п'єзокерамічних елементів залежно від геометричних розмірів електродів та впливу навантаження.

1. Дослідження п'єзоелектричного диска залежно від геометричних розмірів електродів та впливу навантаження

Найпростіший дисковий п'єзоелектричний трансформатор (рис. 1) містить у своєму складі первинне електричне коло, яке

складається з генератора різниці електричних потенціалів $U_1 e^{i\omega t}$ ($i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; ω – кругова частота; t – час) з внутрішнім електричним імпедансом Z_1 і дискового електрода (позиція 1 на рис. 1), і вторинне електричне коло, що складається з кільцевого електрода (позиція 2) з підключеною до нього електронною схемою з вхідним електричним імпедансом Z_n , на якому формується різниця електричних потенціалів $U_2 e^{i\omega t}$. Первинне і вторинне електричні кола п'єзоелектричного трансформатора не мають гальванічного зв'язку. Енергообмін між ними здійснюється за допомогою пружних коливань поляризованого по товщині п'єзокерамічного диска (позиція 3 на рис. 1). Очевидно, що робота функціонального елемента п'єзоелектроніки, який схематично показаний на рис. 1, повністю описується коефіцієнтом трансформації $K(\omega, \Pi) = U_2 / U_1$ (символом Π позначений набір електричних, геометричних і фізико-механічних параметрів трансформатора), який, по суті, є математичною моделлю цього пристрою.

Згідно з показаним на рис. 1 розташуванням електродів, в об'ємі п'єзокерамічного диска можна виділити три області, а саме: область 1 ($0 \leq \rho \leq R_1$), область 2 ($R_1 \leq \rho \leq R_2$) і область 3 ($R_2 \leq \rho \leq R$).

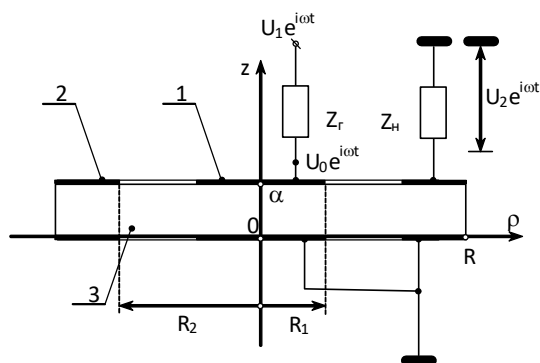


Рис. 1. Розрахункова схема найпростішого дискового п'єзoeлектричного трансформатора

В роботі [9] представлена математична модель дискового п'єзoeлектричного трансформатора, яка враховує зворотні зв'язки, що існують в об'ємі коливального диска, що може бути записана наступним чином:

$$K(\omega, \Pi) = \frac{K_2(\Omega, \Pi)}{1 - i\omega C_1^\sigma Z_r F_1^{\text{oc}}(\Omega, \Pi)},$$

$$\Psi_1(\Omega, R_2) = \frac{2}{\Omega(1 - r_2^2)} \{ A_{41} [J_1(\Omega) - r_2 J_1(\Omega r_2)] - A_{51} [N_1(\Omega) - r_2 N_1(\Omega r_2)] \}; \quad r_2 = R_2/R;$$

$$\Psi_2(\Omega, R_2) = \frac{2}{\Omega(1 - r_2^2)} \{ A_{42} [J_1(\Omega) - r_2 J_1(\Omega r_2)] - A_{52} [N_1(\Omega) - r_2 N_1(\Omega r_2)] \}.$$

$J_1(\Omega)$ і $N_1(\Omega)$ – функції Бесселя і Неймана першого порядку; Ω – безрозмірне хвильове число; коефіцієнти A_i , визначені в роботі [9].

Схему для проведення експериментальних досліджень дискового п'єзoeлектричного трансформатора типу диск-кільце зображено на рис. 2.

Для виконання експериментальних досліджень використовувалися масивні диски. При цьому мінімізуються ефекти, пов'язані з приєднаною масою, яка виникає в процесі пайки провідників до електродованих поверхонь диска.

$$\text{де} \quad K_2(\Omega, \Pi) = \frac{i\omega C_3^\sigma Z_H K_p^2 \Psi_1(\Omega, R_2)}{1 - i\omega C_3^\sigma Z_H [1 - K_p^2 \Psi_2(\Omega, R_2)]};$$

$C_3^\sigma = \pi(R^2 - R_2^2)\chi_{33}^\sigma/\alpha$ – статична електрична ємність електродованої області 3; $C_1^\sigma = \pi R_1^2 \chi_{33}^\sigma/\alpha$ – статична електрична ємність першої області; χ_{33}^σ – діелектрична проникність в напрямку осі Oz , виміряна в режимі сталості (рівності нулю) механічної напруги (верхній символ σ);

$$F_1^{\text{oc}}(\Omega, \Pi) = \frac{2K_p^2}{\Omega r_1} [A_{11} - K_2(\Omega, \Pi) A_{12}] J_1(\Omega r_1) - 1$$

– частотно залежна функція, яка враховує негативний зворотний зв'язок (символ oc) в об'ємі п'єзoeлектричного диска; $r_1 = R_1/R$ – безрозмірний радіус електрода первинного електричного кола трансформатора; K_p^2 – квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку для режиму радіальних коливань тонкого п'єзoeлектричного диска.

При вимірюванні диск підвішувався в повітрі на тонких нитках для того, щоб уникнути механічного контакту з іншими об'єктами.

На схемі (рис. 2) аббревіатурою ГГС позначений генератор гармонійних сигналів ГЗ-19, ЕЧ – електронний частотомір ЧЗ-57, ЕВ1 і ЕВ2 – електронні вольтметри ВЗ-41.

Для експериментальних досліджень був використаний дисковий п'єзoeлектричний елемент $\varnothing 50 \times 1,2$ мм ($\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 25 \cdot 10^{-3}$ м; $R_1 = 12 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 14,5 \cdot 10^{-3}$ м) з матеріалу типу ЦТБС. Вхідна напруга $U_1 = 1$ В.

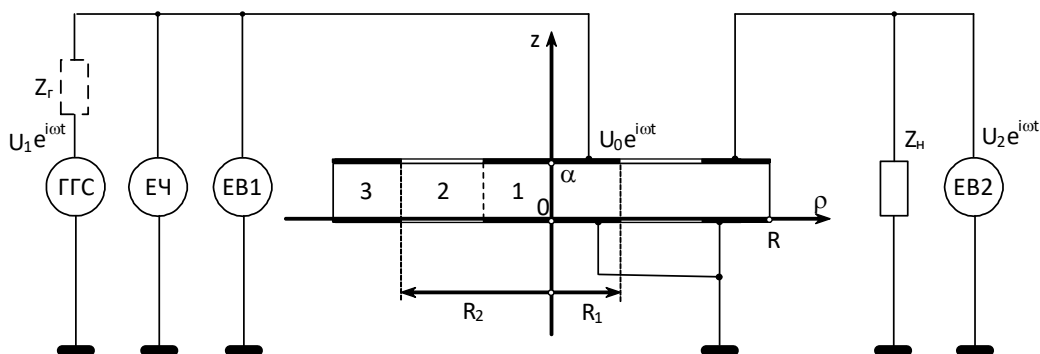


Рис. 2. Електрична схема для вимірювання п'єзoeлектричного диска

Результати вимірювання амплітудно-частотної характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора типу диск-

кільце залежно від величини навантаження представлено на рис. 3.

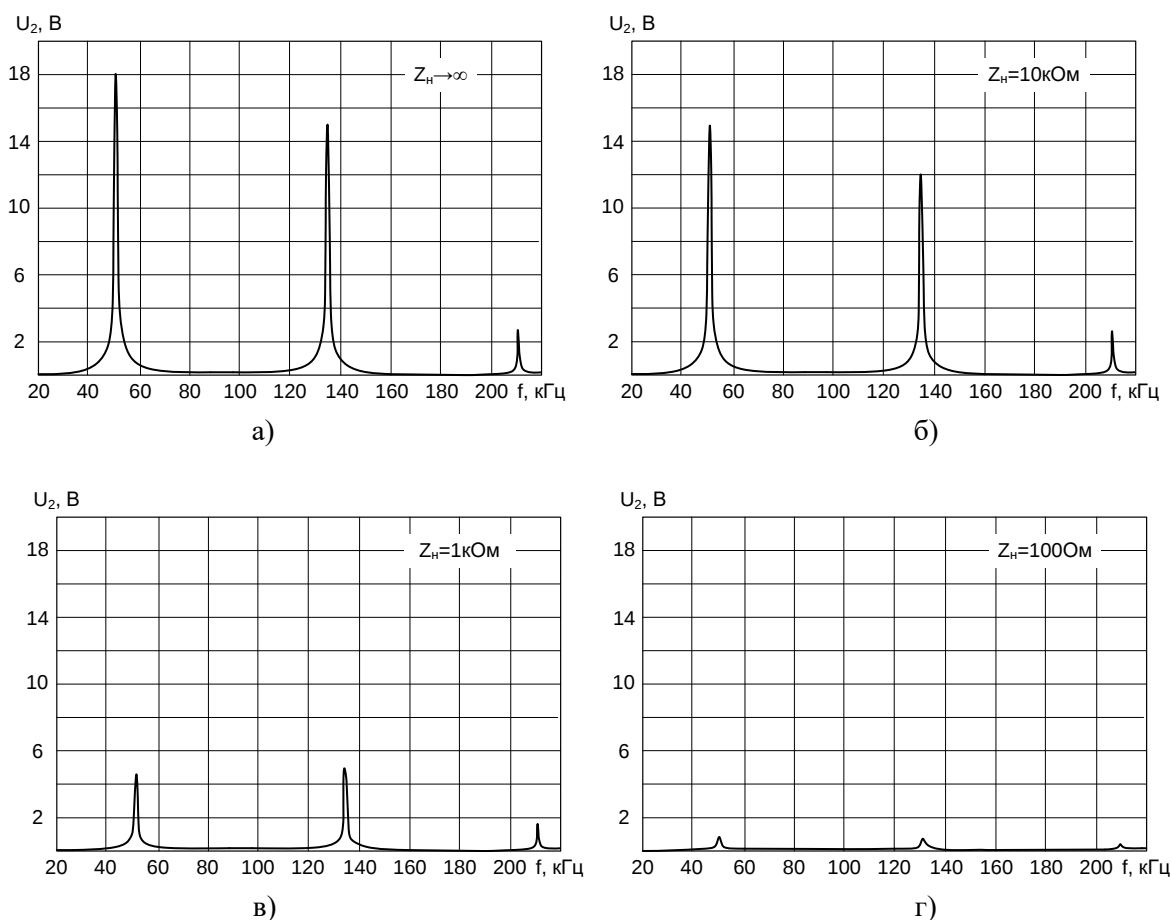


Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора залежно від величини навантаження

Як видно з рис. 3, при малому значенні Z_n трансформатор працює в режимі, близькому до короткого замикання у вторинному колі. Коефіцієнт трансформації при цьому прямує до нуля. При збільшенні навантаження Z_n зменшується його вплив на коефіцієнт трансформації (збільшується коефіцієнт трансформації).

На рис. 4 зображено амплітудно-частотні характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора $\varnothing 66 \times 3$ мм ($\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м) з матеріалу типу ЦТС залежно від розмірів електродів. Вхідна напруга $U_1 = 1$ В.

Як видно з рис. 4, коефіцієнт трансформації найбільший при розділенні електродованої поверхні диска на приблизно рівні за площею диск і кільце.

На рис. 5 зображено схему експериментальних досліджень дискового п'єзокерамічного трансформатора типу кільце-диск ($\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м; $R_1 = 19 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ м).

Результати вимірювання амплітудно-частотної характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора типу кільце-диск залежно від величини навантаження представлено на рис. 6.

Коментарі до рис. 6 аналогічні з коментарями до рис. 3.

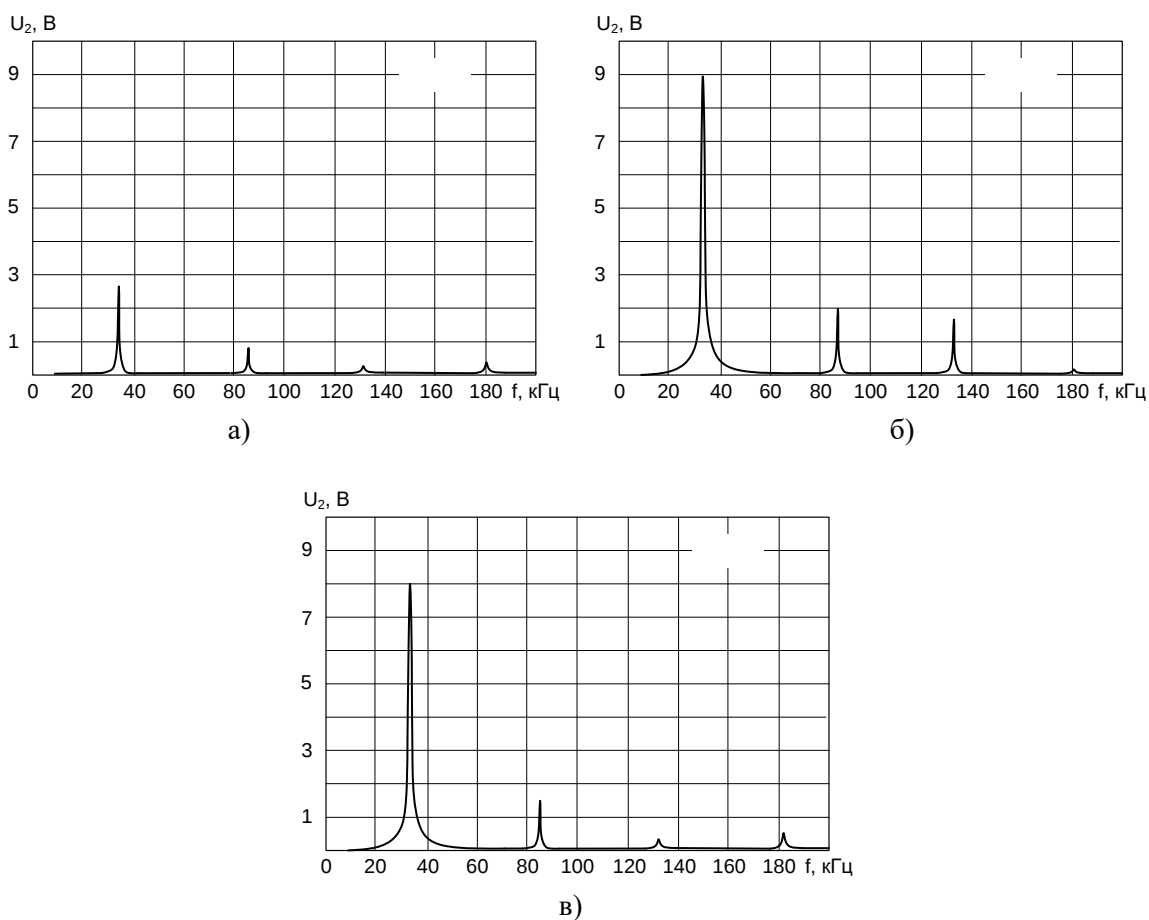


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора залежно від розмірів електродів:

- а) $R_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 7 \cdot 10^{-3}$ м;
 б) $R_1 = 19 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ м;
 в) $R_1 = 25,5 \cdot 10^{-3}$ м; $R_2 = 26,5 \cdot 10^{-3}$ м

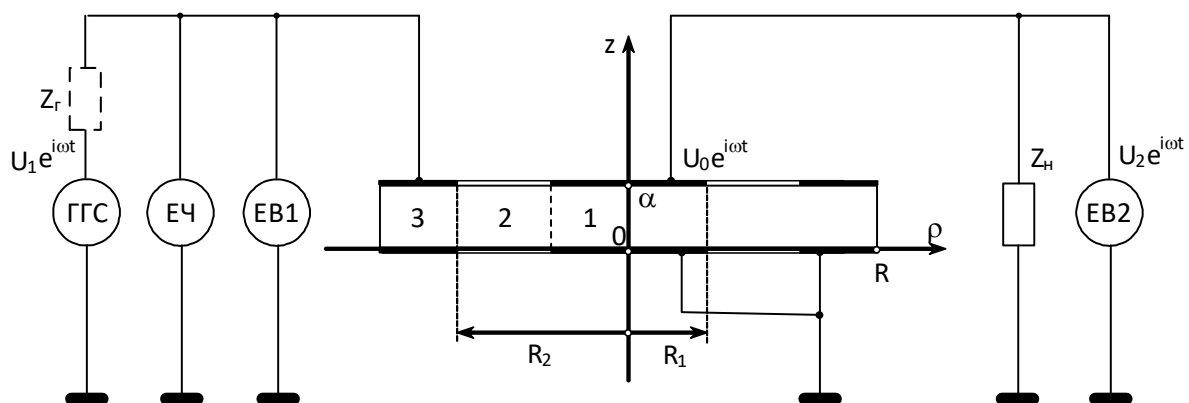


Рис. 5. Електрична схема для вимірювання п'єзокерамічного диска

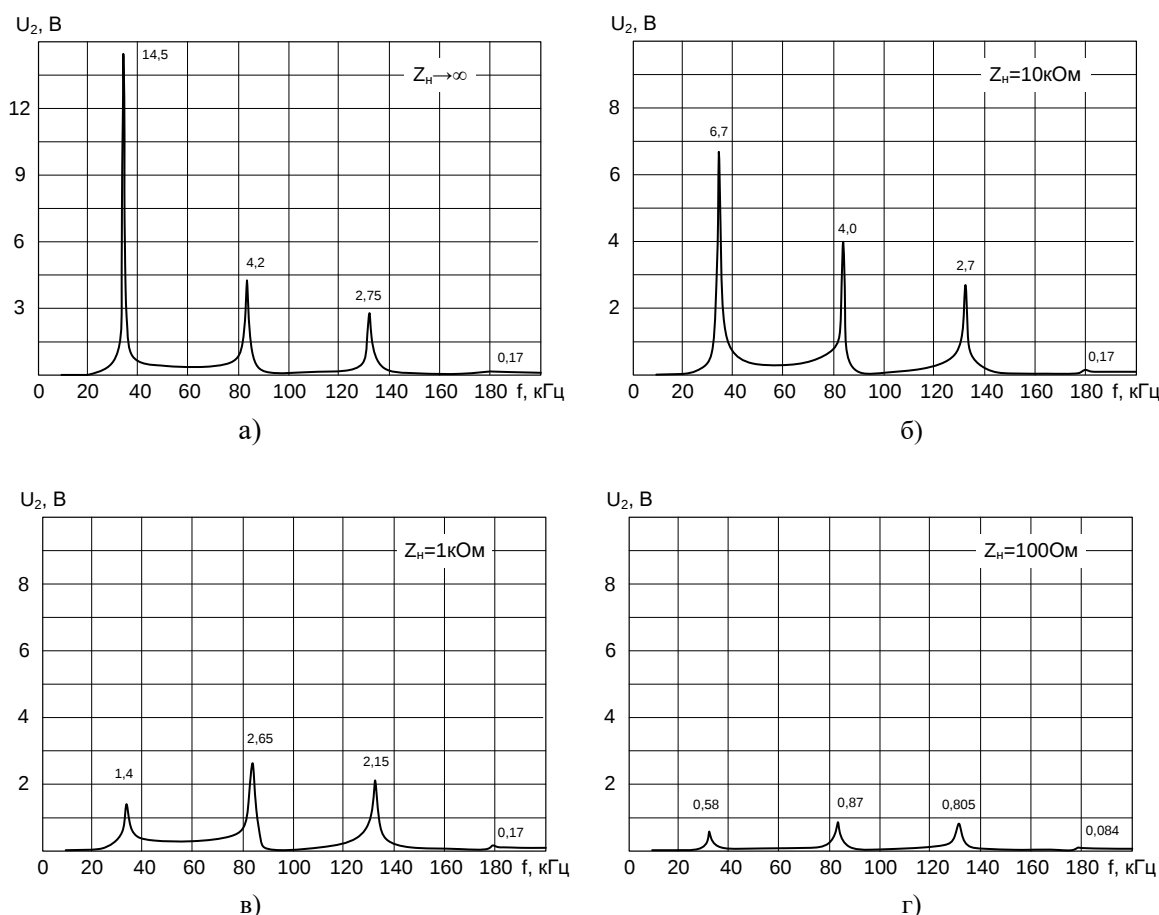


Рис. 6. Амплітудно-частотні характеристики дискового п'єзоелектричного трансформатора залежно від величини навантаження

Висновки. Основний результат цієї статті можна зафіксувати наступним чином: отримано оцінку амплітудно-частотних характеристик дискових п'єзокерамічних елементів залежно від геометричних розмірів електродів та впливу навантаження.

Список літератури

1. Жуков С. Пьезокерамика и перспективы ее применения. *МТТ. Техно plus*. 2009. № 5. С. 56–60.
2. Смирнов Ю. А., Муханов А. В. Электронные и микропроцессорные системы управления автомобилей: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 624 с.
3. Джагупов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. Санкт-Петербург: Политехника, 1994. 608 с.
4. Piazza G., Stephanou P. J., Pisano A. P. A1N contour-mode vibrating RF MEMS for next generation wireless communications, *MEMS*. 2006, pp. 906–909.
5. Li S. S., Lin Y. W., Xie Y., Nguyen C. C. 1.51 GHz polydiamond micromechanical disk resonator with impedance-mismatched isolating support. *Proceedings of the 17th Int. IEEE MEMS Conf.*, Maastricht, The Netherland, Jan. 25–29, 2004, pp. 821–824.
6. Lin Y. W., Li S. S., Ren Z., Nguyen C. C. Third-order intermodulation distortion in capacitively-driven micromechanical resonators. *IEEE Int. Ultrasonic Symposium*, Sept. 18–21, 2005, pp. 1592–1595.
7. Ruby R. Micromachined cellular filters. *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, 1996, pp. 370–377.
8. Lakin M. K., Kline G. R., McCarron K. T. Thin film bulk acoustic wave filters for GPS. *IEEE Ultrasonic Symposium: Proceedings*, 1992.

9. Петрищев О. Н., Базило К. В. Принципы и методы расчета передаточных характеристик дисковых пьезоэлектрических трансформаторов. Часть 2. Методика расчета параметров и характеристик простейшего дискового пьезоэлектрического трансформатора. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. № 4. С. 10–23.

References

1. Zhukov, S. (2009) Piezoceramics and prospects of its application. *MTT. Tehno plus*, No. 5, pp. 56–60 [in Russian].
2. Smirnov, Yu. A., Mukhanov, A. V. (2012) Electronic and microprocessor control systems for cars. St. Petersburg: Lan, 624 p. [in Russian].
3. Dzhagupov, R. G., Erofeev, A. A. (1994) Piezoelectronic device of computing, control and monitoring systems. St. Petersburg: Politehnika, 608 p. [in Russian].
4. Piazza, G., Stephanou, P. J., Pisano, A. P. (2006) A1N contour-mode vibrating RF MEMS for next generation wireless communications, *MEMS*, pp. 906–909.
5. Li, S. S., Lin, Y. W., Xie, Y., Nguyen, C. C. (2004) 1.51 GHz polydiamond micromechanical disk resonator with impedance-mismatched isolating support. *Proceedings of the 17th Int. IEEE MEMS Conf.*, Maastricht, The Netherland, Jan. 25–29, pp. 821–824.
6. Lin, Y. W., Li, S. S., Ren, Z., Nguyen, C. C. (2005) Third-order intermodulation distortion in capacitively-driven micromechanical resonators. *IEEE Int. Ultrasonic Symposium*, Sept. 18–21, pp. 1592–1595.
7. Ruby, R. (1996) Micromachined cellular filters. *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, pp. 370–377.
8. Lakin, M. K., Kline, G. R., McCarron, K. T. (1992) Thin film bulk acoustic wave filters for GPS. *IEEE Ultrasonic Symposium: Proceedings*.
9. Petrishchev, O. N., Bazilo, C. V. (2015) Principles and methods of the calculation of transfer characteristics of disk piezoelectric transformers. Part 2. The procedure of calculation of parameters and characteristics of the simplest disk piezoelectric transformer. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, No. 4, pp. 10–23 [in Russian].

C. V. Bazilo, Ph.D. (Eng.), associated professor
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

THE RESEARCH OF THE EFFECT OF LOAD VALUE AND DIMENSIONS OF PIEZOELECTRIC DISK'S ELECTRODES ON ITS AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS

Thanks to its unique properties piezoceramics has applications in various fields of engineering and technology. Manufacturers of piezoceramics, elements and components based on it conduct research and design work to improve the parameters of ceramics, develop its new types, for which significant financial resources are allocated. Piezoelectric disks with partial electrodes of one or two surfaces are often used to create various functional piezoelectronic devices. Disk piezoelectric devices are widely used in the elements of information systems.

The purpose of this article is to research amplitude-frequency characteristics of disk piezoceramic elements, depending on the geometric dimensions of the electrodes and the load value.

Keywords: piezoelectric disk element, physical processes, amplitude-frequency characteristics.

К. В. Базіло, к.т.н., доцент,
С. О. Білокінь, к.т.н.,
М. О. Бондаренко, к.т.н., доцент,
В. В. Медяник

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

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ СТРУКТУР МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

Нині провідні виробники радіоелектронних компонентів серійно випускають досить великий перелік елементів, до складу яких включені різні мікроелектромеханічні структури. Основна перевага використання у вимірювальних приладах елементів з п'єзокерамічних матеріалів обумовлюється їх особливою структурою, яка дозволяє реалізувати в одному такому елементі принципово різні схеми, наприклад, для одночасного вимірювання температури, тиску і вологості. Метою роботи є вивчення методом атомно-силової мікроскопії прихованих мікрodefектів і мікронерівностей поверхонь п'єзоелектричних перетворювачів.

Ключові слова: мікроелектромеханічні структури, атомно-силова мікроскопія, мікронерівність поверхні, мікрodefекти.

Вступ. Нині провідні виробники радіоелектронних компонентів серійно випускають досить великий перелік елементів, до складу яких включені різні мікроелектромеханічні структури (МЕМС), наприклад, різні акселерометри, які випускаються багатомільйонними тиражами, резонатори і реалізовані на їх основі фільтри електричних сигналів, трансформатори та інші мікромініатюрні електро-механічні системи [1].

П'єзоелектричні перетворювачі різноманітних форм, розмірів і функціонального призначення використовуються в контрольно-вимірювальних приладах, мікротехніці і медичних приладах. Однак подальше вдосконалення таких перетворювачів шляхом їх мініатюризації неможливе без прогнозування терміну їх безвідмовної експлуатації. Особливо важливо це врахувати при використанні п'єзоелектричних перетворювачів в ультразвукових хірургічних інструментах, де вихід з ладу таких перетворювачів може призвести до неправильної роботи пристрою, а в окремих випадках – до небезпеки для здоров'я людини [2].

Основними показниками, які впливають на безперебійну роботу і надійність експлуатації п'єзоелектричних перетворювачів, є мікронерівності поверхонь п'єзоелектричних елементів і відсутність на них мікрodefектів.

Тому **метою** роботи є проведення досліджень і аналізу мікрогеометрії поверхонь

п'єзоелектричних перетворювачів методом атомно-силової мікроскопії для визначення прихованих мікрodefектів і мікронерівностей поверхонь цих перетворювачів.

Методи та матеріали. Відмінною рисою між МЕМС і звичайними п'єзоелементами є спосіб електродування робочих поверхонь. Звичайні п'єзоелектричні елементи мають, як правило, суцільне електродування поверхні. У деяких спеціальних випадках електроди поділяються (розрізаються) на окремі області, які не мають між собою гальванічного зв'язку. У МЕМС, як правило, використовується часткове електродування робочих поверхонь, коли тільки частина поверхні поляризованого сегнетоелектрика покривається металевою плівкою. Цей спосіб електродування дозволяє збуджувати в об'ємі МЕМС кілька типів пружних коливань. Маніпулюючи геометричними параметрами електродування поверхонь, можна управляти енергетикою коливальних процесів в МЕМС, тобто створювати умови, коли один тип коливання буде домінувати над іншими за амплітудою вектора пружних зміщень матеріальних частинок.

Якщо часткове електродування виконано з порушенням осової симетрії всієї конструкції, то відкриваються додаткові можливості по управлінню параметрами напружено-деформованого стану п'єзоелектричного диска і передавальними характеристиками електро-механічної системи в цілому.

Сучасні технології дозволяють створювати мікроструктури, які об'єднують у собі властивості та якості електронних схем і механічних коливальних систем. В одному корпусі (чіпі) можуть знаходитися десятки однотипних модулів. Під модулем розуміється сукупність мікромініатюрної механічної коливальної системи і електронної схеми, що забезпечує її роботу. Послідовне з'єднання декількох модулів з досить простими індивідуальними характеристиками дозволяє створювати пристрої з унікальними параметрами. Сказане можна проілюструвати наступним прикладом (рис. 1) [3].

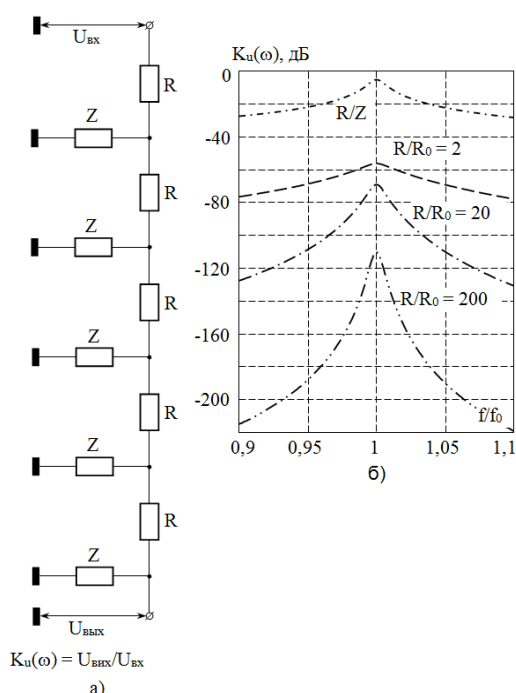


Рис. 1. Сходова схема включення (а) однакових дільників напруги і частотні характеристики сходового фільтра (б)

Припустимо, що є найпростіший дільник електричної напруги, в верхнє плече якого включений резистор R , а в нижнє – МЕМС-резонатор, електричний імпеданс якого $Z_{el}(\omega)$ визначається характеристичним опором $R_0 = 5 \text{ Ом}$ та добротністю $Q_0 = 100$. Якщо прийняти значення $R = 1000 \text{ Ом}$, то коефіцієнт ділення одиночного дільника змінюється так, як це показано на рис. 1, б штрихпунктирною кривою, виділеною символом R/Z . По осі абсцис на рис. 1, б відкладається безрозмірна частота f/f_0 . Чітко видно, що одиночний дільник забезпечує пригасуван-

ня сигналу поза смугою пропускання не більше ніж на 30 дБ. Послідовне з'єднання за сходовою схемою (рис. 1, а) лише п'яти подібних дільників забезпечує пригасування сигналу поза смугою пропускання не менше 120 дБ. Криві, відмічені на рис. 1, б символами $R/R_0 = 2$ і $R/R_0 = 20$, показують, що при фіксованих параметрах МЕМС-резонатора результат роботи сходової схеми значною мірою залежить від вибору величини резистора R . Згасання сигналу на резонансній частоті можна компенсувати за допомогою коригувальних підсилювачів, які включаються між ланками сходової схеми [3].

Розглянутий приклад переконливо демонструє можливості створення за допомогою мікросистемних технологій у малих об'ємах (в об'ємі одного корпусу мікросхеми) пристроїв з унікальними характеристиками і параметрами.

Аналізуючи конструкції сучасних дискових п'єзоелементів [4–7], можна помітити, що більшість із них мають несиметричне розташування електродів на своїй поверхні (наприклад, рис. 2 [4]). Таке розташування електродів, а також кріплення елементів викликає наявність невісесиметричних коливальних у дискових елементах. При аналізі частотних характеристик таких пристроїв необхідно враховувати вплив на них цих коливальних.

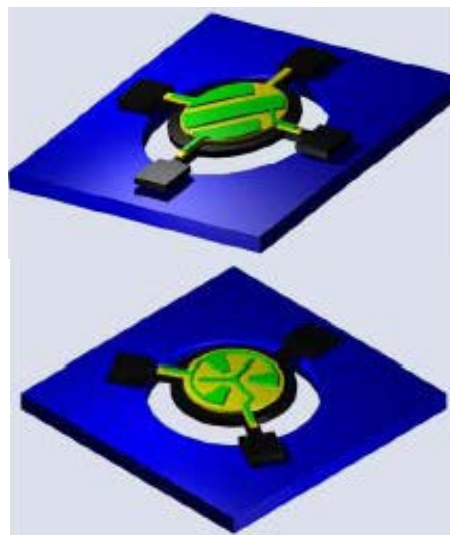


Рис. 2. Модель сучасних дискових МЕМС-резонаторів

У роботах [8, 9] було показано, що термічним осадженням у вакуумі можна отримати впорядковані наноструктури на поверхнях п'єзокерамічних елементів.

Серед існуючих неруйнівних методів контролю, за допомогою яких можна визначити як стан поверхні п'єзоелектричних елементів (її мікрогеометрію та пористість), так і розміри сформованих у ній структур, найбільш перспективним є метод атомно-силової мікроскопії, що має високу точність (до 1 нм), чутливість (близько 10^{-12} Н) та продуктивність.

Експериментальні дослідження полягали у формуванні тонкого однорідного металевого (Ag) покриття товщиною до 1000 нм на поверхні елементів з п'єзокераміки марки ЦТС-19 методом термічного осадження у вакуумі порядку $(2...3) \cdot 10^{-3}$ Па.

Дослідження поверхні елементів з п'єзоелектричної кераміки проводилися із застосуванням атомно-силового мікроскопа «NT-206». При цьому використовувалися кремнієві зонди «Ultrasharp CSC12». Вимірювання мікрорельєфу поверхні зразків проводилося в статистичному режимі на ділянках поверхні максимальним розміром 13×13 мкм, відповідно до розроблених методик та рекомендацій.

На рис. 3 зображено топографи п'єзоелемента, отриманого традиційним шляхом в початковий момент часу (3, а) і через п'ять років експлуатації (3, б), а також отриманого нанесенням покриття у вакуумі (3, в) і через п'ять років експлуатації (3, г).

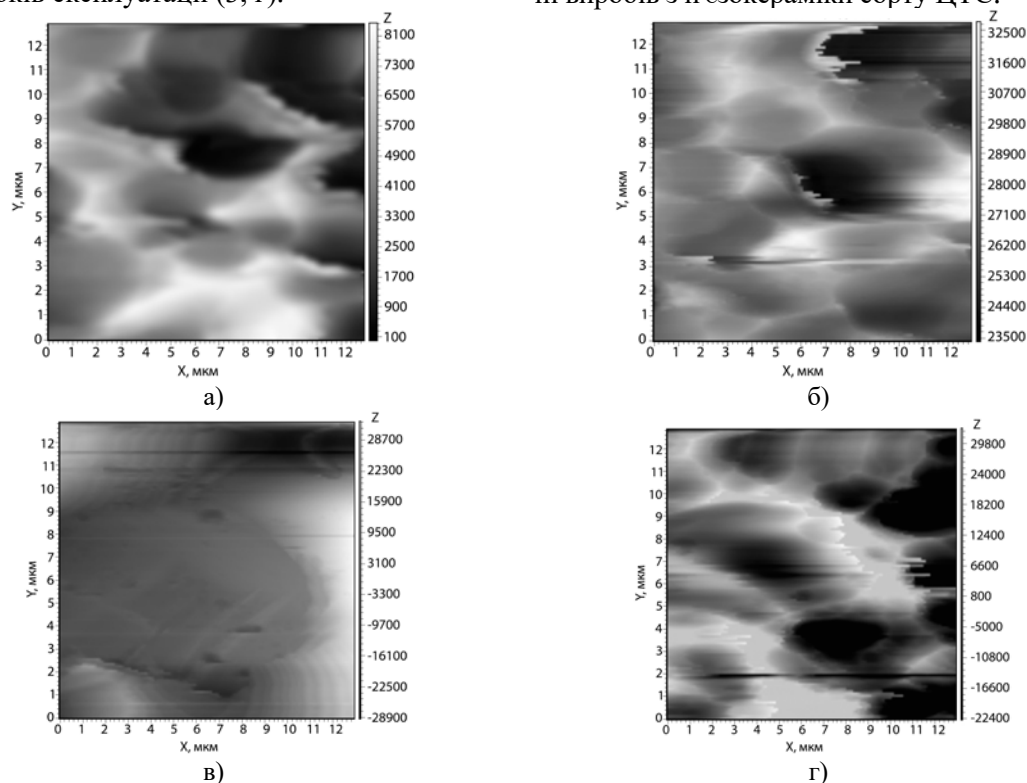


Рис. 3. Топографи п'єзоелемента: отриманого традиційним шляхом у початковий момент часу (а) і через п'ять років експлуатації (б); отриманого нанесенням покриття у вакуумі (в) і через п'ять років експлуатації (г)

Порівнюючи результати, отримані методом атомно-силової мікроскопії (АСМ) до і після п'яти років експлуатації для зразків, отриманих як традиційним способом, так і методом термовакуумного напилення, можна зробити наступні висновки. Зразки, що не перебувають в експлуатації, мають значно меншу кількість артефактів сканування, на відміну від зразків, що перебувають тривалий час в експлуатації – горизонтальні лінії на топограмах (рис. 3, б, г). Такі артефакти сканування, на думку авторів, виникають у процесі контактного сканування зонду АСМ з досліджуваною поверхнею. На останніх, які перебувають в умовах атмосфери навколишнього середовища тривалий час, а саме, п'яти років, утворюються нестійкі з'єднання сульфідів і аміачних сполук. При скануванні такі сполуки зминаються зондом АСМ, утворюючи ці артефакти.

У той же час, проводячи порівняння зразків, отриманих традиційним способом (рис. 3, а) і методом термовакуумного напилення (рис. 3, в), можна перекоонатися в значному зменшенні кількості мікронерівностей і пористості поверхонь, отриманих запропонованим авторами статті методом. Останнє підтверджує перспективність цього методу при виготовленні виробів з п'єзокераміки сорту ЦТС.

На рис. 4 представлено профілі поверхні п'єзоелементів, отриманих традиційним шляхом у початковий момент часу (1) і через п'ять років експлуатації (2), а також отриманого нанесенням покриття у вакуумі (3) і че-

рез п'ять років експлуатації (4). З отриманих профілограм видно, що експлуатація виробів, отриманих обома способами, з часом збільшує мікронерівності в 1,5–3,6 разу.

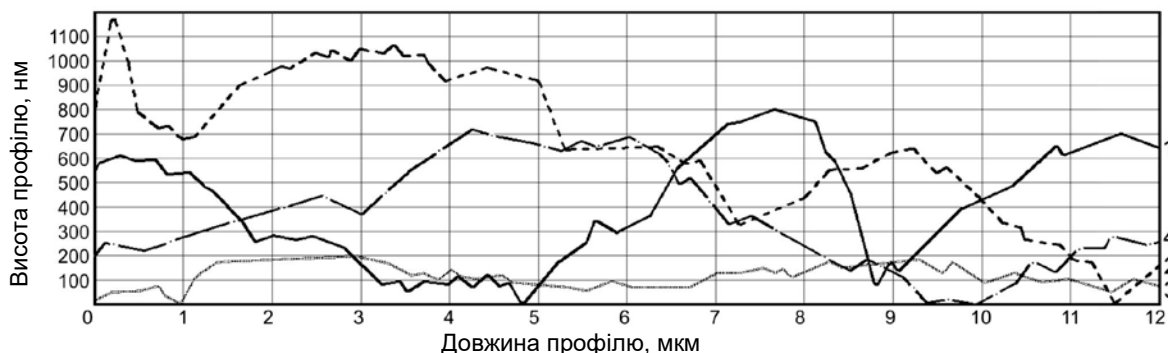


Рис. 4. Профілі поверхні п'єзоелемента: отриманого традиційним шляхом у початковий момент часу (1) і через п'ять років експлуатації (2); отриманого нанесенням покриття у вакуумі (3) і через п'ять років експлуатації (4)

На рис. 5 зображено топографи п'єзоелемента в початковий момент часу (5, а), через п'ять років експлуатації (5, б) і через сім років експлуатації (5, в). З представлених топо-

грам видно появу артефактів сканування після п'яти і, особливо, після семи років експлуатації. При цьому також відбувається збільшення пористості поверхні п'єзокераміки сорту ЦТС.

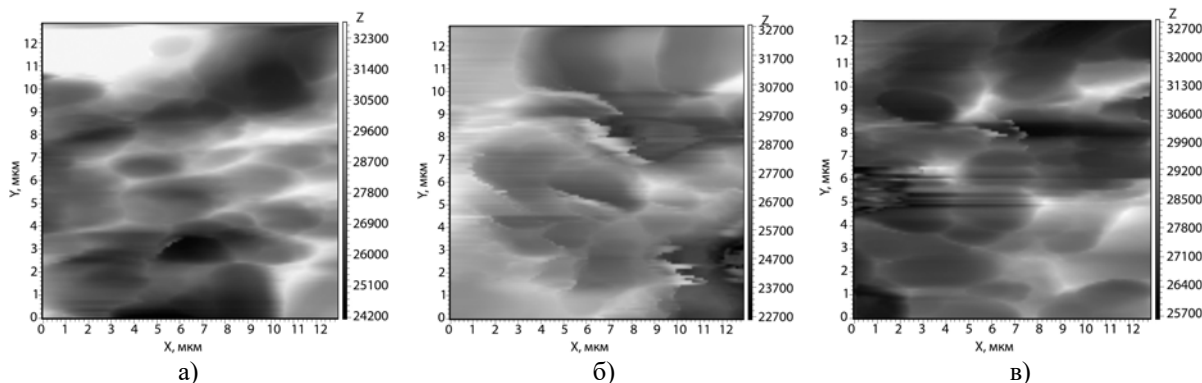


Рис. 5. Топографи п'єзоелемента:

а) в початковий момент часу; б) через п'ять років експлуатації; в) через сім років експлуатації

На рис. 6 представлено профілі поверхні п'єзоелемента в початковий момент часу (1), через п'ять років експлуатації (2) і через сім років експлуатації (3).

При цьому встановлено, що мікронерівності поверхні з часом експлуатації збільшуються, відповідно, в 3,8–4,2 разу (п'ять років експлуатації) і 5,3–5,5 разу (сім років експлуатації).

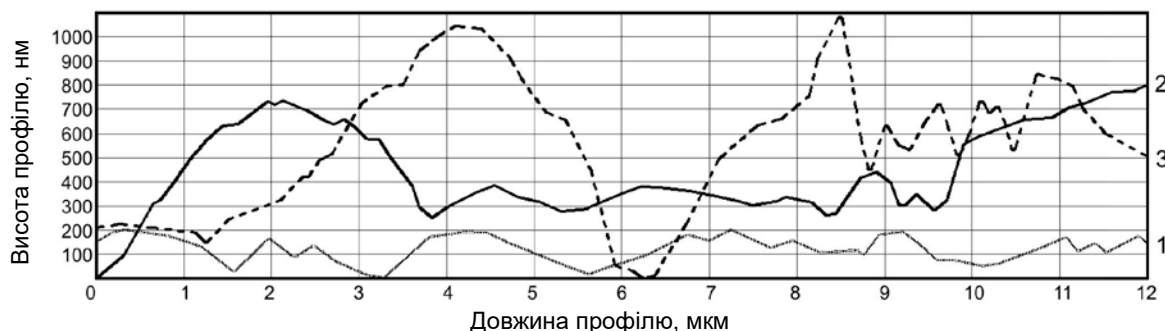


Рис. 6. Профілі поверхні п'єзоелемента:

1 – в початковий момент часу; 2 – через п'ять років експлуатації; 3 – через сім років експлуатації

Аналіз результатів АСМ досліджень поверхонь п'єзоелектричних елементів дозволив встановити, що в процесі тривалої експлуатації відбувається руйнування їх поверхонь (рис. 4) (збільшення мікронерівностей від 805–815 нм до 1130–1180 нм (поверхні отримані традиційним методом), а також від 180–210 нм до 680–710 нм (поверхні отримані методом термічного напilenня у вакуумі), поява мікротріщин, відколів та інших мікродефектів).

Висновки. Для аналізу поверхні п'єзоелектричних перетворювачів використаний метод атомно-силової мікроскопії, який дозволив на початковій стадії експлуатації визначати приховані мікродефекти (мікротріщини, відколи, точки тощо) і мікронерівності, які не можуть бути визначені методами оптичної та растрової електронної мікроскопії.

Показано перспективу використання методу термовакуумного напilenня при отриманні покриттів електродів на виробках з п'єзоелектричної кераміки сорту ЦТС.

Встановлено, що при експлуатації п'єзоелектричних перетворювачів відбувається прогресування зазначених вище дефектів (збільшення середніх значень мікронерівностей, розвиток тріщин), що призводять до передчасного виходу їх із ладу.

Список літератури

1. Varadan V., Vinoy K., Jose K. RF MEMS and their applications. 2002. John Wiley & Sons Ltd. 406 p.
2. Бондаренко М. А., Бондаренко Ю. Ю. и др. Применение метода атомно-силовой микроскопии в прогнозировании срока эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей медицинских приборов. *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии 2006*: материалы VII Междунар. семинара. Минск, 2006. С. 143–147.
3. Петрищев О. Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса – антирезонанса. Киев: Аверс, 2012. 300 с.
4. Yan Le, Wu Jian, Tang W. C. Piezoelectric micromechanical disk resonators towards UHF band. 2004. Vol. 2. P. 926–929.
5. Wang Jing, Ren Z., Nguyen C. T.-C. 1.156-GHz self-aligned vibrating micromechanical disk resonator. *IEEE Trans. Ultra-*

son. Ferroelectr. Freq. Control. 2004. Vol. 51. No. 12, Dec. P. 1607–1628.

6. Nguyen C. T.-C. Integrated micromechanical circuits fueled by vibrating RF MEMS technology. 2006. P. 957–966.
7. Nguyen C. MEMS technology for timing and frequency control. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.* 2007. Vol. 54. No. 2. P. 251–270.
8. Бондаренко М. А. и др. Формирование упорядоченных наноструктур на пьезоэлектрической керамике системы ЦТС термическим осаждением в вакууме. *Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях*: материалы X Юбил. междунар. пром. конф. с. Славское Львовской обл., 2010. С. 159–160.
9. Шарапов В. М., Гуржий А. М., Бондаренко М. А. и др. Исследование характеристик токопроводящих электропроводных пьезокерамических элементов. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. Черкаси: ЧДТУ, 2007 (спецвип.). С. 258–260.

References

1. Varadan, V., Vinoy, K., Jose, K. (2002) RF MEMS and their applications. John Wiley & Sons Ltd, 406 p.
2. Bondarenko, M. A., Bondarenko, Yu. Yu. et al. (2006) Application of the method of atomic force microscopy in predicting the lifetime of piezoelectric transducers of medical devices. *Methodological Aspects of Scanning Probe Microscopy 2006*: materials of the VII Internat. seminar. Minsk, pp. 143–147 [in Russian].
3. Petrishchev, O. N. (2012) Harmonic oscillations of piezoceramic elements. Part 1. Harmonic vibrations of piezoceramic elements in vacuum and a method of resonance – anti-resonance. Kyiv: Avers, 300 p. [in Russian].
4. Yan, Le, Wu, Jian, Tang, W. C. (2004) Piezoelectric micromechanical disk resonators towards UHF band, Vol. 2, pp. 926–929.
5. Wang, Jing, Ren, Z., Nguyen C. T.-C. (2004) 1.156-GHz self-aligned vibrating micromechanical disk resonator. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 51, No. 12, Dec., pp. 1607–1628.
6. Nguyen, C. T.-C. (2006) Integrated micromechanical circuits fueled by vibrating RF MEMS technology, pp. 957–966.

7. Nguyen C. (2007) MEMS technology for timing and frequency control. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 54, No. 2, pp. 251–270.
8. Bondarenko, M. A. et al. (2010) The formation of ordered nanostructures on piezoelectric ceramics of PZT system by thermal deposition in vacuum. *Efficiency of realization of scientific, resource and industrial potential under the present conditions: materials of the X Internat. industr. conf.*, pp. 159–160 [in Russian].
9. Sharapov, V. M., Gurzhij, A. M., Bondarenko, M. A. et al. (2007) The investigation of characteristics of electrically conductive piezoceramic elements. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky* (special issue), pp. 258–260 [in Russian].

C. V. Bazilo, Ph.D. (Eng.), associated professor,

S. O. Bilokin, Ph.D. (Eng.),

M. O. Bondarenko, Ph.D. (Eng.), associated professor,

V. V. Medianyuk

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

THE STUDY OF MICROELECTROMECHANICAL PIEZOELECTRIC STRUCTURES BY THE METHOD OF ATOMIC FORCE MICROSCOPY

Currently leading manufacturers of electronic components serially produce a rather extensive list of elements, in which various microelectromechanical structures are included, such as various accelerometers, which are produced by millions of copies, resonators and electrical signals filters implemented on their basis, transformers and other microminiature electromechanical systems. The main advantage of using of elements, made of piezoceramic materials, in measuring devices is determined by their special structure, which allows to implement in one such element fundamentally different schemes, for example, for simultaneous measurement of temperature, pressure and humidity. The purpose of the work is to investigate hidden microdefects and microroughnesses of the surfaces of piezoelectric transducers using atomic force microscopy.

Keywords: microelectromechanical structures, atomic force microscopy, surface microroughness, microdefects.

І. М. Демчук, аспірант,
e-mail: ivannademcuk19@gmail.com

Г. С. Столяренко, д.т.н., професор
e-mail: radikal@ukr.net

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

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРИЧНОЇ СТОХАСТИЧНОЇ СИСТЕМИ СИНТЕЗУ ГІДРАЗИН-СИРЦЮ З ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ В ХВИЛЬОВОМУ РЕАКТОРІ

В роботі розглянуто процес синтезу гідразин-сирцю в хвильовому реакторі з точки зору математичного моделювання. Синтез гідразину є основною стадією процесу синтезу гідразину сульфату з вторинної сировини – конденсату сокової пари, утвореної в результаті роботи агрегату синтезу карбаміду. Проведено техніко-економічний аналіз існуючих способів синтезу гідразину та його похідних з різної сировини. Встановлено доцільність продовження дослідження процесу синтезу гідразину з вторинної сировини та підтверджено актуальність теми утилізації конденсатів сокової пари шляхом переробки в гідразин сульфат. Ідентифіковано процес синтезу гідразин-сирцю як складний параметричний стохастичний процес. Вивчено фактори впливу на процес синтезу гідразин-сирцю, які відповідають умовам працездатності системи синтезу гідразину з конденсатів сокової пари виробництва карбаміду. Запропоновано методи планування експерименту та встановлено оптимально можливий вектор проведення експерименту в напрямку проведення пасивного експерименту.

Ключові слова: гідразин, конденсат сокової пари, стохастична система, хвильовий реактор, фактор впливу.

Вступ. У статті «Утилізація зв'язаного азоту шляхом переробки в гідразин сульфат у виробничих стічних водах» розглянуто та доведено можливість використання відходу виробництва карбаміду – конденсату сокової пари – до стадії десорбції та гідролізу як сировини для синтезу гідразину як основного напівпродукту в процесі синтезу гідразин сульфату [1]. Як правило, стічні води виробництва карбаміду, які в своєму складі містять низькоконцентровані розчини амонійного та амідного азоту з масовою концентрацією аміаку до 5 %, карбаміду до 3 % та з невисоким вмістом біурету (до 0,5 % масових), піддають двоступеневій десорбції та гідролізу. На цю стадію витрачається велика кількість пари. Згідно з попередніми розрахунками [2] відсоток заощадження від загальної собівартості готового продукту (карбаміду) для агрегату синтезу за проектом фірми «Уреа Казале» продуктивністю 1000 т/добу при впровадженні утилізаційної технології синтезу гідразин сульфату, за умови ліквідації стадії десорбції та гідролізу, становитиме 1,5 %.

Основна частина стічної води після десорбції та гідролізу з масовою концентрацією карбаміду, не більшою ніж 300 мг/дм³, і масо-

вою концентрацією аміаку, не більшою ніж 100 мг/дм³, надходить на доочищення в установки нітри-денітрифікації (НДФ). Як відомо, ефективність очищення стоків на установках НДФ від амонійного азоту в середньому по Україні становить близько 77 % при середній концентрації амонійного азоту на вході на рівні 30 мг/дм³. Тобто, перед подачею стічних вод виробництва карбаміду після стадії десорбції та гідролізу на установки НДФ їх необхідно додатково розбавити побутовими стоками в десять разів. Крім цього, необхідно забезпечити оптимальні умови функціонування установок НДФ, що на практиці є досить складним та енергоємним процесом. Згідно зі статистичними даними щороку в поверхневі водні об'єкти України потрапляє близько 20 тис. тонн зв'язаного азоту [3]. Що стосується відсотка заощадження на собівартості карбаміду за статтями витрат «Перекачування стоків на установки НДФ» та «Очищення стоків на установках НДФ», то він становить близько 1 % для агрегату синтезу карбаміду продуктивністю 1000 т/добу [2].

Отже, розробка альтернативної утилізаційної технології сприятиме зменшенню собівартості карбаміду в середньому на 2,2–2,5 %

(залежно від конструкції агрегату синтезу карбаміду, його продуктивності та вартості енергоресурсів). Тому питання реутилізації конденсатів сокової пари виробництва карбаміду є актуальним хоча б з точки зору позитивного економічного ефекту на роботу агрегату синтезу карбаміду.

Що стосується запропонованого в попередніх роботах [1, 2] методу синтезу гідразин сульфату з вторинної сировини в хвильовому реакторі, то, однозначно, можна підтвердити актуальність продовження проведення досліджень цього методу, тому що, крім позитивного економічного ефекту для агрегату синтезу карбаміду, розробка технології синтезу гідразин сульфату з вторинної сировини (низькоконцентрованої водної суміші амідного та амонійного азоту) дасть можливість знизити собівартість гідразин сульфату, позитивно вплине на екосистему за рахунок зменшення навантаження на установки НДФ та сприятиме поглибленню знань в такій галузі наук, як квантова хімія, що точніше описує процеси гомолізу, які відбуваються в хвильовому реакторі.

Постановка проблеми. В зв'язку з тим, що процес синтезу гідразину відбувається в хвильовому реакторі (ескіз лабораторної установки отримання гідразин сульфату зображено в роботі [1]), розглядати процес синтезу гідразину з точки зору елементарної хімії недоречно, тому що під дією електромагнітних хвиль відбуваються паралельно і атомно-радикальні процеси. На жаль, дослідити експериментально вплив мікрохвильового опромінення на кінетику магнітного моменту запропонованого методу синтезу гідразин-сирцю досить складно. Саме тому запропонований метод синтезу гідразин сульфату [1], основна стадія якого – синтез гідразин-сирцю, є досить складною стохастичною системою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Історія синтезу гідразину почалася з 1875 року, коли його органічні похідні були відкриті Фішером. Далі синтезувати гідразину гідрат та його неорганічні солі (гідразину сульфат та гідразину хлорит) вдалося Куріусу в 1887 році [4]. Що стосується промислових схем синтезу гідразину, то основною сировиною синтезу гідразину та його похідних на сьогоднішній день є аміак за методом Рашига, карбамід за методом Хофмана, ацетон та перекис водню за методом Юджина-Кульмана [1]. Також було розроблено синтез гідразин сульфату, де як сировина використовується

бензохіноназин. Гідразин сульфат утворюється шляхом гідролізу бензохіноназину в присутності розведеної сірчаної кислоти. Ця процедура є дуже складною і вимагає випарювання великої кількості води та вилучення бензохінону шляхом випарювання ефірних сполук, що утворюються при взаємодії бензохінону з етиловим ефіром. Це значно ускладнює процес синтезу, тому що концентрація гідразин сульфату в розчині коливається в межах 1–2 % масових [5]. Також розроблено технологію синтезу гідразину сульфату та гідразину гідрату з використанням кетонів, котрі зв'язують новоутворений гідразин в діазоциклопропан, який зв'язують сірчаною кислотою, що приводить до утворення гідразину сульфату та кетазину (кетазиновий метод) [4].

Метод Рашига є дешевшим, ніж метод Хофмана, але через пагубний вплив на навколишнє середовище та високе споживання енергоресурсів перевагу віддають методу Хофмана [6]. Деякі агрегати синтезу гідразину за методом Хофмана, побудовані наприкінці минулого століття в таких країнах, як: Німеччина, США, Англія та Японія, збереглися і до нашого часу.

Що стосується синтезу гідразину за методом Юджина-Кульмана, то він може бути економічним, порівнюючи з синтезом Рашига, але все залежить від середньої ринкової вартості на сировину на момент виробництва [6].

Кетазиновий метод має значні переваги, тому що при виробництві кетазину можна уникнути розкладання гідразину, але він є більш енергозатратним. Цей спосіб синтезу гідразину застосовують здебільшого у Франції [6].

Гідразин та його солі мають широкий спектр використання. Зокрема, гідразин сірчанокислий використовується: в неорганічній хімії; в аналітиці; фармакології (використовується в медицині як протипухлинний засіб); у водопідготовці (для обробки підживлювальної води барабанних парогенераторів); в сільському господарстві як один зі складових компонентів пестицидів та бактерицидів; як везикант для виробництва пластику і гуми [7, 8, 9].

Гідразин сульфат – сильний відновник, набагато стійкіший, ніж гідразин. За умови отримання низькоконцентрованих розчинів гідразин-сирцю з вторинної сировини питанню стабілізації гідразину надавалося велике значення.

Використання таких методів концентрування гідразину, як вакуум-випарювання та виморожування розчинів, є недоречним. При концентруванні гідразину за допомогою вакуум-випарних апаратів втрачається близько 25 % новоутвореного гідразину [10]. За умови низьких концентрацій гідразин-сирцю цей процес є занадто енергоємним. Що стосується виморожування, то цей процес також є занадто енергоємним, до того ж, перебіг процесу виморожування гідразину ускладнюється умовою повної ізоляції системи, що обумовлено швидким окисненням новоутвореного гідразину киснем з повітря. Найбільш ефективним способом швидкої стабілізації утвореного в процесі синтезу гідразин-сирцю є переведення його в малорозчинну сіль – гідразину сульфат.

Алгоритму розрахунку параметрів цієї стохастичної системи синтезу гідразину з відходів виробництва карбаміду не існує, тому що запропонований метод до цього часу не розглядався.

Мета роботи – проаналізувати параметричну стохастичну систему синтезу гідразин-сирцю з конденсатів сокової пари виробництва карбаміду в хвильовому реакторі та визначити фактори впливу на двофазну багатокомпонентну систему синтезу гідразину, які б відповідали умовам працездатності системи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основні та побічні рівняння реакції синтезу гідразину, з точки зору елементарної хімії, без урахування перебігу атомно-радикальних процесів у реакторі синтезу гідразину, представлені у попередніх дослідженнях процесу утилізації зв'язаного азоту шляхом переробки в гідразин сульфат у виробничих стічних водах [1].

Як відомо, в стохастичних системах попередити хід перебігу процесу неможливо, тому що він залежить від випадкових факторів впливу [11].

У цьому процесі випадковими факторами впливу на систему є розподіл хвиль у зоні реакції, градієнт концентрації основних компонентів синтезу гідразину та наявність інгібіторів процесу, а саме розчинених металів у конденсаті сокової пари, та початкова температура вторинної сировини, за умови проекції методу синтезу гідразин сульфату на виробничі масштаби, з прив'язкою до агрегату синтезу карбаміду. Всі ці параметри є однозначно змінними, вони залежать від параметрів перебігу процесу концентрування карбаміду у

вакуум-випарних апаратах і процесів розподілу та довжини електромагнітних хвиль у реакторі синтезу.

Всі процеси функціонування реальних складних систем, таких як синтез у парорідинному потоці під дією електромагнітного опромінення, по суті, мають випадковий характер, завдяки чому в моменти надходження вхідних сигналів відбувається регенерація випадкового процесу. Тобто, розвиток процесів у таких системах після надходження вхідних сигналів не залежить від передісторії.

Будь-яку складну технічну систему можна подати як систему з n вхідними параметрами x_i , де $i = 1, 2, \dots, n$, та m вихідними параметрами Y_i , де $i = 1, 2, \dots, m$. Тоді система характеризується вектором вхідних $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ та вектором вихідних $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ та параметрів [12].

Створення будь-якої нової технології, машини, механізму та інших систем і процесів починається з визначення технічних умов на вихідні параметри, які називають умовами працездатності. Ці умови виражаються у вигляді номінальних значень вихідних параметрів $Y_0 = (Y_{01}, Y_{02}, \dots, Y_{0m})$ та допусків на їх значення як:

$$Y_{0i} - \delta_i \leq Y_{0i} \leq Y_{0i} + \delta_i, i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

або лише як нерівності типу:

$$[y_i] \leq Y_i \leq [Y_i], i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Умови працездатності утворюють область допустимих значень D_y , геометричним відображенням якої у прямокутній декартовій системі координат простору вихідних параметрів R_m є ортогональний паралелепіпед допусків D_y [12]:

$$D_y = \{y \in R_m \mid [y_i] \leq Y_i \leq [Y_i], i = 1, 2, \dots, m\}. \quad (3)$$

Часто обмеження встановлюються і на вхідні параметри системи, наприклад, типу:

$$[x_i] \leq X_i \leq [X_i], i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

В цьому випадку обмеження на вхідні параметри системи встановлюються лише на такий вхідний фізичний параметр, як швидкість потоку реакційної суміші. Інші вхідні параметри системи синтезу гідразину в умовах синтезу з вторинної сировини будуть незалежно змінними. Також встановлюються обмеження на такий параметр, як сталість співвідношення основних компонентів у су-

міші. За умови перебігу безперервного процесу синтезу гідрозин-сирцю, що обумовлений проекцією лабораторної установки синтезу гідрозину сульфату на виробничі потужності, цей параметр утримати сталим досить складно навіть при повній автоматизації виробництва, тому, в цьому випадку також буде встановлено обмеження на цей вхідний параметр системи.

Перед нами стоїть основна задача – обґрунтувати запропонований метод утилізації конденсатів сокової пари, щоб його вихідні параметри відповідали умовам працездатності, для забезпечення необхідного рівня якості функціонування методу синтезу гідрозин-сирцю з конденсатів сокової пари виробництва карбаміду. Інакше кажучи, необхідно знайти область працездатності $Dx = \{x \in R_n\}$, тобто множину точок простору вхідних параметрів досліджуваної системи R_n , в яких виконуються умови працездатності.

Задача побудови області працездатності, вибору номінальних значень вхідних параметрів $x_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})^T$ і допусків на них називається задачею параметричного синтезу [12].

Для генерування точок простору вхідних параметрів R_n і перевірки їх належності до області працездатності Dx використовують метод Монте-Карло (метод аналізу чутливості та аналізу сценаріїв на базі теорії ймовірностей). Навіть використовуючи найсучасніші комп'ютери, такий підхід викликає значні труднощі через відсутність інформації про закономірності випадкових процесів варіації параметрів і величезний обсяг необхідних при цьому обчислень для розв'язання таких задач зі стохастичними критеріями. Тому на сьогодні розвиток теорії параметричного синтезу ведеться в сторону пошуку методів і алгоритмів зменшення необхідних обчислень, таких як ефективний вибір розміру сітки представлення області працездатності [12].

Задача параметричного синтезу полягає у виборі номінальних вхідних параметрів $x_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})^T$, які забезпечують максимум імовірності умов працездатності протягом заданого часу:

$$x_0 = \arg \min P\{X(x_0, t) \in Dx, \forall t \in [0, T]\}, \quad (5)$$

де $X(x_0, t)$ – випадковий процес зміни вхідних параметрів, t – момент часу, T – максимальна тривалість експлуатації технічної системи.

Труднощі розв'язання задачі (5) полягають у тому, що закони зміни $X(x_0, t)$ невідомі, інформація про область Dx є також невідомою, отже, перевірка $X(x_0, t) \in Dx$ є неможливою.

В зв'язку зі складністю генерування точок простору вхідних параметрів R_n і перевірки їх належності до області працездатності Dx використання активного експерименту стає неможливим, тому в цьому випадку потрібно застосовувати пасивний експеримент.

Отже, проведемо ефективний вибір розміру сітки представлення області працездатності для процесу синтезу гідрозину з конденсатів сокової пари виробництва карбаміду. Стратегія проведення дослідів визначається зворотним методом оптимізації. При цьому значення цільової функції обчислюють не по моделі, а знаходять безпосередньо з експерименту, виконаного у відповідних умовах. В цьому випадку при плануванні пасивного експерименту в лабораторних умовах можна стабілізувати деякі стохастичні параметри для визначення окремо функції залежності кожного керованого параметра порівняно зі стабілізованими. Далі можна встановити ряд функціональних залежностей для пошуку найкращого корегування області працездатності цільової функції.

Для пошуку найкращого значення цільової функції використовують послідовний симплексний метод, такий як метод Гаусса-Зейделя, при якому всі фактори, крім одного, по черзі фіксуються. Рухаючись паралельно одній із осей факторного простору, можна знайти найкраще для розглянутого розрізу поверхні відгуку значення параметра оптимізації. Далі, задаючись оптимальними параметрами одного фактору впливу, необхідно рухатися паралельно наступній осі факторного простору. Послідовне проходження всіх осей факторного простору становить перший цикл дослідження. Процедуру необхідно повторювати до отримання оптимуму. Поширеним недоліком проведення експерименту за цим методом є припинення роботи після виконання першого циклу.

Для оптимізації параметрів синтезу гідрозин-сирцю методом Гаусса-Зейделя необхідно провести серію експериментів з трьома умовно стабілізованими факторами впливу на процес. Розберемо питання циклів стабілізації величин в процесі синтезу гідрозин-сирцю:

1. Стабілізація сталості співвідношення вхідних компонентів сировини. Для забезпечення виконання цього параметра в умовах проведення лабораторного експерименту процес синтезу гідразин-сирцю не може бути безперервним, тому що забезпечення сталості кількісного складу стічної води виробництва карбаміду унеможливлується кінетикою процесу випарювання та конденсації пари.

Використання для синтезу гідразин-сирцю модельного розчину унеможливується особливими позитивними хімічними параметрами конденсатів сокової пари, а саме – низьким вмістом металів у стоках. Вміст розчинених у конденсаті металів, особливо міді, в рази нижчий, ніж вміст металів у бідистиляті. Як відомо, метали слугують інгібіторами синтезу гідразин-сирцю і при використанні модельного розчину амідного та амонійного азоту на основі бідистиляту необхідно додатково вводити в систему желатин або клей, котрий зв'язує метали, тим самим блокуючи процес окиснення металами новоутвореного гідразину [10].

Після проведення дослідження процесу синтезу гідразин-сирцю з конденсатів сокової пари з введенням в стоки желатину до досягнення масової концентрації в конденсаті 0,1 % вихід гідразин-сирцю знижується в середньому на 20 % масових, що за цих умов суттєво впливає на вихід гідразину та кінцевого продукту – гідразин сульфату.

Для стабілізації мольного співвідношення компонентів необхідно провести розрахунок визначення введеної кількості вхідних речовин в зону реакції та визначити кількість вхідних речовин, що необхідно подати в напірний бак з реакційною сумішшю (1), що зображено на рис. 2 в роботі [1].

2. Стабілізація температури вхідної сировини. Цей фактор впливу на систему застосовується лише при проведенні експерименту в лабораторних умовах, тому що температура конденсатів сокової пари залежить від режиму роботи конденсаторів, і на практиці забезпечити сталість цього параметра досить складно. Але за умови нагальної необхідності можна за допомогою теплообмінної апаратури забезпечити сталість цього параметра навіть при проекції схеми синтезу на виробничі масштаби.

3. Стабілізація швидкості потоку реакційної суміші в реактор синтезу гідразин-сирцю. За рахунок вспінання реакційної су-

міші в процесі змішування компонентів стабілізувати цей параметр досить складно. До того ж, вся схема синтезу гідразин-сирцю розроблена з виключенням використання насосів, процеси проходять самовільно за рахунок фізичних ефектів, таких як земне тяжіння, різниця температур, капілярний ефект. Ще потрібно враховувати той факт, що в лабораторних умовах досягти турбулентності потоку реакційної суміші за схемою синтезу гідразин-сирцю в хвильовому реакторі неможливо [1]. Звісно, регулювати подачу реакційної суміші в реактор синтезу гідразин-сирцю можна лише частково за допомогою запірної арматури, що розташована перед реактором синтезу гідразин-сирцю. Тому цей фактор впливу в плануванні експерименту є умовно стабілізованим.

Отже, маючи три умовно стабілізовані параметри синтезу, можна провести оптимізацію методом Гаусса-Зейделя. Змінним параметром у цій оптимізації стане основний вихідний параметр – концентрація новоутвореного гідразин-сирцю в реакційній суміші. Цей вихідний параметр прямо пропорційно впливає і на вихід гідразин сульфату в процесі синтезу гідразин сульфату з конденсатів сокової пари виробництва карбаміду, розглянутого в роботі [1].

Висновки. Проведено аналіз параметричної стохастичної системи синтезу гідразин-сирцю з конденсатів сокової пари виробництва карбаміду в хвильовому реакторі, після якого встановлено вектор проведення експерименту в напрямку проведення пасивного експерименту. Вибраний вектор проведення експерименту в напрямку проведення пасивного експерименту обумовлений складністю генерування точок простору вхідних параметрів цієї системи і перевірки їх належності до області працездатності.

Визначено фактори впливу на двофазну багатокомпонентну систему синтезу гідразину, що відповідають умовам працездатності системи, а саме:

- співвідношення вхідних компонентів сировини;
- температура вхідної сировини;
- швидкість потоку реакційної суміші, що надходить у реактор синтезу гідразин-сирцю.

В подальшому планується проведення експериментів зі стабілізацією визначених параметрів з метою оптимізації процесу синтезу гідразин-сирцю в хвильовому реакторі з конденсатів сокової пари виробництва карбаміду.

Список літератури

- Demchuk I. M., Stolyarenko G. S., Tupytska N. I. Recuperation of bound nitrogen by processing into hydrazine sulfate in industrial wastewater. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2016. Вип. 4. С. 114–120.
- Демчук І. М., Столяренко Г. С. Економічна оцінка ефективності впровадження технологій вторинної переробки відходів виробництва на прикладі утилізації азотвмісних стоків агрегату синтезу карбаміду. *Збірник наукових праць Черкаського державного технологічного університету. Серія: Економічні науки*. Черкаси: ЧДТУ, 2017. Вип. 48. С. 37–44.
- Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2014 році. М-во екології та природних ресурсів України. Київ, 2016. С. 52–96.
- Коровин Н. В. Гидразин. Москва: Химия, 1980. 272 с.
- Process for producing hydrazine sulfate. Patent № 4239741. Tomiya Isshiki, Tetsuo Tomita, Toshiaki Kozaki, Osamu Aoki, Mitsuo Abe, Norio Takeda, Mitsuo Miura, Yoshiyuki Aoki, Takao Kondo, Kaoru Tsuyuki. USA. Date 16.11.1980.
- Current technology for the production of hydrazine hydrate. TongJiu Hydrazine Hydrate Industry Co., Ltd. News. 2008. URL: <http://ru.hydrazine-hydrate.org/profile/News131030.html> (11.05.2018).
- Куценко С. А., Бутомо Н. В., Гребенюк А. Н. Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита Санкт-Петербург: Фолиант, 2004. 525 с.
- Богданов Н. А. Вопросы токсикологии ракетного топлива. Ленинград: Изд-во ВМА им. С. М. Кирова, 1961. 132 с.
- Абдурахманов Э. И., Саттарова М. Д. Полупроводниковый сенсор гидразина. *Вестник науки и образования. Серия: Научно-методический журнал*. 2015. Вып. 2. С. 9–13.
- Audrieth L. F., Ogg B. A. The chemistry of hydrazine. New York: Research Associate University of Illinois, 1951. 237 p.
- Воронов А. А., Ким Д. П., Лохин В. М. Теория автоматического управления: учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». Москва: Высш. шк., 1986. 504 с.
- Горошко А. В., Ройзман В. П. Параметричний синтез допусків як множинна обернена задача забезпечення працездатності складних технічних систем. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/281783876_PARAMETRICNIJ_SINTEZ_DOPUSKIV_AK_MNOZINNA_OBERNENA_ZADACA_ZABEZPECENNA_PRACEZDATNOSTI_SKLADNIH_TEHNICNIH_SISTEM (10.05.2018).

References

- Demchuk, I. M., Stolyarenko, G. S., Tupytska N. I. (2016) Recuperation of bound nitrogen by processing into hydrazine sulfate in industrial wastewater. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, (4), pp. 114–120.
- Demchuk, I. M., Stolyarenko, G. S. (2017) Economic evaluation of the efficiency of the introduction of technologies for the recycling of industrial wastes on the example of utilization of nitrogen-containing effluent of carbamide synthesis. *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Ekonomichni nauky*, (48), Cherkasy: ChDTU, pp. 37–44 [in Ukrainian].
- National report on the state of natural environment in Ukraine in 2014 (2016). Ministry of ecology and natural resources of Ukraine. Kyiv, pp. 52–96 [in Ukrainian].
- Korovin, N. V. (1980) Hydrazine. Moscow: Khimiya, 272 p. [in Russian].
- Process for producing hydrazine sulfate. Patent № 4239741. Tomiya Isshiki, Tetsuo Tomita, Toshiaki Kozaki, Osamu Aoki, Mitsuo Abe, Norio Takeda, Mitsuo Miura, Yoshiyuki Aoki, Takao Kondo, Kaoru Tsuyuki, USA. Date 16.11.1980.
- Current technology for the production of hydrazine hydrate (2008). TongJiu Hydrazine Hydrate Industry Co., Ltd. News. URL: <http://ru.hydrazine-hydrate.org/profile/News131030.html> (11.05.2018).
- Kutsenko, S. A., Butomo, N. V., Hrebenuk A. N. (2004) Military toxicology, radiobiology and medical protection. St. Petersburg: Foliant, 525 p. [in Russian].

8. Bogdanov, N. A. (1961) Issues of toxicology of rocket fuel. Leningrad: Izd-vo VMA im. S. M. Kirova, 132 p. [in Russian].
9. Abdurakhmanov, E. Y. Sattarova, M. D. (2015) Semiconductor sensor of hydrazine. *Vestnik nauki i obrazovaniya. Seriya: Nauchno-medodicheskii zhurnal*, (2), pp. 9–13 [in Russian].
10. Audrieth, L. F., Ogg, B. A. (1951) The chemistry of hydrazine. New York: Research Associate University of Illinois, 237 p.
11. Voronov, A. A., Kim, D. P., Lokhin, V. M. (1986) Theory of automatic control: text-book for universities on spec. «Automation and telemechanics». Moscow: Vyssh. shkola, 504 p. [in Russian].
12. Goroshko, A. V. Royzman, V. P. (2014) Parametric synthesis of tolerances as a multiple inverse task of ensuring the performance of complex technical systems. URL: https://www.researchgate.net/publication/281783876_PARAMETRICNIJ_SINTEZ_DOPUSKIV_AK_MNOZINNA_OBERNENA_ZADACA_ZABEZPECENNIA_PRACEZDATNOSTI_SKLADNIH_TEHNICNIH_SISTEM (10.05.2018).

I. M. Demchuk, a graduate student,

e-mail: ivannademcuk19@gmail.com

G. S. Stolyarenko, PhD, professor

e-mail: radikal@ukr.net

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

ANALYSIS OF PARAMETRIC STOCHASTIC SYSTEM OF THE SYNTHESIS OF HYDRAZINE FROM SECONDARY RAW MATERIALS IN WAVE REACTOR

In this paper, the synthesis of hydrazine in a wave reactor from the point of view of mathematical modeling is considered. Synthesis of hydrazine is the main stage in the synthesis of hydrazine sulfate from secondary raw materials, namely the condensate of steam formed as a result of carbamide synthesis unit. Existing methods of the synthesis of hydrazine and its derivatives from different raw materials are considered. The relevance of conducting research on the synthesis of hydrazine from secondary raw materials is analyzed. The hydrazine synthesis process has been identified as a complex parametric stochastic process. The factors influencing the process of the synthesis of hydrazine, which correspond to working conditions of the system of hydrazine synthesis from condensates of juice carbamide production steam, are considered. The methods of experiment planning are proposed. An optimally possible vector of conducting an experiment in the direction of a passive experiment is established.

Keywords: hydrazine, steam condensate, stochastic system, wave reactor, factor of influence.

Дієго Фернандо Сепеда Гуаман

e-mail: ferchoevol2@hotmail.com

Університет економіки та права «КРОК»
вул. Табірна, 30-32, м. Київ, 03113, Україна

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНИМИ ПРОЕКТАМИ У СФЕРІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЛІТАКІВ

Розвиток літакобудування потребує постійного удосконалення системи технічного обслуговування літаків після їх введення в експлуатацію, яке має відповідати міжнародним нормам, вимогам та стандартам. Можливість своєчасного надання послуг у сфері обслуговування літаків повинна забезпечувати у подальшому якість транспортних послуг. На сьогоднішній день у світі існує проблема надання технічного обслуговування літаків поза межами заводів-виробників, тому є необхідність у створенні нових підприємств, які будуть надавати ці послуги в аеропортах та на спеціально обладнаних майданчиках поза їх межами. У статті проаналізовано процес створення нового підприємства, наведено дослідження застосування проектного підходу до реалізації організаційних проектів у сфері обслуговування літаків, виявлено особливості цих проектів, наведено їх класифікацію, проаналізовано проблеми з людським ресурсом, які можуть знищити ідею реалізації цих проектів, а також ідентифіковано ризики, що мають вплив на ці проекти.

Ключові слова: проектний підхід, організаційні проекти, літакобудування, технічне обслуговування літаків, особливості, класифікація, поведінкова економіка, компетентнісний підхід, ризики, ідентифікація.

Постановка проблеми. Сучасний стан розвитку транспортної та туристичної галузей потребує великої кількості літаків для забезпечення своїх потреб, тому авіаційна галузь повинна постійно розвиватися та удосконалюватися. Але не тільки літакобудування є важливою складовою цього процесу, а ще необхідно брати до уваги й технічне обслуговування літаків після їх введення в експлуатацію. Своєчасне та якісне технічне обслуговування може дати змогу забезпечити надання транспортних послуг на належному рівні. Тому застосування проектного підходу є необхідним інструментом не тільки у літакобудуванні, а й у технічному обслуговуванні літаків.

Аналіз останніх досліджень. Застосування проектного підходу в усіх сферах діяльності людини розглядалося у роботах багатьох науковців, зокрема Бушуєва С. Д., Кошкіна К. В., Гогунського В. Д., Кононенка І. В., Рача В. А., Теслі Ю. М., Чернова С. К., Чумаченка І. В., Данченко О. Б., Колеснікової К. В.

Крім того, науковцями у галузі літакобудування проводилися наступні дослідження, зокрема: Дружиніним Є. А. було запропоновано ризик-орієнтований підхід до управління ресурсами проектів і програм розвитку

техніки [1]; Бабак І. М. проведено аналіз проектів з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків факторів ризику; Крахмальовою Т. І. запропоновано управління інтелектуальною власністю у проектах створення авіаційної техніки; Погудіною О. К. розглянуто формування і контроль в управлінні якістю і змістом проектів створення складної техніки; Слядневим О. В. запропоновано управління проектами створення модифікації пасажирських і транспортних літаків в умовах ринкової економіки; Яшиною О. С. проведено моделювання динаміки фінансування проектів та програм створення нової техніки на основі детермінованого та імовірнісного подання; Емадом А. Абдуль Рета розглянуто управління програмою розвитку авіаційної техніки [2]; Ченарані Алі Мохаммадом запропоновано управління ризиками проектів створення авіаційної техніки на основі оцінки невизначеності [3].

Також є роботи, що присвячені розвитку систем управління підприємством, зокрема розвитку виробництва авіабудівної галузі, наприклад: Малєєвої О. В. – в частині проведення системного аналізу якості проектів та програм розвитку виробництва [4]; Бе-

гун А. П. – сформовано портфель проектів на основі аналізу стратегій діяльності підприємства; Горлова Д. О. – проведено комплексне оцінювання багаторівневих структур управління проектами; Латкіна М. О. – створено систему управління ризиками проектів підприємства [5]; Мазорчук М. С. – змодельовано розвиток виробництва з урахуванням залучення додаткових інвестицій; Балашова В. Г., Заложнева О. Ю., Новікова Д. О. – розглянуто створення нового підприємства будь-якої сфери діяльності [6]; Пурського О. І., Харченка О. А., Василевської А. О. – запропоновано нову систему управління торговельним підприємством [7].

Із проведеного аналізу наведених вище наукових праць видно, що на сьогоднішній день залишається поза увагою науковців питання реалізації проектів у сфері обслуговування літаків.

Метою статті є виявлення особливостей управління організаційними проектами у сфері обслуговування літаків.

Виклад основного матеріалу. Перед тим, як приступити до створення нового бізнесу, зокрема у сфері обслуговування літальної техніки, людина або група людей ставить перед собою такі питання, як: що вони можуть та хочуть створити; які є для цього законодавчі підстави [8]. Крім того, для організації бізнесу необхідні кошти, статутний капітал, приміщення, а вже для провадження господарської діяльності – виробничі потужності, обладнання, відповідна технологія, підготовлені виробничі кадри тощо. Важливу роль відіграють результати вивчення ринку: попит і пропозиція, ціна продукту, що планується поставляти, стан конкурентів, можливість забезпечення виробництва продукту необхідними матеріальними ресурсами. Як наслідок підготовки до створення бізнесу слід визначитись, який буде прибуток за умови, що продукт буде конкурентоспроможним і користуватиметься попитом на ринку. Після визначення того, чим планують займатися підприємець або організація, наступним кроком буде обрання прийнятного виду бізнесу: власна справа чи товариство (партнерство) [7]. Відповідно до чинного законодавства суб'єкт господарювання може бути утворений за рішенням власника (власників) майна або уповноваженого ним (ними) органу, а у випадках, спеціально передбачених законодавством,

також за рішенням інших органів, організацій і громадян шляхом заснування нового суб'єкта господарювання із додержанням вимог законодавства [7, 8].

У випадках, коли для створення і діяльності підприємства потрібні природні ресурси, дозвіл на їх використання видається відповідно до чинного законодавства за поданням первинного природокористувача і при наявності позитивного висновку державної екологічної експертизи [8].

Підприємству також може бути передана у колективну власність або надана у користування, зокрема на умовах оренди, земельна ділянка в порядку, встановленому земельним законодавством країни [8].

Ще одним фактором для створення нового бізнесу є формування статутного капіталу, який може включати в себе фінансові ресурси у вигляді грошових коштів або вкладень у майно, цінності, нематеріальні активи, цінні папери, закріплені за підприємством на праві власності або повного господарського відання. За рахунок статутного капіталу підприємство формує власні основні та оборотні фонди (кошти) [7, 8]. Новий бізнес набуває прав юридичної особи від дня його державної реєстрації.

Отже, створення будь-якого підприємства, зокрема у сфері обслуговування літальної техніки, на сьогоднішній день потребує суттєвого внеску людських, фінансових та матеріальних ресурсів. Крім того, недосконалість нормативно-правової бази та людський фактор стають вагомими перешкодами на шляху їх створення.

Застосування методології управління проектами у літакобудуванні надало можливість використовувати новітні інструменти для підвищення ефективності управління такими проектами [1, 3]. Тому, зважаючи на те, що основними компаніями, які здійснюють сервісне обслуговування літальної техніки, є їх заводи-виробники чи їх представники [9], виникає необхідність створення нових підприємств із надання послуг з обслуговування літаків, які можна здійснювати при аеропортах та поза їх межами.

Відповідно до сучасної класифікації проектів [1, 3, 10], зокрема за таким критерієм, як сфера діяльності, проекти ділять на промислові, інноваційні, організаційні, економічні та соціальні (табл. 1).

Таблиця 1

Види проектів за критерієм «сфера діяльності»

Найменування проектів	Характеристика проектів
Промислові	Спрямовані на випуск та продаж нових продуктів, удосконалення технологій, розширення виробництва тощо
Інноваційні	Зосереджені на науково-дослідній діяльності, розробці програмних засобів опрацювання інформації, створенні нових матеріалів, технологій, конструкцій тощо
Організаційні	Націлені на реформування системи управління, створення нової організації, реструктуризацію тощо
Економічні	Мають на меті приватизацію державних підприємств, розвиток ринку капіталів, реформування системи оподаткування та інші макроекономічні перетворення
Соціальні	Пов'язані з реформуванням системи управління, створенням системи соціального захисту, охороною здоров'я, подоланням наслідків природних, екологічних та соціальних потрясінь та іншими чинниками соціального характеру

Виходячи з даних, наведених у табл. 1, можна дійти висновку, що проект створення нового підприємства із надання послуг з технічного обслуговування літаків з метою забезпечення ефективності їх експлуатації є організаційним.

Відповідно до методології управління проектами [10] кожний проект повинен мати певні характеристики:

- цільовий, тобто вся діяльність спрямована на досягнення певних результатів;

- унікальний, тобто проект повинен породжувати унікальні результати, інакше виробництво стає серійним;

- часовий, тобто будь-який проект має чітко визначений час виконання;

- послідовний, тобто мати певну послідовність виконання етапів проекту;

- обмеженість ресурсів.

Наведемо основні характерні риси організаційних проектів у сфері обслуговування літаків та представимо їх у вигляді табл. 2.

Таблиця 2

Характерні риси організаційних проектів у сфері обслуговування літаків

Ознака	Опис ознаки проекту
Мета	Створення нового підприємства із надання послуг з технічного обслуговування літаків з метою забезпечення ефективності їх експлуатації
Унікальність	У світі немає підприємств, які б надавали тільки послуги із технічного обслуговування літаків
Тимчасовість	За певний проміжок часу від початку до кінця проекту буде створено нове підприємство
Послідовність	Мають певний порядок виконання робіт, тобто без завершення одного етапу перейти до наступного немає змоги
Обмеженість ресурсів	Необхідний значний обсяг фінансових ресурсів (від кількох до десятків мільйонів доларів США), наявність кваліфікованого та підготовленого персоналу (для обслуговування певного класу повітряних суден); наявність матеріалів, зокрема деталей, для обслуговування певного виду літака; інфраструктура; наявність актуальної технічної інформації та необхідні документи (дозволи, сертифікати тощо)

Основними етапами життєвого циклу організаційного проекту у сфері обслуговування літаків є:

- реєстрація нового підприємства;
- отримання та оформлення земельної ділянки;
- будівництво приміщень (ангарів, службових приміщень тощо);

- закупівля обладнання для технічного обслуговування, офісного устаткування тощо;
- налагодження обладнання;
- введення до експлуатації об'єкта будівництва та технологічного комплексу.

Виходячи з особливостей організаційних проектів у сфері обслуговування літаків, їх можна класифікувати за наступними ознаками (табл. 3).

Таблиця 3

Класифікація організаційних проектів у сфері обслуговування літаків

Критерій класифікації	Обґрунтування
За сферою діяльності	Організаційні, що полягають у створенні нового підприємства
За складом, структурою та предметною галуззю проекту	Монопроекти, які мають на меті створення нового підприємства у сфері обслуговування літаків
За масштабами проекту	Малі, які мають капіталовкладення на рівні до 10-15 млн. доларів США
За характером предметної галузі	Інноваційні, тому що головною їх метою є створення підприємства, яке вийде на ринок авіаційної галуззі з новою послугою
За тривалістю проекту	Короткострокові, що будуть реалізовані протягом трьох років
За характером проекту/рівнем учасників	Змішані, тому що в реалізації цих проектів зацікавлені як іноземні замовники, так і вітчизняні
За джерелами фінансування проекту	Змішані у зв'язку з тим, що вартість проекту є дуже значною і потребує великого обсягу інвестицій, та можуть фінансуватися коштами як іноземних замовників, так і вітчизняних

Однією з головних проблем сьогодення, зокрема при створенні нового бізнесу, є поведінка людини, тому що цей фактор є одним із важливих і може допомогти або знищити ідею проекту. Тому науковці у своїх роботах сьогодні піднімають багато питань і розглядають проблеми, що виникають саме від діяльності або бездіяльності людини.

Зокрема, у роботах [11, 12] на підставі аналізу основних аспектів поведінкової економіки було виявлено найзначніші поведінкові аномалії діяльності людини та розроблено рекомендації щодо їх урахування при прийнятті ефективних управлінських рішень.

До основних причин неефективної та неестичної поведінки людини можна віднести наступні [12]: приховані настанови, переваги представників своїх груп, схильність переоцінювати свої досягнення, перфекціонізм, конфлікт інтересів, керуюча програма.

Ще однією з проблем поведінки людини є рівень її компетентності, тому в роботі [13] було розроблено модель, за якою компе-

тентнісний підхід набуває вагомого значення при прийнятті ефективних управлінських рішень у будь-якій галузі, зокрема й в управлінні проектами. У подальших роботах [14, 15] науковцями були розроблені рекомендації та способи для його застосування у процесі реалізації проектів.

Виходячи з наведених вище особливостей організаційних проектів у сфері обслуговування літаків, менеджерам цих проектів необхідно дуже ретельно підходити до розгляду проектів рішень, що виносяться на обговорення, та їх обґрунтувань. Слід, у першу чергу, пам'ятати про поведінку людини, тому що неправильно обґрунтоване та прийняте рішення може значно погіршити умови реалізації проекту. Крім того, в умовах обмеженості людських та фінансових ресурсів керівнику проекту необхідно звертати увагу на підвищення кваліфікації виконавців з метою забезпечення постійного розвинення особистості, підвищення компетентності та отримання нових навичок і вмінь.

Для організаційних проектів у сфері обслуговування літаків, зокрема при роботі із внутрішніми та зовнішніми людськими ресурсами, важливе значення має застосування вже розроблених, а також вироблення нових стратегій в умовах поведінкової економіки та застосування компетентнісного підходу.

Крім того, під час планування та реалізації організаційних проектів у сфері обслуговування літаків менеджери та їх команди можуть стикатися із настанням ризиків.

Основним етапом оцінювання ризиків є їх ідентифікація, яка полягає у тому, що керівник проекту та його команда повинні описати й охарактеризувати всі можливі ризики [1, 3, 10]. Ідентифікація ризику є не однократною подією, тому вона має здійснюватися постійно протягом усього процесу виконання робіт у рамках реалізації проекту.

Ідентифікація ризиків повинна враховувати як внутрішні, так і зовнішні ризики [1, 3, 10]. До внутрішніх ризиків відносяться події, які команда проекту може контролювати або на які може впливати. Зовнішні ризики – це події, які перебувають поза контролем або поза впливом команди проекту.

В процесі створення будь-якого бізнесу існує вплив таких факторів: взаємозв'язок та взаємовплив із зовнішнім середовищем (економічне, політичне, екологічне, соціальне, культурне оточення); високий ступінь невизначеності; організаційні перебудови; помилки планування та ціноутворення; недостатнє та несвоєчасне надходження фінансових та матеріальних ресурсів; недостатня кількість кваліфікованих кадрів.

До ризиків, які можуть виникати при реалізації організаційних проектів у сфері обслуговування літаків, можна віднести такі:

- кадровий ризик – пов'язаний із виникненням організаційних проблем у процесі формування команди проекту та реалізації самого проекту;

- поведінковий ризик – пов'язаний із бездіяльністю чиновників, їх халатним ставленням до роботи або їх перепонами, від яких залежить якість надання відповідних дій;

- ризик планування – пов'язаний із помилками планування проекту, а також із невизначеністю та недостатнім обсягом інформації про джерела фінансування проекту;

- ризик фінансування проекту – пов'язаний із недостатнім загальним обсягом фінансових ресурсів, що необхідні для реалізації проекту; несвоєчасним надходженням фінансових ресурсів із окремих джерел; недосконалістю структури джерел формування позикових фінансових коштів;

- ризик підрядника – пов'язаний із можливістю виникнення проблем під час виконання робіт та послуг, що надаються зі сторони;

- ризик постачання – пов'язаний із можливістю виникнення проблем під час постачання товарів, що закуповуються зі сторони;

- технічний/матеріальний ризик – характеризується невідповідністю обладнання та сировини, офісного устаткування для створення продукту проекту;

- інфляційний ризик – характеризується можливістю знецінення реальної вартості проекту в умовах інфляції, в сучасних умовах має постійний характер і супроводжує практично всі фінансові операції, пов'язані з реалізацією проекту;

- податковий ризик – має ряд проявів, таких як ймовірність введення нових видів податків і зборів на здійснення окремих видів діяльності; можливість збільшення рівня ставок чинних податків і зборів; зміна строків і умов здійснення окремих податкових платежів; ймовірність скасування чинних податкових пільг у сфері діяльності підприємства;

- політичний ризик – проявляється у вигляді внесення змін до чинного законодавства України стосовно сфери літакобудування та обслуговування літаків.

Прояв зазначених ризиків може призвести до порушення строків реалізації організаційних проектів у сфері обслуговування літаків, перевитрати коштів, невиконання вимог до кінцевого результату, що, в свою чергу, призводить до зменшення прибутку, а нерідко й до великих збитків.

Висновки. У статті проаналізовано застосування проектного підходу до сфери обслуговування літальних апаратів. Виявлено, що проекти у сфері обслуговування літаків є організаційними у зв'язку з тим, що цей науковий напрямок управління проектами авіаційної галузі представлений тільки заводами-виробниками та потребує створення нових підприємств. Крім того, виявлено особливості організаційних проектів у сфері обслугову-

вання літаків, наведено їх класифікацію, проаналізовано проблеми, які можуть завадити реалізації цих проектів від самого початку, а також ідентифіковано ризики, що мають вплив на ці проекти.

За результатами дослідження можна зробити висновок, що розроблення моделей та методів управління організаційними проектами у сфері обслуговування літаків є актуальним та потребує подальшого розвитку.

Список літератури

1. Дружинин Е. А. Методологические основы риск-ориентированного подхода к управлению ресурсами проектов и программ развития техники: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.13.22 – управление проектами и программами. Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т». Харьков, 2006. 37 с.
2. Емад А. Абдуль Рета. Методологічні основи формування, аналізу та управління програмою розвитку авіаційної техніки: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.13.22 – управління проектами та програмами. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків, 2006. 36 с.
3. Ченарані А. М. Моделі і методи управління ризиками при створенні авіаційної техніки на основі оцінки невизначеності: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.22 – управління проектами та програмами. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків, 2017. 185 с.
4. Малєєва О. В. Методологічні основи системного аналізу якості проектів та програм розвитку виробництва: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.22 – управління проектами та розвиток виробництва. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків, 2003. 36 с.
5. Латкін М. О. Методологічні основи створення системи управління ризиками проектів підприємства: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.22 – управління проектами та програмами. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т». Харків, 2008. 38 с.
6. Балашов В. Г., Заложнев А. Ю., Новиков Д. А. Механизмы управления организационными проектами. Москва: ИПУ РАН, 2003. 84 с.

7. Пурський О. І., Харченко О. А., Василевська А. О. Система управління проектами торговельного підприємства. *Управління розвитком складних систем*: зб. наук. праць. № 10. Київ: КНУБА, 2012. С. 78–82.
8. Бізнес портал. Все про планування своєї справи: від ідеї до відкриття бізнесу. URL: <https://biznes-plan.com.ua/> (дата звернення: 24.07.2018).
9. Required Aircraft Inspections. URL: <http://www.aviation-safety-bureau.com/aircraft-inspections.html> (дата звернення: 24.07.2018).
10. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). Sixth ed. USA, PMI, 2017. 756 p.
11. Яковлева Е. А. Поведенческая экономика как область научного знания в современной экономической науке. *Journal of economic regulation (Вопросы регулирования экономики)*. Т. 5, № 2. Ростов-на-Дону: Гуманитарные перспективы, 2014. С. 62–69.
12. Яковлева Е. А. Анализ возможностей использования принципов поведенческой экономики для принятия эффективных управленческих решений. *Современные технологии управления*. № 5 (65). Номер статьи: 6504. Дата публикации: 2016-05-17. URL: <https://sovman.ru/article/6504/> (дата обращения: 24.07.2018).
13. IPMA Organisational Competence Baseline (IPMA OCB). IPMA, 2013. 67 p. doi.org/10.1108/ijmpb-10-2013-0049.
14. Bushuyev S. D., Bushuev D. A., Jaroshenko R. F. Organization development projects management driving by entrepreneurship energy. *Serbian Project Management Journal*. 2016. Vol. 6, iss. 2. P. 12–16.
15. Бушуєв С. Д., Бушуєв Д. А., Ярошенко Р. Ф. Проривні компетенції в управлінні інноваційними проектами та програмами. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. № 1 (1277). Харків: НТУ «ХПІ», 2018. С. 3–9. doi: 10.20998/2413-3000.2018.1277.1.

References

1. Druzhinin, E. A. (2006) Methodological bases of the risk-oriented approach to resource management of projects and programs for the development of technology: avtoref. of dissertation [Metodologicheskiye osnovy risk-oriyentirovannogo podkhoda k upravleniyu

- resursami projektov i programm razvitiya tekhniki: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk], Khar'kov, 37 p. [in Russian].
2. Emad, A. Abdul Reta (2006) Methodological bases for the development, analysis and management of the program of awareness development: avtoref. of dissertation [Metodolohichni osnovy formyvannya, analizu ta upravlinnya prohramoyu rozvytku aviatsiynoyi tekhniki: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk], Kharkiv, 36 p. [in Ukrainian].
 3. Chenarani, A. M. (2017) Models and methods of risk management in the creation of aviation engineering on the basis of estimation of uncertainty: dissertation [Modeli i metody upravlinnya ryzykamy pry stvorenni aviatsiynoyi tekhniki na osnovi otsinky nevyznachenosti: dis. ... kand. tekhn. nauk], Kharkiv, 185 p. [in Ukrainian].
 4. Malieva, O. V. (2003) Methodological basis of system analysis of quality of projects and development programs: avtoref. of dissertation [Metodolohichni osnovy systemnoho analizu yakosti proektiv ta prohram rozvytku vyrobnytstva: avtoref. dis... d-ra tekhn. nauk], Kharkiv, 36 p. [in Ukrainian].
 5. Latkin, M. O. (2008) Methodological foundations of creating a system of risk management projects enterprise [Metodolohichni osnovy stvorennya systemy upravlinnya ryzykamy proektiv pidpryyemstva: avtoref. dis... d-ra tekhn. nauk], Kharkiv, 38 p. [in Ukrainian].
 6. Balashov, V. G., Zalozhnev, A. Yu. and Novikov, D. A. (2003) Mechanisms of management of organizational projects [Mekhanizmy upravleniya organizatsionnymi proyektami], IPP RAS, Moscow, 84 p. [in Russian].
 7. Purs'kyy, O. I., Kharchenko, O. A. and Vasylevs'ka, A. O. (2012) System of project management of trade enterprise. *Upravlinnya rozvytkom skladnykh system: zb. nauk. prats.* Vol. 10, pp. 78–82 [in Ukrainian].
 8. Business portal. All about planning your business: from idea to business opening (2018). URL: <https://biznes-plan.com.ua/> (accessed 24 July 2018).
 9. Required Aircraft Inspections (2018). URL: <http://www.aviation-safety-bureau.com/aircraft-inspections.html> (accessed 24 July 2018).
 10. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (2017). Sixth ed. USA, PMI, 756 p.
 11. Yakovleva, E. A. (2014) Behavioral economics as a field of scientific knowledge in modern economics. *Journal of economic regulation*, Vol. 5, No. 2, pp. 62–69 [in Russian].
 12. Yakovleva, E. A. (2016) Analysis of the possibilities of using the principles of the behavioral economy for making effective managerial decisions. *Sovremennyye tekhnologiyi upravleniya*, Vol. 5, No. 65. Available at: <https://sovman.ru/article/6504/> (accessed 24 July 2018) [in Russian].
 13. IPMA Organisational Competence Baseline (IPMA OCB) (2013). IPMA, 67 p. doi.org/10.1108/ijmpb-10-2013-0049.
 14. Bushuyev, S. D., Bushuev, D. A. and Jaroshenko, R. F. (2016) Organization development projects management driving by entrepreneurship energy. *Serbian Project Management Journal*, Vol. 6, iss. 2, pp. 12–16.
 15. Bushuyev, S. D., Bushuyev, D. A. and Yaroshenko, R. F. (2018) Breakthrough competences in the management of innovative projects and programs. *Visnyk NTU «KHPI». Seriya: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proyektamy*, Vol. 1, No. 1277, pp. 3–9. doi: 10.20998 / 2413-3000.2018.1277.1.

Diego Fernando Cepeda Guaman

e-mail: ferchoevol2@hotmail.com

University of economy and law “KROK”

30-32, Tabirna str., Kyiv, 03113, Ukraine

FEATURES OF MANAGEMENT BY ORGANIZATIONAL PROJECTS IN THE FIELD OF AIRCRAFT MAINTENANCE

The current state of the development of aircraft industry requires continuous improvement of the scope of provision of maintenance services for airplanes after their commissioning, which must comply with international regulations, requirements and standards. The timely provision of services in

the field of aircraft maintenance should ensure the quality of transport services in the future. This can be achieved by implementing a project approach not only in aircraft engineering, but also in the field of aircraft maintenance.

The aim of the work is to identify the features of management by organizational projects in the field of aircraft maintenance.

Today, in the world, there is a problem of airplanes maintenance outside the factories, so there is a need for the creation of new companies that will provide these services at airports and on specially equipped areas outside of them.

The article analyzes the process of creating a new enterprise, examines the application of the project approach to the implementation of organizational projects in the field of aircraft maintenance, identifies the features of these projects, describes their classification, analyzes problems with human resources that can destroy the idea of these projects, as well as identified risks, which have an impact on these projects.

According to the results of this study, it can be concluded that the development of models and methods for managing organizational projects in the field of aircraft maintenance is relevant and requires further development.

Keywords: *project approach, organizational projects, aircraft engineering, aircraft maintenance, features, classification, behavioral economy, competence approach, risks, identification.*

Ю. М. Кузьмінська, директор Вищої школи управління
e-mail: jkuzminskaya@gmail.com

Вищий навчальний заклад «Міжрегіональна Академія управління персоналом»
вул. Фрометівська, 2, м. Київ, 03039, Україна

МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ КРЕАТИВНІСТЮ ТА РИЗИКАМИ КОМАНД ОСВІТНІХ ПРОЕКТІВ У СФЕРІ ПІДВИЩЕННЯ КВАЛІФІКАЦІЇ

У статті наведено та охарактеризовано параметри креативності управління освітніми проектами та ризики, пов'язані з людьми, що мають значний вплив на успіх проекту. Автором пропонується використати за аналогією підходи щодо огранювання діамантів у проектному менеджменті на прикладі освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації та встановлено взаємозв'язок ризиків проекту з креативністю команди проекту. Саме глибокий всебічний аналіз цих аспектів доводить актуальність та вказує на шляхи усунення ризиків, що можуть вплинути на успіх освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації, в процесі управління його командою.

Ключові слова: освітній проект, підвищення кваліфікації, команда проекту, управління, креативність, ризики освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації.

Постановка проблеми. Хоча останні 10-15 років заклади вищої освіти впроваджують у свою діяльність проектний менеджмент, але до управління освітніми проектами у сфері підвищення кваліфікації продовжують використовувати досить застарілі підходи, часто переносючи досвід організації та управління навчанням зі студентами з сфери вищої освіти на сферу підвищення кваліфікації, що не є логічним та правильним. Ці підходи вимагають удосконалення існуючого досвіду й адаптації проектно-орієнтованого управління освітніми проектами в сфері підвищення кваліфікації, тому що організація освіти для дорослих має суттєві відмінності від організації навчання дітей та студентів.

Проблема впливу різних негативних факторів, у тому числі й ризиків, актуальна і в управлінні освітніми проектами у сфері підвищення кваліфікації.

Освітній проект у сфері підвищення кваліфікації – це проект, що реалізується в галузі вищої освіти, результатом якого є набуті особою нові та/або вдосконалені раніше набуті компетентності у межах професійної діяльності або галузі знань, і щодо якого чітко визначено ціль та базові обмеження: зміст, час, вартість, якість, ризики, ресурси [1]. До таких освітніх проектів відносяться: професійні курси, курси цільового призначення, семінари, тренінги, майстер-класи, окремі модулі та дисципліни на курсах підвищення кваліфікації, актуальні питання й теми тощо.

Всі вони є типовими проектами, основним фактором впливу на успішний кінцевий результат яких є людський фактор.

Практика управління освітніми проектами у сфері підвищення кваліфікації – це обов'язкова функція проектного менеджера, тому що освітні проекти також завжди мають фактичні додаткові втрати часу, фінансів та якості порівняно з планом. У команду освітнього проекту входять не лише керівник проекту (керівник підрозділу) та координатор (менеджер) проекту, а й група викладачів, при роботі з якими через високу креативність деяких із них існує ризик незавершеності проекту або навіть його зриву. Тому в таких освітніх проектах важливо зменшувати організаційні ризики і збільшувати креативність членів команди проекту таким чином і у таких співвідношеннях, щоб отримати успішний проект з мінімальними втратами.

Аналіз останніх досліджень. Освітня галузь з точки зору застосування методології управління проектами та програмами вже досить досліджена: є багато робіт, які присвячуються застосуванню методології управління проектами як в цілому до вищої освіти, так і до окремих аспектів діяльності закладів вищої освіти. Так, у роботі Оберемка І. І. пропонуються методи та засоби проектно-орієнтованого управління у вищих навчальних закладах [2], дослідження Ляковського В. П. присвячені розробці моделей, методів і алгоритмів побудови проектів систем органі-

заційного управління вищого навчального закладу [3], в роботі Коляди О. П. виявлено проблему інтеграції методологічних положень управління проектами та стратегічного управління розвитком вищого навчального закладу [4], Рулікова Н. С. у своїй роботі досліджувала специфіку управління інноваційними проектами вищого навчального закладу [5] тощо.

В [6] Блінцов В. С. розглядає особливості застосування методології управління проектами до модернізації вищої освіти, класифікація освітніх проектів розкрита Животовою Т. П. в [7]. Окремі процеси управління проектами стосовно управління якості в освітніх проектах досліджені Борзенко-Мірошніченко А. Ю. в [8]. Однак на сьогодні недостатньо вивчені освітні проекти саме у сфері підвищення кваліфікації.

Підготовку фахівців високої кваліфікації – креативних, із належними компетенціями і унікальними особистісними якостями – здавна порівнювали з огранюванням діаманта. Проект із його характеристиками також можна розглядати крізь призму огранювання.

Метою статті є формулювання концептуальних засад моделі управління креативністю та ризиками команд освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації.

Виклад основного матеріалу. Ризик – невизначена подія або кілька подій, які, якщо відбудуться, вплинуть на досягнення цілей. Причинами негативних відхилень у проекті можуть бути тільки ті ризики, які негативно можуть позначитися на цілях проекту. Ризики, що пов'язані з людьми, тобто «людські фактори», є найважливішими в управлінні освітніми проектами, тому потребують більш уважного вивчення в контексті нашої проблеми.

До ризиків, які найчастіше виникають в освітніх проектах у сфері підвищення кваліфікації, відносяться такі ризики, як організаційний ризик (R1), кадровий ризик (R2), ризик плинності кадрів (R3), ризик недостатньої кваліфікації персоналу (R4), ризик помилки (R5), ризик менеджменту (R6), методичний ризик (R7). Ці ризики найбільше пов'язані з управлінням командою освітнього проекту.

Наведемо характеристику виділених ризиків, що мають вплив на процеси реалізації освітніх проектів саме у сфері підвищення кваліфікації:

- організаційний ризик (R1) пов'язаний з неефективною організацією роботи команди проекту: протягом календарного року таких

проектів може реалізовуватися велика кількість, одні з яких є короткостроковими, а інші – довгостроковими; всі вони проходять або паралельно, або один за одним – безперервно, а отже, керівник усіх цих проектів одночасно веде їх управління, що є досить складним;

- кадровий ризик (R2) пов'язаний зі зривами в роботі викладачів, тренерів, лекторів: тривалі чи часті хвороби; постійні запізнення; невміння правильно планувати власний час, за умови участі у декількох освітніх проектах одночасно; звільнення;

- ризик плинності кадрів (R3) пов'язаний із частою заміною членів команди проекту – викладачів, тренерів, лекторів, що викладають одні й ті ж дисципліни: в зв'язку чи з особистими проблемами, чи проханням слухачів замінити викладача під час одного курсу можуть відбуватися заміни членів команди проекту, що негативно впливає на сприйняття матеріалу слухачами, яким необхідний час для адаптації з новим викладачем, лектором чи тренером;

- ризик недостатньої кваліфікації персоналу (R4) пов'язаний з компетентністю членів команди проекту – викладачів, тренерів, лекторів: непрофесійність викладачів, невідповідність до занять, неслідкування за актуальністю, законодавчими та нормативними актами щодо своєї сфери викладання, невідповідність методичних матеріалів, презентацій тощо;

- ризик помилки (R5) пов'язаний з допущенням помилок при плануванні проекту: керівник проекту та/чи координатор проекту, які можуть ненавмисно щось плутати чи забувати, помилятися;

- ризик менеджменту (R6) – слабка підтримка проекту з боку вищого керівництва, низька ефективність прийнятих управлінських рішень: незацікавленість керівництва в розвитку даного напрямку в закладі освіти або навпаки – надмірний контроль; «бюрократична» система; відсутність прямого діалогу з вищим керівництвом, що унеможливає правильне донесення інформації;

- методичний ризик (R7) пов'язаний з недостатньою ефективністю сформованої програми навчання: нелогічно складена навчальна програма, неохоплені всі необхідні питання й теми; мало практичних занять та завдань для закріплення теоретичного матеріалу.

В свою чергу, для досягнення успіху при управлінні освітнім проектом у сфері

підвищення кваліфікації необхідно використовувати креативні технології [9].

Виділимо параметри креативності, які використовувалися для оцінювання креативності членів команди освітнього проекту [10], та опишемо їх відносно сфери підвищення кваліфікації (табл. 1).

Оскільки ризики таких освітніх проектів саме завдяки своїй високій ймовірності до виникнення в поєднанні з високими показниками креативності команди проекту можуть завадити завершеності проекту, виникає необхідність розглядати управління освітнім проектом під новим нестандартним кутом, з урахуванням компетентнісного підходу і напрацювань андрагогіки. Пропонується провести паралелі між основними показниками, що впливають на оцінку дорогоцінного каміння (діаманта) та критеріями успішності проекту, а отже й управління освітнім проектом у сфері підвищення кваліфікації можна порівняти з огранюванням діаманта.

Так, наприклад, для експертного оцінювання діаманта враховуються чотири обов'язкові критерії, що одержали назву «4С» (рис. 1).

Чистота (C)	Огранка (C)
4C	
Вага (C)	Колір (C)

Рис. 1. Система оцінювання діамантів «4С»

Перший параметр – carat weight (вага каменю): загальноприйнятою мірою каменю є карат, що дорівнює 0,2 г.

Другий – color (колір): діаманти на перший погляд здаються абсолютно прозорими, але насправді їх відтінки розрізняються.

Третій параметр – clarity (чистота): чистота мінералу визначається наявністю в його складі включень, а також їх особливостями.

Четвертий параметр – cut (розріз): огранювання діаманта.

Саме ці показники є основою для визначення якості діаманта і, відповідно, вартості всього виробу.

Подібним чином визначено критерії успішності проекту, перші чотири з яких відповідають «магічному» чотирикутнику цілей управління проектами (рис. 2).

Якість (Q)	Зміст (C)
УСПІХ ПРОЕКТУ	
Вартість (C)	Час (T)

Рис. 2. Критерії успішності проекту

Обмеження на вартість, тривалість, якість проекту визначає замовник, зміст проекту також визначений і обмежений і відповідає запланованому продукту, за допомогою якого повинні бути досягнуті поставлені цілі проекту.

Під час досліджень було виявлено спільні риси проектного менеджменту з оцінкою діаманта, що дало змогу провести такі аналогії:

- якість = чистота (Q – C) – чим чистіший камінь та чим менше в ньому включень, тим він якісніший, як у проекті – чим «чистіше», правильніше та точніше управління, без зривів та проблем, тим успішніший проект;

- зміст = огранювання (C – C) – від того, як іде управління командою проекту, тобто його «огранювання», залежить зміст проекту (якої форми набуде діамант), тобто форма діаманта й є командою проекту, вид огранювання – метод управління нею;

- час = колір (T – C) – час та колір виступають як обмеження, за рамки яких краще не виходити;

- вартість = вага (C – C) – вартість діаманта залежить від його ваги та розміру (кількості каратів), так само як і проект – чим більше необхідно виділити коштів на реалізацію проекту, тим він буде дорожчим та масштабнішим.

Виявлений зв'язок наштовхнув автора на думку використати характеристику огранювання круглого, невеликого діаманта в управлінні освітнім проектом та провести порівняльний аналіз освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації з огранюванням «single cut», яке має індекс «КР-17» (табл. 2).

Таблиця 1

**Опис параметрів креативності членів команди освітнього проекту
у сфері підвищення кваліфікації**

Код. номер параметра	Назва параметра	Оцінюваний параметр креативності	Опис параметра
K1	Рутинність	Ніколи не виступає з новими пропозиціями, відкидає пропозиції інших	Шаблонність, зацикленість на одній позиції, консерватизм, показує, наскільки член команди здатен відійти від цієї шаблонності
K2	Консервативність	В роботі прагне дотримуватися перевірених підходів, з обережністю ставиться до нових ідей, реалізує нові методи тільки під тиском керівництва	Показує, наскільки член команди обстоює, захищає старе, віджиле; його позиція ворожа до прогресу
K3	Прогресивність	З готовністю відгукується на пропозиції керівництва подумати про нові методи і технології	Веде до удосконалення, поліпшення чого-небудь завдяки своїм ідеям, настроям, поглядам; показує, наскільки член команди, поділяючи передові ідеї, настрої, погляди, прагне до прогресу, бореться за прогрес
K4	Ініціативність	Ініціативно пропонує керівництву нові підходи і рішення	Виявляє ініціативу, уміє самостійно розв'язувати що-небудь; запозятливий
K5	Новизна	Завжди сповнений безліччю нових ідей, використовує кожну можливість для того, щоб запропонувати нове рішення	Усе нове, що недавно пізнали, усвідомили, відчули і т. ін., що було ще невідомим, непізнаним
K6	Деструктивність	Не виступає з новими пропозиціями або його пропозиції часто йдуть на шкоду загальній справі	Порушення або руйнування нормальної структури чого-небудь
K7	Оптимальність	Його ідеї та підходи часом дозволяють знизити деякі витрати або уникнути витрат	Показує, наскільки відповідає певним умовам, вимогам; найкращий із можливих
K8	Інноваційність	Його пропозиції часто приносять відчутну оптимізацію бізнес-процесів, технологій, виробничих процесів	Нововведення, новітня зміна чи винахід; оновлення, зміна; діяльність спрямована на створення принципово нових, вдосконалених або більш відповідних умовам технологій, виробів тощо
K9	Ефективність	Його підходи і рішення підвищують ефективність діяльності	Приводить до потрібних результатів, наслідків, дає найбільший ефект; показує, який викликає ефект
K10	Динамічність	Його пропозиції істотно розвивають бізнес	Перебуває в інтенсивному русі, в дії; багатий внутрішньою силою; пов'язаний з рухом, дією сили

Таблиця 2

**Порівняльний аналіз освітнього проекту
з характеристикою огранювання діаманта «single cut (КР-17)»**

Назва характеристики	Опис для діаманта	Опис для освітнього проекту
діамант	унікальний дорогоцінний камінь, в необробленому вигляді – алмаз, якому за допомогою обробки (огранювання) надається спеціальна форма, що максимально виявляє його природний блиск	будь-який проект, у тому числі й освітній, для проектного менеджера і його команди є унікальним та дорогоцінним, над яким команда проекту працює щодня, поступово відшліфовуючи кожну сторону проекту – грань
круглий та невеликий	розглядаються невеликі круглі та середні алмази	освітні проекти у сфері підвищення кваліфікації є типовими та невеликими за терміном (до трьох місяців), процес формування та настання яких відбувається по колу
17 граней	цифра в огранюванні – це загальна кількість фасет у готовому мінералі; в діаманті з огранюванням КР-17 всього 17 граней	для досліджуваного освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації виділені 7 кадрових ризиків та 10 параметрів креативності членів команди проекту, що дають необхідну кількість показників – граней
single cut	один із перших та найпростіших способів огранювання діаманта, що в подальшому стало «матір'ю» сучасного повного огранювання діамантів, під яким мається на увазі цілий камінь з 57 гранями	також може слугувати основою для побудови інших моделей з необхідним набором параметрів для будь-яких освітніх проектів

Аналіз показав, що, як і в огранюванні діамантів, де вартість діаманта залежить від якості огранювання, а діаманти з різною якістю огранювання виглядають абсолютно по-різному та мають різну ціну, можна ствер-

джувати, що й інші огранювання діамантів можна використати для побудови моделей управління командами будь-яких освітніх проектів, можливо, більш масштабних (табл. 3).

Таблиця 3

Індекси та види огранювань діамантів

Індекси	Вид огранювання
Кр-17	Діаманти круглі сімнадцятигранні
Кр-57	Діаманти круглі п'ятидесятисемигранні
М-55	Діаманти «Маркіз» п'ятидесятип'ятигранні
Г-56	Діаманти «Груша» п'ятидесятишестигранні
Ов-57	Діаманти «Овал» п'ятидесятисемигранні
П-65, П-73	Діаманти «Принцеса» шестидесятип'ятигранні та семидесятитригранні
І-57, І-65	Діаманти «Ізумруд» п'ятидесятисемигранні та шестидесятип'ятигранні
Се-57	Діаманти «Серце» п'ятидесятисемигранні
Бт-25, Бт-13	Діаманти «Багет» двадцятип'ятигранні та тринадцятигранні
Бт-25	Діаманти «Багети» трапецієподібні двадцятип'ятигранні
Кв-33	Діаманти «Квадрат» тридцятитригранні
Т-52	Діаманти «Трилліант» п'ятидесятидвогранні
Ра-65	Діаманти «Радіант» шестидесятип'ятигранні
У-57	Діаманти «Углові» п'ятидесятисемигранні

Отриманий аналіз дав нам можливість побудувати концептуальну модель управління командою освітнього проекту у сфері підвищення кваліфікації, яка отримала однойменну назву з огранюванням алмазу «діамант single cut (КР-17)», в основі якої лежить ідея, що успіх проекту напряду залежить від проектного менеджера, який повинен управляти проектом так, щоб при високій креативності членів його команди ризику максимально зменшувалися [11].

Висновки. Запропонована модель управління креативністю та ризиками команд освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації «діамант single cut (КР-17)» може слугувати для подальшого дослідження окремих параметрів креативності та ризиків членів команд освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації. Необхідно побудувати математичну модель управління людськими ресурсами, яка б дозволила враховувати як ризики, пов'язані з людьми, так і креативність цих ресурсів.

Список літератури

1. Кузьмінська Ю. М., Данченко О. Б. Креативні технології управління освітніми проектами. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід*: матеріали Міжнар. конф. (21–24 листоп. 2017 р., м. Відень, Австрія) у 2 т. Т. І. Дніпро-Відень, 2017. С. 102–107.
2. Оберемок І. І. Методи та засоби проектно-орієнтованого управління у вищих навчальних закладах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.22 / Київ. нац. ун-т буд-ва та архіт. МОН України. Київ, 2003. 17 с.
3. Ляковський В. П. Моделі, методи і алгоритми побудови проектів систем організаційного управління вищим навчальним закладом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.22 / Нац. транспорт. ун-т. Київ, 2001. 19 с.
4. Коляда О. П. Портфельне планування у процесі реалізації стратегії розвитку вищого навчального закладу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.22 / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. Київ, 2011. 20 с.
5. Рулікова Н. С. Управління портфелем інноваційних проектів вищих навчальних за-

кладів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.22 / Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. Миколаїв, 2009. 20 с.

6. Блінцов В. С., Драгомиров В. В. До концепції управління проектом модернізації вищої освіти. *Управління проектами: стан та перспективи*: матеріали III міжнар. наук.-практ. конф. Миколаїв, 2007. С. 34–37.
7. Животова Т. П., Григор О. О. Класифікація проектів вищих навчальних закладів. *Управління проектами у розвитку суспільства. Управління програмами організаційного розвитку в конкурентному оточенні*: тези доп. IV міжнар. конф., 22–23 травня 2008 р. Київ, 2008. С. 71–72.
8. Борзенко-Мірошніченко А. Ю. Моніторинг якості освітніх проектів на основі моделей системної динаміки: ввтореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.22 / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. Київ, 2007. 20 с.
9. Креативные технологии управления проектами и программами: монография / С. Д. Бушуев, Н. С. Бушуева, И. А. Бабаев и др. Киев: Саммит-Книга, 2010. 768 с.
10. Лепський В. В., Кузьмінська Ю. М. Застосування методу перехресної соціометричної оцінки до визначення креативності команди проекту. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами: зб. наук. праць. № 2 (1111). Харків: НТУ «ХП», 2015. С. 172–177.
11. Кузьмінська Ю. М. Концептуальна модель управління командами освітніх проектів у сфері підвищення кваліфікації. *Управління проектами: стан та перспективи*: матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф. Миколаїв: НУК, 2018.

References

1. Kuzminska, Yu. M., Danchenko, O. B. (2017) Creative technologies in management of educational projects. *Innovatsiyni tehnologiyi v nautsi ta osviti. Yevropeysky dosvid*: materials of Internat. conf. (November 21–24, 2017, Vienna, Austria) in 2 vol. Vol. 1. Dnipro-Vienna, pp. 102–107 [in Ukrainian].
2. Oberemok, I. I. (2003) Methods and means of project-oriented management in higher educational institutions: author's abstract from dis-

- sertation of PhD: 05.13.22 / Kyiv Nat. Un-ty of Building and Architecture. Ministry of Education and Science of Ukraine. Kyiv, 17 p. [in Ukrainian].
3. Lyaskovsky, V. P. (2001) Models, methods and algorithms of building projects of organizational management systems of higher educational institutions: author's abstract from dissertation of PhD: 05.13.22 / Nat. transport un-ty. Kyiv, 19 p. [in Ukrainian].
 4. Kolyada, O. P. (2011) Case planning in the process of realization of the strategy of development of a higher educational institution: author's abstract from dissertation of PhD: 05.13.22 / Kyiv Nat. Un-ty of Building and Architecture. Kyiv, 20 p. [in Ukrainian].
 5. Rulikova H. C. (2009) Portfolio management of innovative projects of higher educational establishments: author's abstract from dissertation of PhD.: 05.13.22 / Admiral Makarov Nat. Un-ty of Shipbuilding. Mykolaiv, 20 p. [in Ukrainian].
 6. Blintsov V. C., Dragomirov V. V. (2007) To the concept of management of the project of the higher education modernization. *Upravlinnya proektamy: stan ta perspektyvy*: materials of the 3d Internat. sci. pract. conf. Mykolaiv, pp. 34–37 [in Ukrainian].
 7. Zhivotova, T. P., Grigor, O. O. (2008) Classification of projects of higher educational institutions. Project management in the development of the society. *Upravlinnya prohramamy organizatsiynoho rozvytku v konkurentnomu otocenni*: theses of the 4th Internat. conf., May 22–23. Kyiv, pp. 71–72 [in Ukrainian].
 8. Borzenko-Miroshnichenko, A. Yu. (2007) Monitoring of quality of educational projects on the basis of system dynamics models: author's abstract from PhD: 05.13.22 / KNUBA. Kyiv, 20 p. [in Ukrainian].
 9. Bushuyev, S. D., Bushueva, N. S., Babayev, I. A. et al. (2010) Creative technologies for project and program management: monograph. Kyiv: Sammit-Kniga, 768 p. [in Russian].
 10. Lepskyy, V. V., Kuzminska, Yu. M. (2015) Application of cross-sociometric evaluation method in the determination of the creativity of the project team. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Strategichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy*: collection of sci. works. Kharkiv: NTU "KhPI", No. 2 (1111), pp. 172–177 [in Ukrainian].
 11. Kuzminska, Yu. M. (2018) Conceptual model of educational project teams management in the field of further training. *Upravlinnya proektamy: stan ta perspektyvy*: materials of the XIV Internat. sci. pract. conf. Mykolayiv: NUK [in Ukrainian].

Yu. M. Kuzminska, *Director of the Higher School of Management*
e-mail: jkuzminskaya@gmail.com

Higher Educational Institution «Interregional Academy of Personnel Management»
Frometivska str., 2, Kyiv, 03039, Ukraine

THE MODEL OF MANAGEMENT BY CREATIVITY AND RISKS OF EDUCATIONAL PROJECT COMMANDS IN THE FIELD OF FURTHER TRAINING

Although higher educational institutions have implemented project management in their activities since last 10-15 years, they still continue to use outdated approaches to the management of educational projects in the field of higher education, often passing experience of organizing and managing student education in the field of higher education to the field of professional development that is not logical and correct. These approaches require the improvement of existing experience and adaptation of project-oriented management of educational projects in the field of further training, as adult education organization has significant differences from the organization of teaching children and students.

In the article, the author suggests to copy the process of cutting diamonds in project management, namely, to show the common features of diamonds processing with the management of teams of educational projects in the field of further training and relationship of project risks with the creativity of project team. It is a thorough comprehensive analysis of these aspects that proves relevance and

points the ways to eliminate the risks that can affect the success of an educational project in the field of further training in the management of the team.

The article presents and describes the parameters of creativity of educational projects management and the risks associated with people who have a significant impact on the success of the project. It is shown how the process of creative team management of an educational project in the field of further training can influence the achievement of the project goal. The article reveals the common features of project management and the diamond assessment system, and studies the relationship between the management of educational project in the field of further training and diamond cut.

Keywords: *educational project, further training, project team, management, creativity, educational project risks in the field of advanced training.*

Я. О. Поволоцький, студент,

e-mail: yaroslavpov@ukr.net

Р. Р. Усенко, студент

Черкаський державний технологічний університет

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

ОЦІНЮВАННЯ ТА ВИБІР ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ СУЧАСНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ІТ ПРОЕКТАМИ

Пропонується здійснення оцінювання та вибір програмних засобів сучасних систем управління проектами в галузі інформаційних технологій на основі обґрунтування та дослідження критеріїв, таких як кросплатформеність, надійність, універсальність, інтуїтивність інтерфейсу та ціна. Представлено основні етапи формування інтегрованого критерію якості ПЗ. Ефективне управління проектом у галузі інформаційних технологій залежить від організації та планування процесів проектів, у тому числі представлення інформації в зручній для керівництва формі. Розглянуте дослідження дає можливість забезпечити вибір оптимального програмного засобу в системах управління ІТ проектом. Зроблено висновки про можливість підвищення ефективності управління проектом в умовах обмеження ресурсів, бюджету та часу.

Ключові слова: критерій якості, оцінювання та вибір програмних засобів, система управління проектами, інформаційні технології.

Вступ. Особливістю управління ІТ проектом є забезпечення гнучкості, мобільності, універсалізації при забезпеченні високої продуктивності, швидкості і адекватності прийняття стратегічних та оперативних рішень у кризових ситуаціях, що відповідали б стратегіям зовнішнього оточення та внутрішньої динаміки [1]. Під час планування задач типового проекту в галузі інформаційних технологій (ІТ), наприклад розробка мобільної гри, важливим є розподіл задач, облік задач, звітність у проекті тощо. Для вирішення цього існує велика кількість програмних засобів, що забезпечують автоматизацію функцій планування, контролю, підтримки прийняття управлінських рішень. Тому питанню забезпечення інформаційних потреб проектного менеджера приділяється особливо гостра увага, а отже, важливим є вибір оптимального програмного засобу в системах управління ІТ проектом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В управлінні ІТ проектом актуальним є об'єднання всіх функцій управління та створення гнучких систем із елементами штучного інтелекту, які дозволяють оперативно здійснювати оцінювання ефективності ІТ проекту, планування ІТ проекту, планування та управління матеріальними потоками, контроль виконання процесів ІТ проекту; а також планувати стратегічну діяльність ІТ компанії.

Методи штучного інтелекту на сьогоднішній день знаходять все більше застосування в інформаційних системах, особливо в умовах, коли неможливо отримати достатньо точну та релевантну інформацію, застосувати структуроване математичне моделювання та формалізовані методи [2]. Розробка інформаційних систем на основі інтеграції організаційних та технічних систем, а також застосування інтелектуальних методів вирішення задач управління розглянуто в наукових працях О. А. Большакова [3]. В роботі [4] авторами досліджено прийняття управлінських рішень в організаційно-технічних системах на основі нечітких множин та нечіткої логіки. В роботі [5] описуються моделі прийняття рішень в управлінні організаційними системами на основі математичної теорії, теорії ігор, теорії активних систем. У роботі [6] автор обґрунтував найважливіші вимоги до програмних засобів в управлінні ІТ проектом. Робота [7] присвячена детальному порівнянню двох програмних засобів для проектного менеджменту, а саме Trello і Jira.

Однак для ІТ проекту в процесі управління важливим є врахування факторів швидкої зміни обставин, коли необхідно охопити великий обсяг інформації, що надходить, порівняти її з інформацією, яка вже є, врахувати досвід минулого, розібратися в різних ситуаціях, втрутитись у хід реалізації управлінсько-

го рішення [8]. Тобто важливого значення набуває фактор реального часу, що має враховуватися при виборі програмного засобу в системах управління ІТ проектами.

Метою статті є дослідження критеріїв, на основі яких здійснюється оцінювання та вибір програмних засобів у системах управління ІТ проектами, що забезпечить оптимальний вибір варіанта з найкращими характеристиками якості і високою ефективністю за рахунок економії часу, фінансових та матеріальних ресурсів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Ефективне управління ІТ проектом залежить від організації та представлення інформації в зручній для керівництва формі. Одержання інформації для прийняття рішень в управлінні ІТ проектом вимагає переробки значних обсягів даних різного типу та характеру. Зі збільшенням потужності комп'ютера поліпшується функціональність систем, підвищуються їх можливості. З введенням стандартів обміну даними між системами, поширенням мережових і Web-технологій відкриваються нові можливості для подальшого розвитку систем управління ІТ проектами (СУ-ІТП) та їх ефективнішого використання. Самі проекти стають усе складнішими, що висуває додаткові вимоги до розвитку інформаційних технологій керування проектами.

Тому ефективність управління ІТ проектом у сучасних умовах залежить від раціональних методів і технологічних процесів обробки даних. На сьогоднішній день ринок програмних продуктів, що забезпечують процеси підтримки управління проектами, представлено великою кількістю. Кожен з них характеризується відповідністю систем сучасним вимогам проектного менеджменту.

Вибір програмного засобу управління проектами базується на визначенні числових чи якісних значень окремих (часткових) показників, що характеризують властивості, склад системи, прогресивність рішень по управлінню.

З часом проекти стають усе складнішими, виконуються в різних точках земної кулі, роблять необхідним аналіз величезної кількості інформації і розподіленого прийняття рішень. Усе це висуває додаткові вимоги до потужності і гнучкості програмних засобів (ПЗ) для керування проектами. Задачі керування ускладнюються, наприклад, необхідністю детального планування й контролю використання ресурсів у процесах проекту. Засоби авто-

матичного перепланування задач з урахуванням обмежень на ресурси набувають особливої важливості для великих проектів з кількістю процесів до 100 тисяч і більше. У подібних ситуаціях проектного менеджеру потрібний професійний інструмент, який допоміг би йому проаналізувати причини нестачі ресурсів і знайти оптимальне рішення.

При виборі програмного засобу в системах управління ІТ проектом необхідно врахувати показники якості з точки зору користувача, тобто проектного менеджера. Такий підхід забезпечить ефективне управління ІТ проектом та зменшить перевитрати ресурсів у проекті, а також часу. Для ІТ компанії найбільш важливим є максимальне поєднання таких показників якості, як кросплатформеність, надійність, універсальність, інтуїтивність інтерфейсу та ціна.

Кросплатформеність характеризує властивість програмного забезпечення працювати більш, ніж на одній програмній (в тому числі – операційній системі) або апаратній платформі, та технології, що дозволяють досягти такої властивості. Кросплатформеність дає змогу суттєво скоротити витрати на розробку нового або адаптацію існуючого програмного забезпечення. Залежно від засобів реалізації поділяється на кросплатформеність на рівні мов програмування (а також інструментів таких мов: компіляторів та редакторів зв'язків), середовища виконання, операційної системи та апаратної платформи.

Надійність характеризується здатністю програмного продукту безвідмовно виконувати певні функції при заданих умовах протягом заданого періоду часу з досить великою ймовірністю.

Універсальність характеризується витратами на розробку та впровадження системи управління при досягненні заданих показників ефективності функціонування системи.

Інтуїтивність інтерфейсу характеризується сукупністю засобів і правил, що забезпечують взаємодію користувача із засобом обчислювальної техніки або його програмним забезпеченням, що має поширені й звичні для багатьох принципи побудови взаємодії. При роботі з таким інтерфейсом користувач використовує звичні для нього дії, особливо не задумуючись над тим, що та як зробити, його дії ніби інтуїтивні, звідки й назва.

Ціна характеризує вартість програмного забезпечення.

Програмне забезпечення для управління ІТ проектом повинне задовольняти всім вимогам проектного менеджера та проектною командою з урахуванням цілей СУІТП.

Тому в процесі вибору програмних засобів необхідно враховувати такі фактори [9]:

- багатовимірний опис програмних засобів з урахуванням численних їх характеристик;
- процеси прийняття рішення на всіх рівнях управління:

- ідентифікація проблемних ситуацій, що виникають у процесі управління;

- множини цілей та альтернатив їх досягнення;

- способи декомпозиції загальносистемної задачі управління на ряд часткових задач за своїми цільовими функціями;

- вимоги адаптації системи управління в цілому та їх компонентів до світових найкращих зразків.

Виходячи з цього, при обґрунтуванні та виборі критеріїв оцінювання ПЗ враховується ієрархічний принцип розробки ІТ проекту. Тому оцінювання та вибір ПЗ для СУІТП відносяться до багатоваріантних, рішення яких залежить від багатьох факторів і суттєвих невизначеностей, причому в загальному вигляді постановка цієї задачі формулюється таким чином.

Є сукупність ПЗ $\{i\} = \overline{\{1;n\}}$ однакового функціонального призначення. Кожне i -е ПЗ має множину показників оцінювання (ПО) $j = \overline{\{1,m\}}$. З урахуванням умов ІТ проекту та обраної структури СУІТП формулюють вимоги до кожного j -го ПО. Необхідно з сукупності ПЗ вибрати такий засіб, що найповніше задовольняє вимогам до його ПО.

Дослідження критеріїв оцінювання здійснюється на основі методики [10]. На множині ПЗ, що оцінюються, задаються бінарні відношення переваг $s'Rs''$ та функції $K(S)$, значення якої для всіх $s \in S$ визначені так, що деяка функція

$$\mu(\varepsilon) = P(s'Rs'') / K(s') - K(s'') = \varepsilon, \quad (1)$$

яка дозволяє обчислити для кожного $\varepsilon > 0$ ймовірність твердження

$$K(s') - K(s'') = \varepsilon \Rightarrow s'Rs'' \quad (2)$$

для всіх s', s'' .

Тоді $K(S)$ – критерій, який характеризує відповідність ПЗ $s \in S$ визначеній цілі. $\mu(\varepsilon)$ кількісно характеризує можливості критерію на множині ПЗ S (правильно відображує відношення переваг і встановлює ступінь довіри до

результатів оцінювання ПЗ за критерієм $K(S)$). Величина ε характеризує мінімальний ступінь різниці між ПЗ (якщо $K(s') - K(s'') < \varepsilon$, то ПЗ $s', s'' \in S$ не розрізняються із заданим значенням $\mu(\varepsilon)$).

З точки зору значення $\mu(\varepsilon)$ рекомендовано критерії розбивати на три групи:

- прийнятні, якщо

$$\lim \mu(\varepsilon) = 1$$

при $\varepsilon \rightarrow \sigma = \min / K(s') - K(s'') / ; s', s'' \in S$;

- непрямі, якщо $0,5 < \lim \mu(\varepsilon) < 1$;

- неприйнятні, якщо $\lim \mu(\varepsilon) \leq 0,5$.

Для прийнятного критерію

$$K(S^0) = \max(\min) K(s) : s \in S, \quad (3)$$

тобто ефективність застосування ПЗ еквівалентна пошуку екстремуму $K(S)$.

Практично більшість критеріїв є непрямыми, для яких справедливе співвідношення:

$$K(s') > K(s'') \Rightarrow P(s'Rs'') = \mu(\sigma) \geq 0,5, \quad (4)$$

тобто непрямий критерій реалізує принцип: з ймовірністю, не меншою ніж $\mu(\sigma)$, більшому значенню критерію відповідає краща ефективність ПЗ. В цьому випадку зв'язок має ймовірнісний характер: з ймовірністю $\mu(\sigma)$ оптимальна ефективність має значення критерію в інтервалі

$$K(s') - \sigma \leq K(S^0) \leq K(s') + \sigma. \quad (5)$$

Для неприйнятного критерію справедливе співвідношення

$$K(s') > K(s'') \Rightarrow P(s'Rs'') = \mu(\sigma) \leq 0,5.$$

При $\mu(\sigma) < 0,5$ критерій $K(S)$ не несе достатньої інформації про відношення переваги, тобто такий критерій не може бути використаним для оцінювання ПЗ.

Таким чином, основні етапи формування інтегрованого критерію якості оцінювання ПЗ є такими:

1. Виявити множину $\langle K \rangle$ всіх критеріїв $K_v(S)$, на основі яких можна судити про відповідність ПЗ заданим цілям СУІТП, за якими оцінюється ефективність ПЗ $s'Rs''$.

2. Для кожного $K_v(S) \in K$ визначають σ_v і значення $\mu_v(\sigma_v)$, задають μ_{mp} – нижню межу прийнятності, необхідну для прийняття рішень.

3. Критерій $K_v \in K$ розміщують у міру зменшення значень $\mu_v(\sigma_v)$, після чого критеріям присвоюють нові номери

$$j \leq X \Rightarrow \mu_j(\sigma_j) \geq \mu_x(\sigma_x). \quad (6)$$

4. Для векторів критеріїв $K^{(1)} = K_1$, $K^{(2)} = (K_1, K_2)$ за допомогою ОПР послідовно визначають значення цілі $\mu_1(\sigma_1)$, $\mu_{12}(\sigma_{12})$ тощо.

Якщо на деякому n -му кроці для вектора $K^{(n)} = (K_1, K_2, \dots, K_n)$ величина $\mu_1(\sigma_1, \dots, \sigma_n) > \mu_{\text{кр}}$, то $K^{(n)}$ – вектор критеріїв наближеної розмірності, який дозволяє здійснити оцінювання ПЗ.

Таким чином, вибір ПЗ для СУІТП базується на дослідженні критеріїв оцінювання ПЗ, що перебувають у взаємозв'язку та взаємозумовленості. Тому алгоритми, які застосовують для вирішення задачі вибору, залежно від використаних при цьому критеріїв вибору поділяють на однокритеріальні та багатокритеріальні. Однокритеріальні, в свою чергу, можуть бути однопараметричними, коли тільки один показник оцінювання використовується як критерій вибору, та багатопараметричними, коли з допомогою кількох показників оцінювання формується згортою або іншими методами один комплексний показник. Зазначимо, що при використанні одного однопараметричного критерію вибору всі числові показники оцінювання, за винятком одного, відносяться до обмежувальних, що значно спрощує процедуру вибору, але не гарантує досягнення компромісу між вартістю й технічною досконалістю програмного засобу.

При оцінюванні та виборі ПЗ для СУІТП на основі дослідження критерію якості вирішуються такі оптимізаційні задачі: визначення структури системи, тобто оптимальних принципів її побудови – задача оптимізації структури; вибір значень основних характеристик системи – задача оптимізації параметрів.

Загальна задача оптимізації зводиться до:

- обґрунтування складу підсистем, що входять у систему, з визначенням раціональних варіантів, які можуть бути використані в оптимальній системі;
- визначення типів елементів технічної реалізації та їх модифікацій, які можуть бути застосовані при побудові підсистем, що входять в оптимальну систему, та обґрунтування оптимальних значень їх характеристик, в тому числі параметрів системи (основних і тих, що оптимізуються);
- обґрунтування та визначення значень показників якості різних варіантів побудови системи та вибору оптимального варіанта.

Висновки. Отримані результати показують, що управління ІТ проектом вимагає обробки великого обсягу інформації, і рішення завжди приймається на основі цієї інформації, тому досить важливим є процес отримання необхідної інформації, її обробка, зберігання, приведення її до вигляду, що полегшує прийняття рішення. Успішне вирішення задачі вибору програмного засобу для управління ІТ проектом можливе шляхом дослідження критеріїв, на основі яких і буде прийматись рішення. В роботі визначено такі критерії: кросплатформеність, надійність, універсальність, інтуїтивність інтерфейсу та ціна, а також досліджено основні етапи формування інтегрованого критерію якості оцінювання ПЗ. Вибір оптимального програмного засобу на основі досліджених критеріїв якості забезпечить підвищення ефективності управління проектом в умовах обмеження ресурсів, бюджету та часу.

Список літератури

1. Лега Ю. Г., Прокопенко Т. О., Урецька Ю. І. Управління проектом в класі організаційно-технічних систем. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2014. № 1. С. 46–50.
2. Рассел С., Норвіг П. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA) = Artificial intelligence: a modern approach (AIMA). 2-е изд. Москва: Вильямс, 2007. 1424 с.
3. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / под. ред. А. А. Большакова. Москва: Горячая линия-Телеком, 2006. 160 с.
4. Chochowski A., Chernyshenko I., Kozyrskyi V., Kyshenko V. Innovative energy-saving technologies in biotechnological objects control. Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury, 2014. 240 p.
5. Novikov D., Ashimov A., Sultanov B., Adilov Z., Borovskiy Y., Alshanov R., Ashimov A. Macroeconomic analysis and parametric control of a national economy. New York: Springer, 2013. 288 p.
6. Башинська І. О., Новак Н. Г. Ефективне управління проектами підприємства. *Інфраструктура ринку: електрон. наук.-практ. журн.* 2017. № 6. С. 113–117.
7. startpack.ru. URL: <https://startpack.ru/compare/fog-trello/jira>
8. Прокопенко Т. А., Ладанюк А. П. Информационная модель управления технологическими комплексами непрерывного типа в классе организационно-

- технических систем. *Проблемы управления и информатики*: междунар. науч.-техн. журн. 2014. № 5. С. 64–70.
9. Прокопенко Т. О., Ладанюк А. П. Інформаційні технології управління організаційно-технологічними системами: монографія. Черкаси: Вертикаль, видавець Кандич С. Г., 2015. 224 с.
 10. Прокопенко Т. О. Формування системи показників оцінки ефективності інвестиційних проектів і програм. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2012. № 2. С. 58–62.
 1. Lega, Yu. G., Prokopenko, T. O., Uretska, Yu. I. (2014). Project management in the class of organizational and technical systems. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, (1), pp. 46–50 [in Ukrainian].
 2. Rassel, S., Norwig, P. (2007) Artificial intelligence: a modern approach (AIMA). 2nd ed. Moscow: Wiliams, 1424 p. [in Russian].
 3. Bolshakov, A. A. (ed.) (2006) Intellectual systems of management of organizational and technical systems. Moscow: Goryachaya liniya-Telecom, 160 p. [in Russian]
 4. Chochowski, A., Chernyshenko, I., Kozyrskiy, V., Kyshenko, V. (2014) Innovative energy-saving technologies in biotechnological objects control. Kyiv: Tsentr uchbovnoi literatury, 240 p.
 5. Novikov, D., Ashimov, A., Sultanov, B., Adilov, Z., Borovskiy, Y., Alshanov, R., Ashimov, A. (2013) Macroeconomic analysis and parametric control of a national economy. New York: Springer, 288 p.
 6. Bashinska, I. O., Novak, N. G. (2017) Effective enterprise project management. *Infrastructura rynku: electron. sci.-pract. journ.*, (6), pp. 113–117 [in Ukrainian]
 7. startpack.ru. URL: <https://startpack.ru/compare/fog-trello/jira>
 8. Prokopenko, T. O., Ladanyuk, A. P. (2014). Information model of the control of continuous type technological complexes in the class of organizational and technical systems. *Problemy upravleniya i informatiki*: Internet. sci.-pract. journ., (5), pp. 64–70 [in Russian].
 9. Prokopenko, T. O., Ladanyuk, A. P. (2015) Information technology management organizational and technological systems. Cherkasy: Vertical, publisher Kandych S. G., 224 p. [in Ukrainian].
 10. Prokopenko, T. O. (2012). Formation of a system of indicators for evaluating the effectiveness of investment projects and programs. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, (2), pp. 58–62 [in Ukrainian].

References

Ya. O. Povolotsky, student,
e-mail: yaroslavpov@ukr.net

R. R. Usenko, student
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

EVALUATION AND SELECTION OF SOFTWARE TOOLS OF MODERN IT PROJECT MANAGEMENT SYSTEMS

The issue of providing information needs of project manager requires special attention. The choice of the optimal software tool is very important in IT project management systems. Over time, projects are becoming more complex, performed in different parts of the globe. Project manager analyzes a huge amount of information and makes decisions. It is proposed to evaluate and select the software tools of modern information technology project management systems based on the substantiation and study of quality criteria, such as cross-platform, reliability, versatility, interface intuition and price. The basic stages of the formation of integrated criterion of evaluation of software are presented. The effective management of a project in the field of information technology depends on the organization and planning of processes in projects, including the presentation of information in a us-

er-friendly form of guidance. The choice of software for IT project management systems is based on the study of software evaluation criteria that are interconnected. When choosing a software tool in the IT management system, it is necessary to consider quality indicators from the point of view of a user, that is, project manager. This approach ensures effective management of IT project and reduces over-utilization of resources in the project as well as time. The given research gives an opportunity to provide the choice of the optimum software in the systems of management of IT project. Conclusions are made about the possibility of improving the management of the project in terms of resource, budget and time constraints.

Keywords: *quality criterion, evaluation and selection of software tools, project management system, information technology.*

В. В. Нікольський, *д.т.н., професор,*
професор кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки

К. Ю. Бережний, *аспірант*
Національний університет «Одеська морська академія»
вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна

МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ЗОНДУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ РІДИН

Підвищення вимог до викидів у довкілля шкідливих речовин судновими малообертовими двигунами потребує постійного підвищення ефективності роботи паливної системи. Метою дослідження є розробка моделі вимірювального зонду комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин на основі методу співвісних циліндрів. Розроблена модель враховує процеси в трьох основних блоках зонда: осциляторі лінійного п'єзодвигуна, фрикційному контакті, триботехнічному вузлі. Визначення реологічних характеристик здійснюється за часом проходження рухомого циліндра між його крайніми станами. Застосовано широтно-імпульсну модуляцію для керування лінійним п'єзодвигуном.

Ключові слова: комп'ютерна система, лінійний п'єзодвигун, фрикційний контакт, SimInTech.

Вступ. Підвищення жорсткості до викидів у довкілля шкідливих речовин при роботі суднових малообертових двигунів потребує постійного підвищення ефективності роботи паливної системи, складовою якої є регулятор в'язкості. В свою чергу, до складу регулятора входить вимірювальний зонд (ВЗ). В [9, 14] проведено аналіз сучасних методів, які використовують при визначенні в'язкості важкого палива за допомогою реометрів та комп'ютерних систем визначення реологічних характеристик, та доведено, що найбільш наближеним до реальних процесів у паливній апаратурі є метод співвісних циліндрів.

Метою статті є створення моделі ВЗ комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин і встановлення зв'язків його складових та їх впливу на вимірювальні характеристики.

Основна частина. В [9] наведено кінематичну схему можливої конструкції ВЗ на співвісних циліндрах, що складається з трибо-технічного вузла та приводу, яка дозволяє здійснювати визначення реологічних характеристик у потоці рідини. Особливістю структурної схеми та конструкції є горизонтальне розташування рухомого та нерухомого циліндрів. Це породило такі недоліки:

- протікання рідини;
- неможливість здійснювати лабораторне дослідження проби рідини;

- неможливість локальної зміни температури вимірювального зонда з рідиною.

Слід зазначити, що основним недоліком було саме протікання рідини.

Для усунення цього недоліку виявилось достатнім розвернути ВЗ порівняно з [9] на 90°. Тобто, рухомий та нерухомий циліндри набули вертикального розташування. В такому випадку ВЗ можливо погрузити в ємність з досліджуваною рідиною, а також забезпечити її підігрів.

На рис. 1 наведено кінематичну схему ВЗ на співвісних циліндрах. Можливість приєднання до конструкції ВЗ стакана 8 запобігає протіканню рідини.

Однак порівняно з конструкцією ВЗ з [9], де рухомий циліндр утримувався в нерухомому за рахунок клину рідини, в запропонованій структурній схемі на рухомий циліндр буде діяти сила тяжіння, яка обумовлена приєднаними масами рухомого циліндра (5) зі штоком. Це приводить до переміщення означеного циліндра в крайнє нижнє положення.

Вочевидь, що зусилля, яке буде потрібно для переміщення циліндра (5) з крайнього нижнього у верхнє положення, є більшим, ніж у зворотному напрямку. Але потрібно з'ясувати: чи зможе сила тертя, яка буде виникати за рахунок рідини між рухомим і нерухомим циліндрами, утримувати нерухомий

циліндр у фіксованому положенні; якими повинні бути розміри та матеріал, з якого виготовлено циліндр; чи можливо утримати або зафіксувати положення рухомого циліндра, чи той буде постійно сповзати в крайнє нижнє положення; і чи можливо це реалізувати за допомогою осцилятора, якщо він у неробочому стані буде заклинений до циліндра.

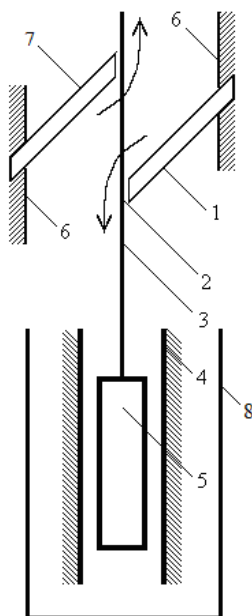


Рис. 1. Кінематична схема ВЗ на співвісних циліндрах: 1, 7 – осцилятори; 2 – точка торкання; 3 – шток; 4 – нерухомий циліндр; 5 – рухомий циліндр; 6 – основа, до якої кріпляться осцилятори; 8 – стакан з рідиною

В першу чергу, потрібно розглянути процеси, які відбуваються в осциляторі.

В основі всіх осциляторів, які застосовують в ЛПД, лежать п'єзоелементи (ПЕ) з поперечною поляризацією (рис. 2).

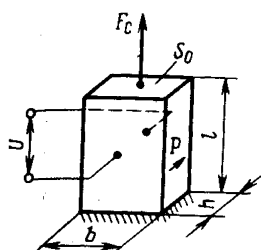


Рис. 2. П'єзоелемент пластинчастого типу з поперечною поляризацією

Для попереднього (оцінного) розрахунку основних конструкцій осцилятора з метою визначення деформації і зусилля, що розвивається, залежно від геометричних розмірів і властивостей використовуваної кераміки були ви-

користані співвідношення [8], які дозволяють побудувати моделі осциляторів.

Слід зазначити, що прямий п'єзоэффект утрудняє формування поля керування, особливо при реалізації динамічних процесів, які швидко проходять. При аналізі динаміки осцилятора малої ємності не зважають на електростатичну сталу часу $T_E = R_{BT}C_0$ попри її незначності. При керуванні ж осцилятором великої ємності для компенсації явищ, пов'язаних із прямим п'єзоэффектом, застосовуються спеціальні технічні заходи, такі як організація спеціальних швидкодіючих контурів регулювання керуючого поля, включення в схему підсилювача додаткових діодів, що утворюють ланцюги замикання наведених токів. Зазвичай це стосується п'єзоактуаторів.

У [5] доведено, що, при певних обмеженнях, ЛПД можуть бути зведені до одновимірної механічної моделі.

Аналіз методів, використовуваних при побудові моделей ВЗ на однорідних плоских ПР, показав, що при побудові моделей з одним однорідним ПР доцільніше використовувати метод кінцевих елементів. Хвильова теорія використовується при побудові моделей зі складальними пакетами.

Аналіз сучасних конструкцій ЛПД провідних фірм-розробників Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG [11] і ТОВ «Лілея» довів, що як осцилятор реверсивних ЛПД використовують осцилятор, зовнішній вигляд якого зображено на рис. 3, а. Це дозволяє зменшити кількість елементів підтримки ПЕ.

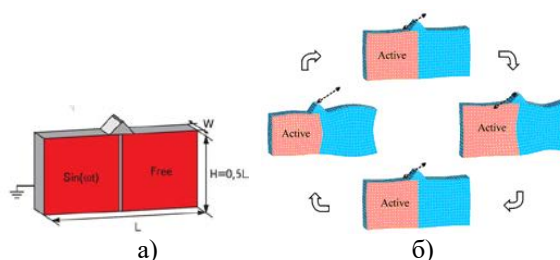


Рис. 3. Конструкція осцилятора та схема його деформації при додаванні синусоїдальної напруги (один цикл коливання п'єзопластини)

Основною частиною лінійного ультразвукового двигуна є п'єзокерамічна пластина, поляризована вздовж напрямку W. На одну сторону пластини нанесені два позитивні електрода, друга сторона заземлена. При русі вліво або вправо на відповідний електрод подається керуючий синусоїдальний сигнал високої частоти (в

діапазоні від 100 до 200 кГц). Під дією прикладеної напруги п'єзокерамічна пластина деформується (рис. 3, б), змушуючи переміщатися прикріплений до неї штовхач. Площі областей Sin(out) та Free рівні між собою. Для полегшення розрахунків кожна область (позначено червоним кольором) є квадратом. І якщо зробити прив'язку до рис. 2, то розміри $b=l$.

В [12] запропоновано каскадну модель п'єзоелектричного приводу, яка враховує гістерезисну нелінійність, де враховані такі параметри: переміщення; параметр корекції; частота системи; коефіцієнт затухання; напруга, яка подається; нормалізована зовнішня сила, яка подається на привод. Однак ця модель не дозволяє оцінити процеси в осциляторі. В [8, 9] було запропоновано універсальну модель осцилятора, яку може бути застосовано для п'єзоелементів з подовжньою та поперечною поляризацією.

Для розробки субмоделі ПР ЛПД було застосовано програмне забезпечення від компанії SimInTech. (Модуль: SimInTech control systems simulator. Серійний номер: D63B30FDA70).

В субмоделі було застосовано ПР SP-4 [13], який виготовлено з сегнетожорсткої кераміки, з наступними параметрами: $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{33}=1250$, $h=8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $g_{31}=-11 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $\rho=7600$ кг/м³, $Y_{11}=8,3 \cdot 10^{10}$ Па, $d_{31}=-11,5 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. При розмірах ПР $b=11,3 \cdot 10^{-3}$ м, $l=11,3 \cdot 10^{-3}$ м, $h=4 \cdot 10^{-3}$ м, $m_2=0,0039$ кг, $R_{em}=50$ Ом, $K_{\Pi}=K_3=0,6$.

На рис. 4 позначені блоки: 1 – інерційно-диференційна ланка; 2, 3 – інтегратори; 4, 5 – підсилювачі; 6 – похідна; 7, 8 – порівняльні пристрої – суматори.

Параметри для цих блоків становлять: $k=0,6$, $T=1.75203E-11$; 2 – $k=257.6$; 3 – $k=1$; 4 – $k=30$; 5 – $k=2.6495675E9$; 6 – $k=0.0089$.

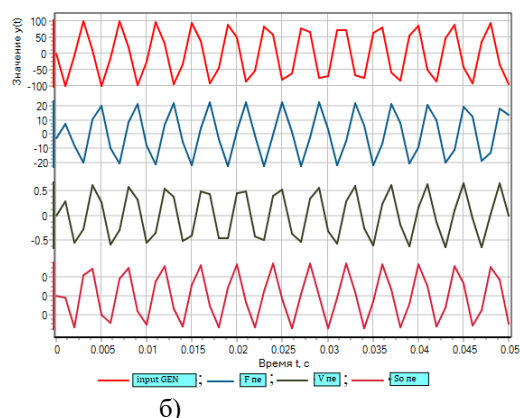
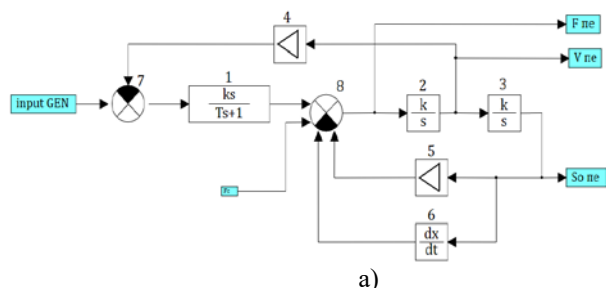


Рис. 4. Субмодель ПР (а) і графіки вхідного та вихідних сигналів (б)

Аналіз результатів моделювання довів, що при частоті вхідного сигналу (input GEN) 1305357.13 рад/с и амплітуді 100 В ПР розвиває миттєві силу $F_{pe} = 20$ Н, швидкість $V_{pe} = 0,5$ м/с та переміщення вільного кінця ПР $So_{pe} = 33$ мкм.

При розрахунках було застосовано метод діагонально неявний (DIRK2), який задається таблицею Бутчера та має 2-й порядок. Цей метод реалізований також і в системі MATLAB / Simulink під назвою Ode23tb. Як зазначає сам розробник програмного забезпечення, реалізація цього методу в SimInTech і в MATLAB різняться, внаслідок чого можуть трохи відрізнятись і результати його застосування в цих системах.

Слід зазначити, що переважне значення мають механічні впливи з боку ЛПД на триботехнічний вузол внаслідок дії зворотного п'єзоефекту і з боку триботехнічного вузла на привід внаслідок прямого п'єзоефекту. Адже саме величина прямого п'єзоефекту дозволяє оцінити навантаження ЛПД з боку триботехнічного вузла, яке проявляється в уповільненні лінійної швидкості рухомої частини ЛПД. А це, в свою чергу, дозволяє здійснити перехід від конструкції двох рухомих співвісних циліндрів до конструкції з рухомих і нерухомих циліндрами. Розрахунок осцилятора ЛПД дає змогу забезпечити підвищену чутливість до зміни навантаження в широкому діапазоні.

В [1] доведено, що при малих впливах ЛПД є квазілінійною ланкою, а при великих – нелінійною ланкою зі змінними розподіленнями параметрами.

Нами запропоновано використання цього ЛПД в структурній схемі ВЗ (рис. 5).

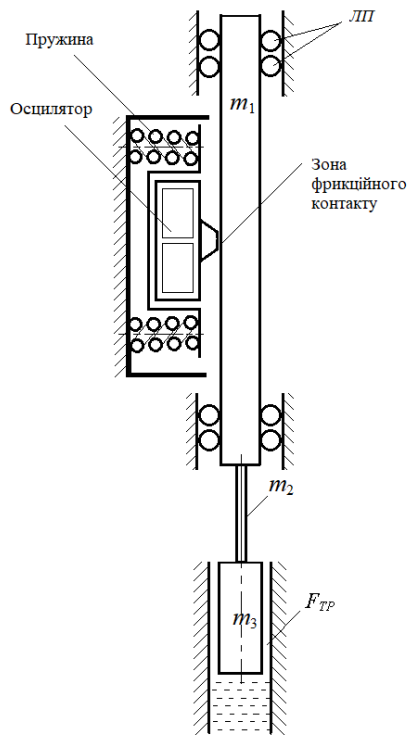


Рис. 5. Структурна схема ВЗ з одним осцилятором

Слід зазначити, що математичний опис поведінки цих ПЕ відсутній. В усіх роботах зазначається, що моделювання здійснюється для одновимірних моделей.

В [6] наведено конструкцію двигуна, де область Active (див. рис. 3, б) можна замінити на два ПР. Тому нами в подальшому було запропоновано замінити при побудові моделі ВЗ один загальний осцилятор на три. Лавриненко В. В. [7] була розроблена теорія фрикційного контакту, відповідно до якої було висунуто припущення, що коефіцієнт тертя k є величиною сталою і не залежною від напрямку прямивання, а також розглянуто чотири можливі стани фрикційного контакту: I – зона розгону тіла $T2$; II – зона гальмування; III – зона порушення фрикційного контакту; IV – зона гальмування. Усі чотири зони в сумі дорівнюють періоду коливань тіла $T1$.

Нами було прийняте припущення, що всі чотири зони мають рівний час. Тоді простий підрахунок доводить, що зона розгону

тіла $T2$ становить 90 від усього періоду коливань. На рис. 6 зображено, як здійснюється розподіл по зонах.

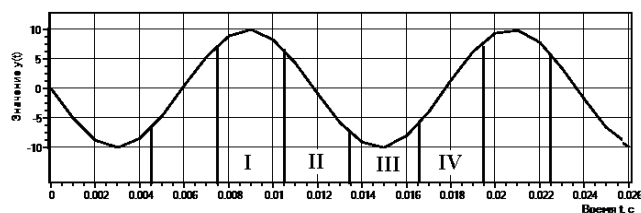


Рис. 6. Зони фрикційного контакту

Нами було розроблено блок та субмодуль фрикційного контакту (рис. 7).

При створенні субмодуля фрикційного контакту були задіяні базові блоки з бібліотеки SimInTech: керований синусоїдальний генератор; виділення максимуму з формуванням ознаки; імпульсна функція; RS-тригер. На рис. 8 наведено часові графіки роботи субмоделі фрикційного контакту (ФК).

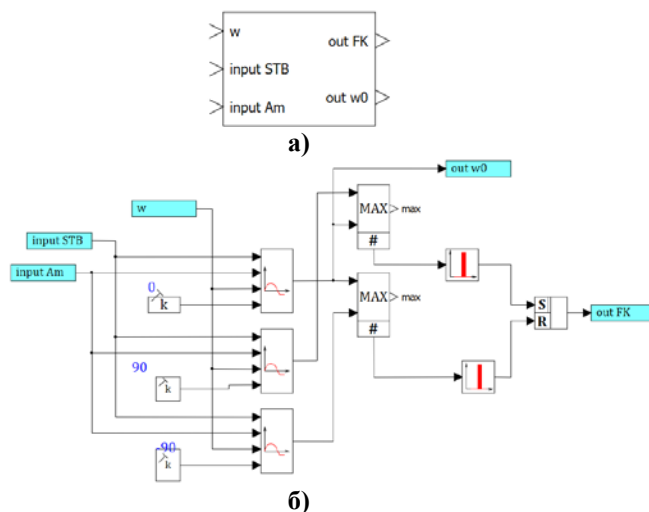


Рис. 7. Блок (а) та субмодель фрикційного контакту (б)

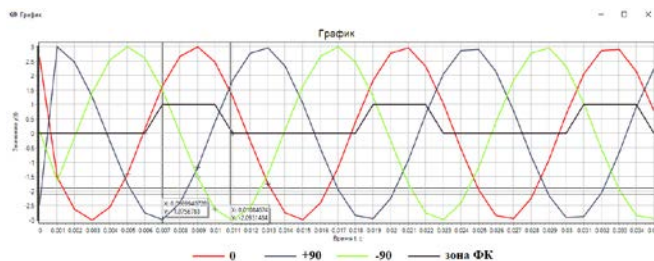


Рис. 8. Часові графіки роботи субмодуля фрикційного контакту

Однак фрикційний контакт можна реалізувати іншим шляхом. В такому випадку застосовано два типи блоків (рис. 9, а): більш або рівно; інтегратор.

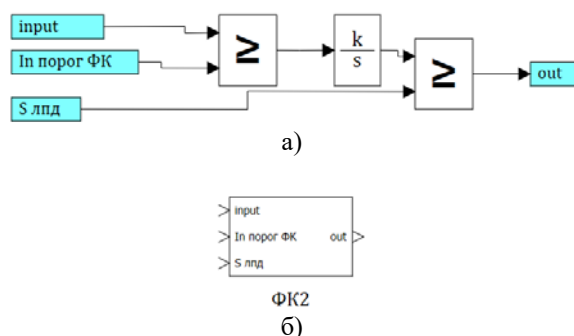


Рис. 9. Другий варіант субмодуля
фрикційного контакту (а)
та його зображення (б)

Робота блока полягає в наступному. На вхід першого блока порівняння подано два сигнали: So пе на вхід Input субмодуля; константа на In поріг ФК, яка задає поріг порівняння і визначається експериментально. З виходу цього блока сигнал надходить на інтегратор, призначення якого – підрахунок імпульсів. Слід зазначити, що кожний імпульс у цьому випадку – це мінімальний крок ЛПД. Підрахунок інтегратором цих кроків дає відстань, на яку буде переміщено рухомий циліндр. У разі застосування ЛПД LPM-5 відстань, на яку можливо здійснити пересування рухомого циліндра, становить 0,02 м. Тому наступний за інтегратором блок порівняння видає сигнал, коли відстань пересування рухомого циліндра буде порівнянною з константою на вході S лпд, в цьому випадку 0,02 м.

Ідея застосування цього блока полягає в тому, що у випадку збільшення амплітуди сигналу So пе буде збільшуватися час першої зони ФК. Внаслідок цього буде зменшуватися час для проходження рухомого циліндра на відстані 0,02 м.

Слід зазначити, що при частоті ударів, вищій 25 Гц, настає явище неперервного руху. Зазвичай для досягнення максимального ККД частота осцилятора наближається до резонансної [1]. Оскільки ЛПД працюють в безпосередній близькості від людини, то коливання повинні бути вищими 22 кГц. На практиці коливання осцилятора здійснюється на частотах від 50 кГц. Тому можна вважати, що ударні (крокові) коливання перетворюються на квазілінійні.

Тому для отримання середнього значення було застосовано третю модель ФК (рис. 10).

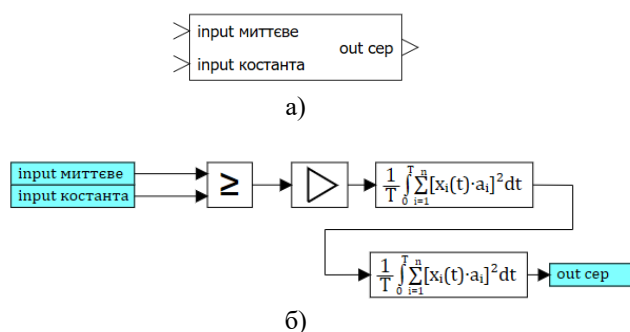


Рис. 10. Третій варіант ФК

Нами було проведено моделювання процесів у цьому субмодулі (рис. 11).

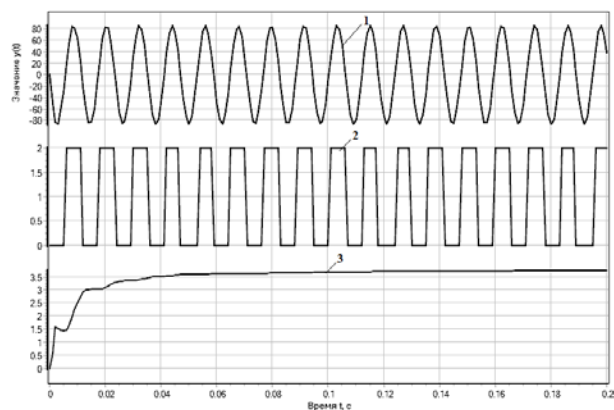


Рис. 11. Результати моделювання третього
варіанта субмодуля ФК: 1 – вхідний сигнал;
2 – сигнал після підсилювача; 3 – вихідний сигнал

Аналіз результатів моделювання довів, що при миттєвому значенні амплітуди зусилля 80 Н (1) ЛПД розвиває середнє зусилля (4) 3,55 Н через 10 імпульсів. Тобто, на усталений режим двигун виходить через 12 мкс. На графіку зображений час t (с) – це машинний час виконання розрахунків.

Надалі для створення моделі ВЗ нами запропоновано замінити один ПР (рис. 3) на три ПР (рис. 12, а) з поперечною поляризацією, де PP_1 виконує функцію заклинювання, PP_2 пересуває рухомий циліндр зверху-вниз, а PP_3 – знизу-вверх. Рухомі частини масою m_1 рухаються в лінійних підшипниках, до неї приєднані штанга масою m_2 та рухомий циліндр m_3 . Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 – переміщення вільних кінцівок PP_1 , PP_2 , PP_3 відповідно. Цю модель можна поділити на дві частини залежно від напрямку руху. На рис. 12, б зображено модель при русі вниз, а на рис. 12, в – при русі вгору.

Моделі на рис. 12, б і в можна звести до одновимірних механічних моделей.

Для обліку реальних властивостей ВЗ створено модель осцилятора із зосереджени-

ми параметрами, яка еквівалентна об'єкту з розподіленими параметрами за частотою власних коливань. Такі моделі складаються для триботехнічного вузла з наступним їхнім об'єднанням у спільну модель усієї системи.

Оскільки ЛПД в механічних моделях використовує один осцилятор (рис. 5), то умови рівноваги сил [8], прикладених до рухомої границі активної частини ПР, при русі вверх становлять:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_C - F_{\text{тяжіння}} - F_{\text{тертя}}. \quad (1)$$

При русі вниз:

$$F_y = F_E - F_d - F_{\text{дин}} - F_C + F_{\text{тяжіння}} - F_{\text{тертя}}, \quad (2)$$

де $F_y = K_{\Pi} \Delta$ – зусилля пружної деформації ПР, Н; $F_E = d_{\Pi} Y_{11} S_0 E$ – зусилля в ПР, викликане прикладеним електричним полем, Н; F_C – статичне зусилля, яке діє з боку ВО, Н; $F_d = K_d d \Delta / dt$ – зусилля, що демпфує, у ПР, Н; $F_{\text{дин}} = m_{\Sigma} d^2 \Delta / dt^2$ – динамічне зусилля в ПР, яке пропорційне швидкості зсуву поршня і викликаним при цьому процесам дисипації енергії в осциляторі, Н; $F_{\text{тяжіння}} = (m_1 + m_2 + m_3)g$ – сила тяжіння, Н; $K_{\Pi} = Y_{11} S_0 / l_0$ – коефіцієнт пружності ПР, Н/м; K_d – коефіцієнт внутрішнього демпфування ПР, кг/с; $m_{\Sigma} = m_1 + m_2 + m_3$ – еквівалентна приведена сумарна маса рухомих частин, кг; Δ – деформація ПР, мм; l_0 – початкова довжина ПР, мм; σ – механічна напруга, Н/м²; Y – модуль Юнга, Н/м²; d_{Π} – п'єзомодуль, Кл/Н; E – напруга електричного поля, В/м; $C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_{33} (1 - ((d_{31})^2 Y_{11} / (\varepsilon_0 \varepsilon_{33}))^2) S_0 / l_0$ – ємність ПР, Ф; $K_{\Pi} = K_y d_{\Pi}$ – коефіцієнт прямого п'єзоэффекту, К/м; $U = E l_0$ – напруга, прикладена до електродів ПР, В; $V = d \Delta / dt$ – швидкість виконавчого органа, м/с; $K_{EM}^2 = d_{\Pi}^2 Y / (\varepsilon_0 \chi)$ – коефіцієнт електромеханічного зв'язку; $K_3 = Y S_0 d_{\Pi} / l_0 = K_y d_{\Pi}$ – коефіцієнт зворотного п'єзоэффекту, Н/В. Відзначимо, що коефіцієнти зворотного і прямого п'єзоэффектів рівні між собою. $F_{\text{тертя}} = \eta \cdot S \cdot \Delta V / \Delta h$ – сила тертя, яка виникає в триботехнічному вузлі, Н; η – динамічна в'язкість, Па·с; S – площа рухомого циліндра, м²; $\Delta V / \Delta h$ – градієнт швидкості, с⁻¹.

На підставі рівнянь [8] було складено загальну структурну схему ВЗ (рис. 13, а), та субмодель у середовищі SimInTech (рис. 13, б) при $\eta = 10$ Па·с.

Для ПР із поперечною поляризацією, який застосовано в ЛПД LPM-5, основні параметри кераміки SP-4 [13] становлять: $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\varepsilon_{33} = 1250$, $h = 8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $g_{31} = -11 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $\rho = 7600$ кг/м³, $Y_{11} = 8,3 \cdot 10^{10}$ Па, $d_{31} = -11,5 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. При розмірах ПР $b = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $m_3 = 0,027$ кг, $R_{\text{вт}} = 50$ Ом, $K_{\Pi} = K_3 = 0,6$. Основні співвідношення коефіцієнтів, які входять до структурної схеми (рис. 13, б), мають такі значення: $R_{\text{вт}} \cdot K_{\Pi} = 30$, $C_0 = 2,195 \cdot 10^{-13}$ Ф; $R_{\text{вт}} C_0 = 1,098 \cdot 10^{-11}$ с; $m_{\Sigma} = 0,0038$ кг; $f_p = 100$ кГц; $m_k = 0,015$ кг.

В [1, 2, 3, 5, 6, 10, 11] наведено дані, згідно з якими управління п'єзоелектричними двигунами здійснюється наступними методами: амплітудний, частотний, фазовий та широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Слід зазначити, що три перші методи почали застосовуватися з 80-х років минулого століття. Пристрої управління є дуже складними та громіздкими. Найбільш вживаним з них залишився амплітудний метод. Однак з початку 2000 років широкого застосування набула широтно-імпульсна модуляція завдяки поширенню контролерів, які працюють у жорсткому реальному часі, та спеціальним додатковим модулям. Це дозволило застосовувати як апаратну, так і програмну реалізацію ШІМ.

Крім того, слід зазначити, що схеми перетворювачів постійної напруги в змінну для живлення ЛПД на фіксованих частоті та амплітуді в 2-3 рази дешевші, ніж у випадку застосування амплітудного методу.

Тому нами було проведено доробок моделі на рис. 13, б шляхом вмикання схеми блока логічного ключа (#) в ланку між генератором коливань та входом субмоделі осцилятора (рис. 14).

На рис. 15 зображено результати моделювання для режимів роботи залежно від коефіцієнта заповнення імпульсу: 0,1 (а); 0,9 (б).

Це підтвердило, що чим менша кількість елементарних кроків ПР за одиницю часу, тим більше часу потрібно для пересування рухомого циліндра.

Аналіз отриманих результатів довів, що застосування ШІМ дуже ефективно змінює силу, швидкість та відстань, на яку пересувається рухома частина.

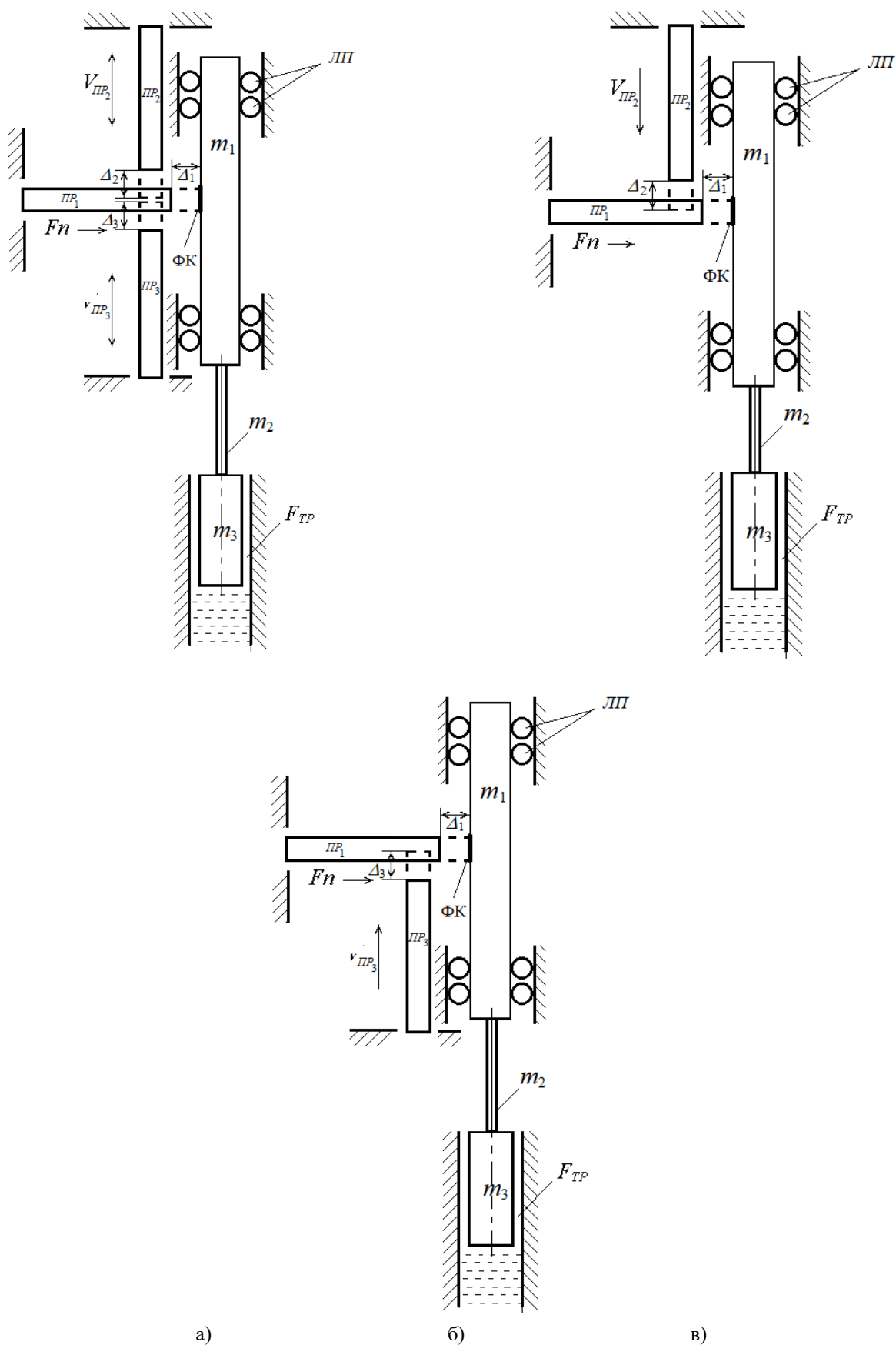


Рис. 12. Модель ВЗ: а – з трьома ПР; б – з двома ПР при русі вниз; в – з двома ПР при русі вверх

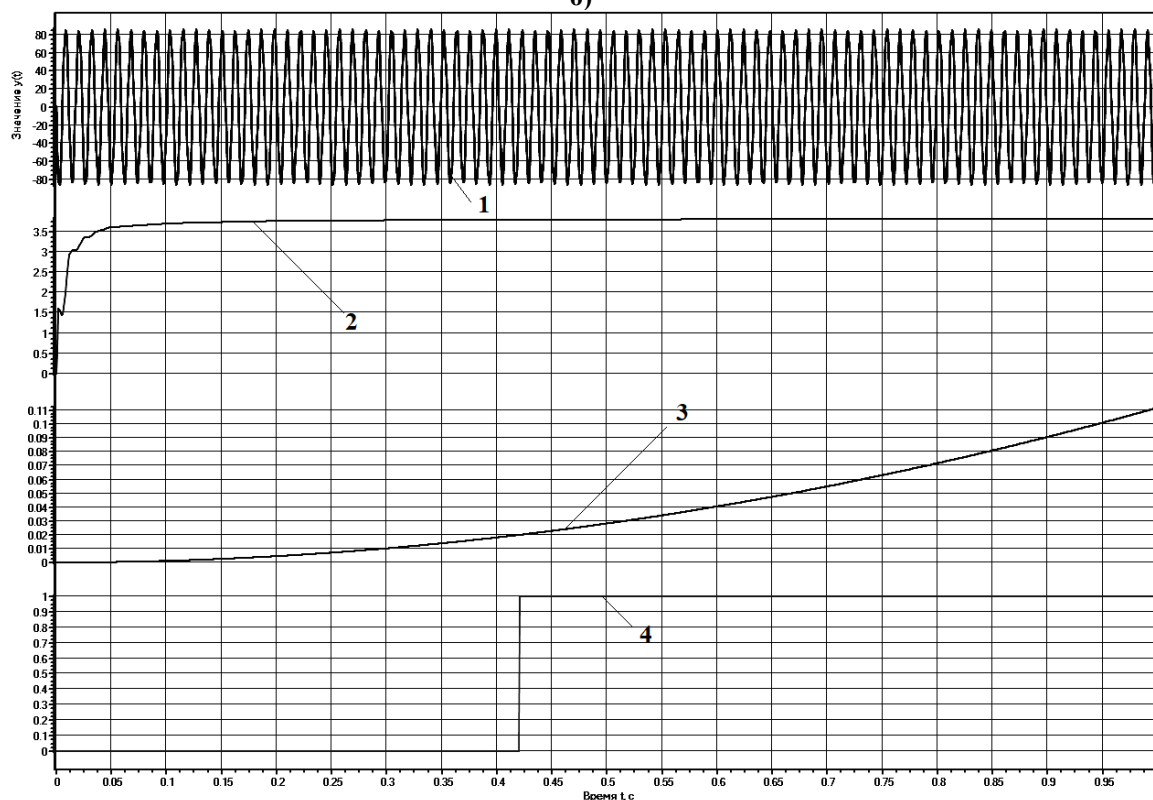
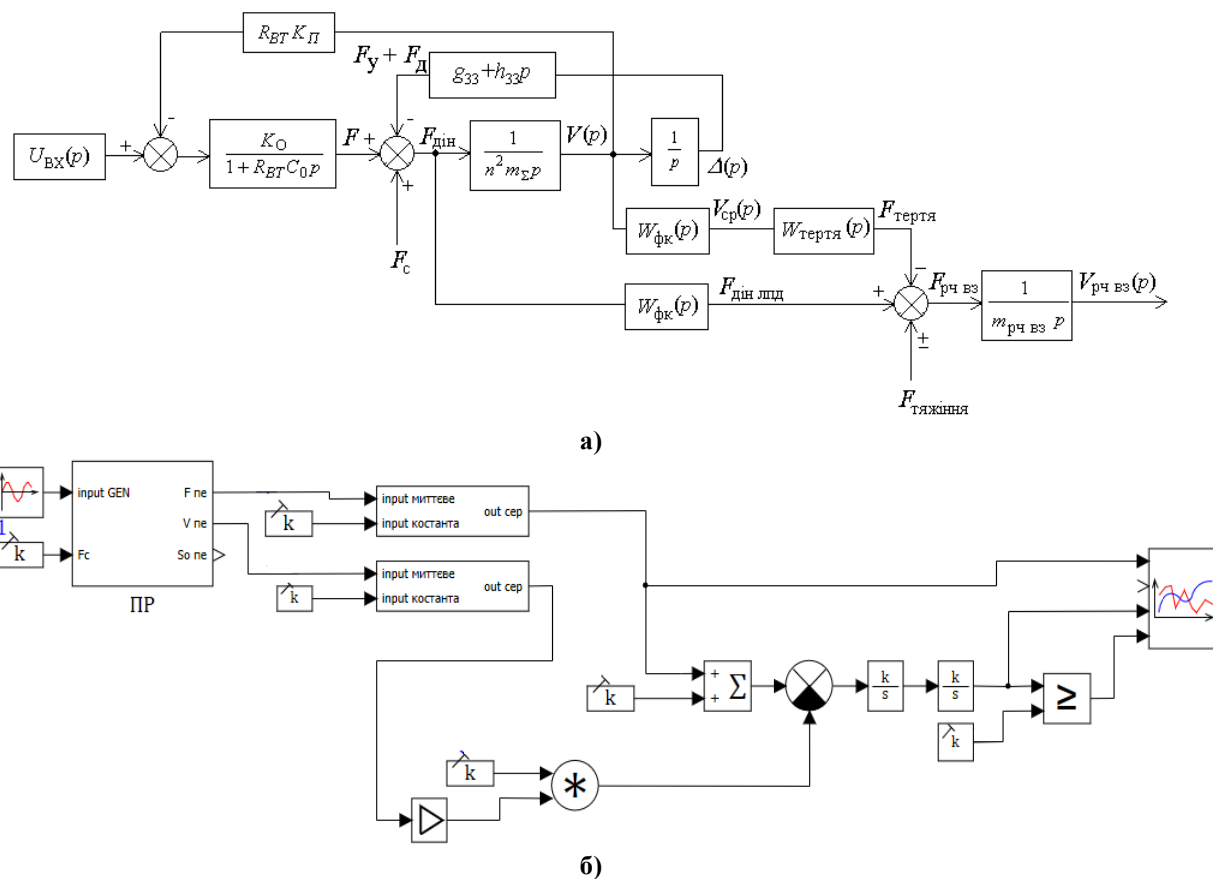


Рис. 13. Структурна схема (а) та модель (б), результати моделювання (в) ВЗ комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин: 1 – миттєве значення сили; 2 – середня сила; 3 – відстань, на яку може бути переміщений рухомий циліндр; 4 – час переміщення циліндра

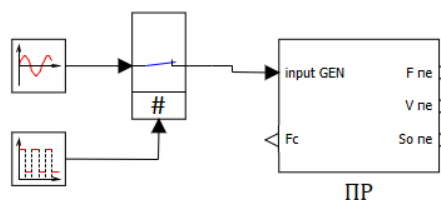
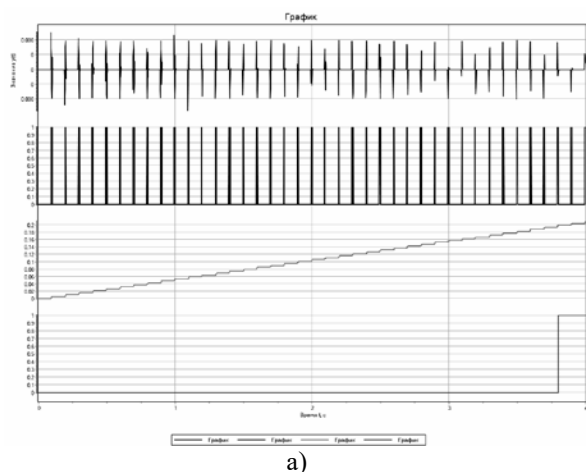
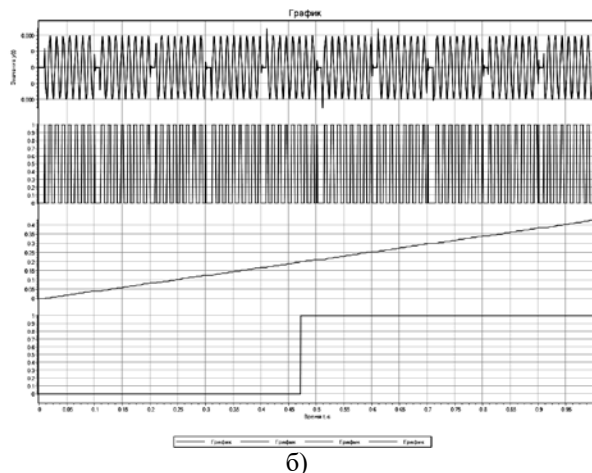


Рис. 14. Схема організації ШІМ



а)



б)

Рис. 15. Часові діаграми роботи моделі ВЗ при застосуванні для управління ЛПД ШІМ

Отримана модель дозволяє синтезувати методику проектування ВЗ на співвісних циліндрах з ЛПД комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик з урахуванням фізико-хімічних властивостей палива, залежно від розмірів розпилювача форсунки, відповідальних вузлів ПА (V , F , Δh , S); попереднього вибору лінійних розмірів п'єзоелементів; побудови амплітудно-частотної характеристики; аналізу чутливості й уточнюючого розрахунку осцилятора з метою коректування їх характеристик часу.

1. Визначаються розміри рухомого циліндра ВЗ. Задаються значення радіуса рухо-

мого циліндра $R_{ц}$ і знаходиться його довжина $l_{ц} = S / (2 \cdot \pi \cdot R_{ц})$.

2. Визначається маса рухомого циліндра та елементів, які з'єднують рухомий циліндр з ЛПД.

3. За максимальною швидкістю визначаються розміри осцилятора, попередньо задавши три розміри l , b та h .

4. Знаходиться частота резонансу осцилятора.

5. Попередньо розраховуються швидкості і зусилля, що розвиваються ЛПД для заданого діапазону зміни керуючої напруги.

6. Будується графік часу роботи ВЗ.

7. У випадку малої чутливості запроваджується уточнюючий розрахунок шляхом зміни розмірів і властивостей матеріалу осцилятора та конструкції рухомого циліндра.

На основі моделі ВЗ розроблено методику визначення реологічних характеристик і коефіцієнтів динамічної в'язкості за часом проходження рухомого циліндра ВЗ:

1. Визначаємо час проходження рухомого циліндра на холостому ході на фіксованих швидкостях, які співвідносяться з коефіцієнтом заповнення імпульсу ШІМ.

2. Задаємо момент навантаження ЛПД шляхом приєднання триботехнічного вузла з досліджуваною рідиною та визначаємо часові характеристики для усього діапазону швидкостей, які обрано в попередньому пункті.

3. Будуємо графік залежності часу проходження рухомого циліндра від швидкостей.

4. Змінюємо температуру та проводимо виміри часу для усього діапазону швидкостей.

5. Будуємо графік залежності часу від температури.

Висновки. Синтезовано кінематичну схему вимірювального зонда комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик на співвісних циліндрах, які розташовані вертикально, та приводом на лінійному п'єзоелектричному двигуні.

Набула подальшого розвитку модель фрикційного контакту з ЛПД, що дозволило розробити модель вимірювального зонда для лабораторних вимірювань та реалізувати електронне моделювання пристроїв для їх ефективного проектування.

Вдосконалено методику проектування вимірювального зонда на співвісних циліндрах, до складу яких входять лінійний п'єзопривід і триботехнічний вузол із зазором $10 \div 25$ мкм, що дозволяє створити пристрої з

заданими конструктивними розмірами і чутливістю, які враховують особливості технологічного процесу в паливній апаратурі.

Вдосконалено методику побудови реологічних характеристик, які залежать від часу проходження рухомого циліндра, та визначено на їх основі коефіцієнти динамічної в'язкості судових технічних рідин.

Вірогідність отриманих результатів підтверджена при електронному моделюванні в SimInTech.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості проектування вимірювальних зондів віскозиметрів і реометрів на співвісних циліндрах, процеси в яких подібні процесам у реальних триботехнічних вузлах паливної апаратури ДВЗ.

Список літератури

1. Давлеталиев Д. А. Исследование пьезодвигателей и разработка устройств адаптивного управления на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / ЛПИ. Ленинград, 1985. 217 с.
2. Джагупов Р. Г., Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: справочник. Санкт-Петербург: Политехника, 1994. 608 с.
3. Ерофеев А. А. Пьезоэлектронные устройства автоматики. Ленинград: Машиностроение, 1982. 212 с.
4. Разработка и исследование систем электропитания и устройств автоматики на базе пьезоэлектронных трансформаторов и пьезокерамических матриц / А. А. Ерофеев, А. А. Ушаков, В. С. Акопян и др. Научно-технический отчет по теме «Финиш – «РВО» (№ 801705). ЛПИ им. М. И. Калинина. Ленинград: ЛПИ, 1982. 430 с.
5. Коваленко В. А. Пьезоэлектрический двигатель вращения – как элемент автоматических систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. Москва, 1998. 173 с.
6. Лавриненко В. В., Карташев И. А., Вишневецкий В. С. Пьезоэлектрические двигатели. Москва: Энергия, 1980. 112 с.
7. Лавриненко В. В. Теория фрикционного контакта пьезоэлектрического двигателя. *Диэлектрики и полупроводники*: науч.-техн. сб. Вып. 28. Киев: КПИ, 1985. С. 26–33.

8. Никольский А. А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
9. Никольский В. В. Основы створення пристроїв п'єзоактивної механіки для систем керування двигунами внутрішнього згоряння: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.05. Одеса, 2005. 230 с.
10. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. Киев: Корнийчук, 2002. 96 с.
11. Пьезодвигатели. Physik Instrumente. URL: <http://www.eurotek-general.ru/support/technical-information-about-the-products/Пьезоэлектрические%20двигатели/>
12. Хавин В. Л., Лавриненко И. С. Моделирование пьезоэлектрического привода для компенсации погрешностей прецизионной механической обработки биополимеров. *Високі технології в машинобудуванні*. Вип. 1 (23). Харків, 2013. С. 220–224.
13. Piezoelectric properties. URL: www.sparklceramics.com/piezoelectricproperties.html (дата звернення: 06.08.2018).
14. Никольский М. В. Бережной К. Ю. Пьезоэлектрический вискозиметр. *Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. Серія: «Комп'ютерні технології»*. Вип. 275. Т. 287. Миколаїв, 2016. С. 60–63.

References

1. Davletalyev, D. A. (1985) Study of piezoelectric motors and development of adaptive control devices based on them: thesis for Ph.D.: 05.13.05 / LPI. Leningrad. 217 p. [in Russian].
2. Dzhahupov, R. H., Erofeev, A. A. (1994) Piezoelectronic devices of computer facilities, control and management systems. St.-Petersburg: Politekhnik, 608 p. [in Russian].
3. Erofeev, A. A. (1982) Piezoelectronic devices of automatics. Leningrad: Mashynostroeniye, 212 p. [in Russian].
4. Erofeev, A. A., Ushakov, A. A., Akopian, V. S. et al. (1982) Development and research of power supply systems and automation devices based on piezoelectric transformers and piezoceramic matrices. Scientific and technical report on the topic

- "Finish – RVO" (№ 801705). Leningrad: LPI, 430 p. [in Russian].
5. Kovalenko, V. A. (1998) Piezoelectric motor of rotation – as an element of automatic systems: thesis for Ph.D.: 05.13.05. Moscow, 173 p. [in Russian].
 6. Lavrinenko, V.V., Kartashev, I. A., Vishnevskiy, V. S. (1980) Piezoelectric motors. Moscow: Energiya, 112 p. [in Russian].
 7. Lavrinenko, V. V. (1985) Theory of frictional contact of a piezoelectric engine. *Dielectrics and semiconductors*. Kiev: KPI, № 28, pp. 26–33 [in Russian].
 8. Nikolskiy, A. A. (1988) Precise two-channel servo drives with piezocompensators. Moscow: Energoatomizdat, 160 p. [in Russian].
 9. Nykolskiy, V. V. (2005) Foundations of the creation of the structure of piezoactive mechanics for the systems of internal combustion engines control: thesis for D.Sc.: 05.13.05. Odesa, 230 p. [in Ukrainian].
 10. Petrenko, S. F. (2002) A piezoelectric motor in the instrument. Kiev: Korniiichuk, 96 p. [in Russian].
 11. Piezomotor's, Physik Instrumente. URL: <http://www.eurotek-general.ru/support/technical-information-about-the-products/Пьезоэлектрические%20двигатели/>
 12. Khavin, V. L., Lavrinenko, I. S. (2013) Simulation of a piezoelectric drive to compensate for errors in the precision machining of biopolymers. *Vysoki tehnolohiyi v machynobuduvanni*. Kharkiv, № 1 (23), pp. 220–224 [in Russian].
 13. Piezoelectric properties. URL: www.sparklceramics.com/piezoelectricproperties.html
 14. Nikolskiy, M. V. Bereznoi, K. Yu. (2016) Piezoelectric viscometer. *Naukovi pratsi ChDU im. Petra Mohyly. Seriya: "Compyuterni tehnolohiyi"*. Vol. 275, t. 287. Mykolayiv, pp. 60–63 [in Russian].

V. V. Nikolskiy , *Dr.Tech.Sc., professor,*
K. Yu. Bereznyi, *postgraduate student*
 National University "Odesa Maritime Academy"
 Didrikhson str., 8, Odesa, 65029, Ukraine

MODEL OF MEASURING PROBE OF COMPUTER SYSTEM FOR DETERMINING RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SHIP'S TECHNICAL LIQUIDS

Increase of requirements to emission of harmful substances into the environment by ship's low-speed diesel engines requires continuous improvement of fuel system efficiency. This requires a more advanced definition of not only the coefficients of viscosity, but also rheological characteristics.

The purpose of the article is to create a model of measuring probe of computer system for determining rheological characteristics of ship's technical liquids, to establish the relations of its components and their effect on measuring characteristics.

A kinematic scheme of measuring probe with two oscillators with transverse polarization is created. The developed model of measuring probe with one oscillator takes into account the processes in three main units of the probe: linear oscillator, friction contact and gear technical unit. Three variants of refinement of frictional contact model are proposed. The transition to a linear model with one oscillator is implemented. In order to control the linear piezoelectric motor, pulse-width modulation is chosen.

The model of measuring probe of computer system, which allows to develop methods of calculation and determination of coefficients of dynamic viscosity, rheological characteristics, is created.

Keywords: computer system, linear piezoelectric motor, friction contact, SimInTech.

О. А. Тригуб, к.т.н., доцент,
e-mail: toa_oks@ukr.net

А. П. Солтус, д.т.н., професор,
e-mail: ate_chdtu.edu.ua

Д. В. Рудь, студент
e-mail: ate_chdtu.edu.ua

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

ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ СТАНЦІЙ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ У М. ЧЕРКАСИ

Сучасні ринкові умови, що характеризуються посиленням жорсткості конкурентної боротьби, формують передумови для забезпечення максимальної наближеності послуг автосервісних підприємств до вимог клієнтів. Тільки за цих умов вони будуть мати певну споживчу цінність – сукупність їх корисних властивостей. Згідно з аналізом фахівців автотранспортної галузі за даними останніх досліджень на перше місце ставляться такі показники конкурентоспроможності станцій технічного обслуговування (СТО), як підвищення якості виконуваних послуг, скорочення часу виконання замовлень, застосування гнучкої цінової політики. Однак з точки зору клієнта і працівника СТО, ранжування споживчих цінностей послуг може бути різним і залежати від різних факторів: фінансового достатку, регіональності СТО, орієнтованості СТО, суб'єктивних потреб та ін.

Ключові слова: споживчі цінності, ранг, конкурентоспроможність, експертне опитування, станція технічного обслуговування.

Вступ. Сучасні ринкові умови, що характеризуються посиленням жорсткості конкурентної боротьби, створюють передумови для забезпечення максимальної наближеності послуг автосервісних підприємств до вимог клієнтів. Тільки за цих умов вони будуть мати певну споживчу цінність – сукупність їх корисних властивостей (характеристик). Тому завдання визначення споживчої цінності послуг станцій технічного обслуговування (СТО) має велике значення. Викликом для сучасних транспортних технологій є пошук шляхів і розробка інструментарію забезпечення підвищення якості усіх суб'єктів, включаючи інфраструктуру.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження вчених [1]–[4] свідчать, що цінність послуги визначається її якістю. Так, Марков О. Д. наводить перелік показників конкурентоспроможності автосервісних підприємств, в якому виділяє такі компоненти: якість технічного обслуговування (ТО) та ремонту, якість запасних частин (ЗЧ) та гарантія

на ЗЧ. Такі показники, як ціна, ставлення до клієнта та терміни виконання послуг, автор відносить до другорядних, а такі показники, як гарантія на ремонт, довіра та відстань до СТО, взагалі наводяться як найменш важливі за рейтингом.

У статті Буреннікова Ю. Ю. [2] на перше місце ставляться такі показники конкурентоспроможності СТО, як підвищення якості виконуваних послуг, скорочення часу виконання замовлень, застосування гнучкої цінової політики та підвищення загальної культури та репутації СТО.

Закордонний досвід вказує на такі ж позиції. Хаксевер К. в своїй роботі [3] наголошує, що для забезпечення конкурентоспроможності у сфері надання послуг необхідно забезпечувати їх високу якість, прийнятну ціну та терміни виконання.

В той же час конкурентоспроможність СТО напряму залежить від клієнтоорієнтованості, а ранжування споживчих цінностей послуг з точки зору клієнта і працівника СТО,

відповідно, може бути різним і, в свою чергу, залежати від різних факторів. Вибір СТО клієнтом залежатиме як від його фінансового достатку, так і від територіальності СТО, в той час як формування політики надання послуг власником СТО базуватиметься на орієнтованості СТО (тип послуг, модельний ряд, фінансова спроможність клієнта та ін.).

Мета статті. Автори статті поставили за мету провести ранжування суб'єктивних споживчих цінностей, що формують конкурентоспроможність СТО з точки зору клієнта і з точки зору працівника. Для проведення ранжування суб'єктивних цінностей обрано метод експертних оцінок.

Виклад основного матеріалу. Вимога системності підходу до визначення рангу споживчих цінностей припускає розглядати їх як систему, спрямовану на задоволення вимог споживачів. Основним засобом впливу на задоволення вимог споживачів є елементи комплексу маркетингу: послуга, ціна, розповсюдження, комунікації, персонал, матеріальні засоби та процес надання послуги. Крім того, системність підходу припускає врахування максимально повної кількості факторів, що потребує розширення кількості параметрів послуги з одночасним їх поділом на основні, які визначають її споживчу цінність, та другорядні, що не мають суттєвого впливу на зміну споживчої цінності послуги [5].

Перелік показників встановлюємо на підставі узагальнення існуючих наукових робіт та власних досліджень. Пропонується розглянути такі споживчі показники: якість робіт з ТО і ремонту, освіта працівників, терміни виконання замовлень, ставлення до клієнтів, ціна послуг, наявність акцій, гарантія на виконані роботи, розташування СТО (відстань до СТО), наявність реклами СТО в засобах масової інформації, зовнішня привабливість СТО (естетика).

Для проведення ранжування суб'єктивних цінностей обрано метод експертних оцінок – спосіб прогнозування та оцінювання майбутніх результатів дій на основі прогнозів фахівців [6], [7]. Особливістю цього методу є відсутність строгих математичних доказів оптимальності рішень. Загальною спрямованістю цього методу є використання

людини як «вимірювального» приладу для одержання кількісних оцінок процесів і суджень, що через неповноту і невірогідність наявної інформації не піддаються безпосередньому виміру.

При визначенні кількості експертів запропоновано використовувати «прагматичний» підхід, що наведений у роботі Є. П. Голубкова [8]. Сутність цього підходу полягає в тому, що кількість експертів має бути не меншою від кількості оцінюваних показників. Для ранжування споживчих цінностей, які, на думку споживачів, є визначальними при виборі СТО, опитали 35 респондентів – клієнтів СТО у м. Черкаси. Для ранжування споживчих цінностей, які, на думку працівників СТО, є визначальними при виборі СТО клієнтом, опитали 25 респондентів, що працюють на тих же автосервісних підприємствах м. Черкаси, де проводилося опитування клієнтів-автовласників (табл. 1).

Після опрацювання анкет проведено обробку результатів. Визначено суму рангів по кожному показнику споживчих цінностей:

$$R_j = \sum_{i=1}^m r_i,$$

де r – ранг, виставлений експертом;
 j – номер показника споживчої цінності;
 m – кількість респондентів.

Визначено відхилення суми рангів по кожному показнику від середньої суми рангів:

$$\Delta_j = R_j - \frac{\sum_{j=1}^k R_j}{k},$$

де k – кількість показників споживчих цінностей.

За сумою рангів визначено ранги послідовності споживчих цінностей.

За допомогою коефіцієнта конкордації W оцінено ступінь узгодженості думок експертів [9]:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)},$$

де S – сума квадратів відхилення рангів:

$$S = \sum_{j=1}^k \Delta_j^2.$$

Результати опитування та опрацювання даних наведено в табл. 2 і 3.

Згідно з отриманими результатами ранжування споживчих цінностей послуг СТО має такий вигляд:

Таблиця 1

Результати ранжування споживчих цінностей

<i>Ранги споживчих цінностей послуг СТО, виставлені працівниками</i>	<i>Ранги споживчих цінностей послуг СТО, виставлені споживачами</i>
1. Ціна послуг 2. Якість робіт з ТО і ремонту 3. Терміни виконання замовлень 4. Зовнішня привабливість СТО (естетика) 5. Освіта працівників 6. Ставлення до клієнтів 7. Гарантія на виконані роботи 8. Розташування СТО (відстань до СТО) 9. Наявність акцій 10. Наявність реклами СТО в ЗМІ	1. Якість робіт з ТО і ремонту 2. Ціна послуг 3. Терміни виконання замовлень 4. Зовнішня привабливість СТО (естетика) 5. Розташування СТО (відстань до СТО) 6. Освіта працівників 7. Гарантія на виконані роботи 8. Наявність акцій 9. Наявність реклами СТО в ЗМІ 10. Ставлення до клієнтів

Для ранжування споживчих цінностей з точки зору працівників СТО коефіцієнт конкордації становив

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)} = \frac{12 \cdot 12256,5}{25^2(10^3 - 10)} = 0,24.$$

Для перевірки значущості коефіцієнта конкордації обчислено значення критичної точки за формулою:

$$\chi^2_{\text{факт}} = W \cdot m(k - 1) = 0,24 \cdot 25(10 - 1) = 54$$

Згідно з таблицею Пірсона [10], для рівня значущості 0,05 та степені свободи

$$q = (k - 1) = 10 - 1 = 9,$$

критичне значення $\chi^2_{\text{кр}} = 23,6$.

Умова $\chi^2_{\text{факт}} \geq \chi^2_{\text{кр}}$ виконується, тому коефіцієнту конкордації можна довіряти, і отримані на його основі висновки достовірні.

Для ранжування споживчих цінностей послуг з точки зору споживачів СТО коефіцієнт конкордації становив

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k)} = \frac{12 \cdot 9410,5}{35^2(10^3 - 10)} = 0,1.$$

Значення критичної точки:

$$\chi^2_{\text{факт}} = W \cdot m(k - 1) = 0,1 \cdot 35(10 - 1) = 31,5.$$

Згідно з таблицею Пірсона [10] для рівня значущості 0,05 та степеня свободи 9 критичне значення $\chi^2_{\text{кр}} = 23,6$.

Умова $\chi^2_{\text{факт}} \geq \chi^2_{\text{кр}}$ виконується, тому коефіцієнту конкордації можна довіряти, і отримані на його основі висновки достовірні.

Невисокі значення коефіцієнта конкордації свідчать про недостатню узгодженість думок як працівників, так і споживачів СТО, що може бути причиною відсутності аналізу відповідей за вибірками. Такому аналізу будуть присвячені наступні статті авторів.

Висновки. Результати ранжування показують, що і працівники, і споживачі СТО однакові у своїй думці щодо перших чотирьох пунктів: якість робіт з ТО і ремонту, ціна послуг, терміни виконання замовлень та зовнішня привабливість СТО (естетика). Саме ці показники і вважаються основними критеріями конкурентоспроможності автосервісних підприємств. При цьому варто зазначити, що згідно з нашими дослідженнями зовнішня привабливість СТО стає важливою саме за результатами останніх опитувань. Належний дизайн та оформлення інтер'єру й екстер'єру підприємства викликають додаткову довіру у споживачів. Працівники СТО, в свою чергу, також почали приділяти цьому значну увагу у контексті конкурентоспроможності підприємства.

Наступним пунктом за рангом, з точки зору працівників, є покращення сервісу, належне ставлення до клієнта. На фоні зростаючої конкуренції, вдосконалюючи культуру обслуговування, працівники намагаються не лише привабити нових клієнтів, а й утримати існуючих. Водночас споживачі послуг не надто високо оцінюють рівень сервісу, надаючи перевагу близькому розташуванню СТО. Хоча, якщо проаналізувати відповіді споживачів послуг СТО, для яких ставлення до клієнта дійсно важливе, то вони готові відвідувати автосервіс на тривалих відстанях і навіть в інших містах заради високого сервісу. Така тенденція зростає, і, можливо, найближчим часом загальна картина ранжування цінностей зміниться з урахуванням суб'єктивних чинників і зростаючих нематеріальних потреб клієнтів СТО.

Таблиця 2

Ранжування споживчих якостей СТО з точки зору працівників

ПОКАЗНИК	УМОВНИЙ НОМЕР ЕКСПЕРТА													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	РАНГ ОЦІНКИ													
Якість робіт з ТО і ремонту	1	2	6	1	2	2	3	2	2	5	8	5	3	2
Освіта працівників	5	6	9	8	4	1	4	6	5	7	5	10	4	4
Терміни виконання замовлень	3	10	10	5	7	5	8	4	3	2	4	8	8	7
Ставлення до клієнтів	8	7	4	9	8	3	6	3	9	4	9	2	1	9
Ціна послуг	2	1	5	2	3	8	1	8	1	1	3	6	2	1
Наявність акцій	9	5	3	6	6	4	5	1	4	8	10	9	6	8
Гарантія на виконані роботи	7	9	1	3	9	6	9	5	8	6	6	3	9	5
Розташування СТО (відстань до СТО)	4	4	8	7	5	10	2	9	6	3	7	1	7	10
Наявність реклами СТО в ЗМІ	10	8	7	10	10	7	7	7	10	10	1	4	10	6
Зовнішня привабливість СТО (естетика)	6	3	2	4	1	9	10	10	7	9	2	7	5	3
РАЗОМ	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55

ПОКАЗНИК	УМОВНИЙ НОМЕР ЕКСПЕРТА											СУМА РАНГІВ, R _i	ВІДХИЛЕННЯ СУМИ РАНГІВ, Δ _i	Δ _j ²	РАНГ ПОСЛІДОВНОСТІ
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25				
	РАНГ ОЦІНКИ														
Якість робіт з ТО і ремонту	7	5	3	2	1	4	4	3	8	2	3	86	-51,5	2652,25	2
Освіта працівників	2	2	7	7	5	8	7	4	4	8	8	140	2,5	6,25	5
Терміни виконання замовлень	8	3	4	1	4	6	1	7	3	3	1	125	-12,5	156,25	3
Ставлення до клієнтів	6	7	1	9	8	1	5	8	6	6	4	143	5,5	30,25	6
Ціна послуг	3	1	2	4	2	3	8	1	2	1	2	73	-64,5	4160,25	1
Наявність акцій	1	9	9	6	7	9	3	10	10	9	6	163	25,5	650,25	9
Гарантія на виконані роботи	9	6	6	3	6	7	2	5	5	5	9	149	11,5	132,25	7
Розташування СТО (відстань до СТО)	5	4	8	8	9	2	9	6	9	7	5	155	17,5	306,25	8
Наявність реклами СТО в ЗМІ	4	10	10	10	10	5	10	9	7	10	10	202	64,5	4160,25	10
Зовнішня привабливість СТО (естетика)	10	8	5	5	3	10	6	2	1	4	7	139	1,5	2,25	4
РАЗОМ	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	1375		12256,5	

Таблиця 3

Ранжування споживчих якостей СТО з точки зору споживачів

ПОКАЗНИК	УМОВНИЙ НОМЕР ЕКСПЕРТА																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	РЕЙТИНГ																				
Якість робіт з ТО і ремонту	9	5	2	7	9	7	6	4	5	5	2	2	2	7	3	6	3	3	4	6	8
Освіта працівників	5	8	5	6	1	1	3	9	7	6	7	5	1	10	4	9	2	7	6	2	2
Терміни виконання замовлень	2	3	7	8	5	9	8	2	1	4	3	4	7	9	6	3	9	1	1	7	4
Ставлення до клієнтів	4	9	10	1	10	4	5	10	10	10	10	8	4	6	7	4	6	9	9	3	10
Ціна послуг	10	10	1	4	7	5	10	6	2	7	1	1	8	4	1	1	5	10	2	9	6
Наявність акцій	8	6	9	9	2	2	2	3	9	9	5	6	9	2	8	8	8	8	8	1	5
Гарантія на виконані роботи	1	1	4	10	6	10	9	1	6	1	9	9	6	8	5	10	10	4	10	8	1
Розташування СТО (відстань до СТО)	7	2	6	5	8	8	7	5	8	2	6	7	5	5	2	2	4	6	5	5	3
Наявність реклами СТО в ЗМІ	6	7	3	2	3	3	4	7	4	8	4	10	10	3	9	5	7	5	3	4	7
Зовнішня привабливість СТО (естетика)	3	4	8	3	4	6	1	8	3	3	8	3	3	1	10	7	1	2	7	10	9
РАЗОМ	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55

ПОКАЗНИК	УМОВНИЙ НОМЕР ЕКСПЕРТА														СУМА РАНГІВ, R _j	ВІДХИЛЕННЯ СУМИ РАНГІВ, Δ _j	Δ _j ²	РАНГ ПОСЛІ- ДОВНОСТІ
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35				
	РЕЙТИНГ																	
Якість робіт з ТО і ремонту	4	3	3	4	3	3	1	3	3	7	2	1	6	3	151	-41,5	1722,25	1
Освіта працівників	7	10	1	3	5	6	4	7	7	5	8	8	1	9	187	-5,5	30,25	6
Терміни виконання замовлень	2	6	8	8	1	7	5	6	1	8	1	3	2	2	163	-29,5	870,25	3
Ставлення до клієнтів	9	4	10	9	8	2	9	8	8	2	5	6	8	5	242	49,5	2450,25	10
Ціна послуг	1	7	7	6	4	1	2	2	2	1	4	7	7	1	162	-30,5	930,25	2
Наявність акцій	5	8	4	1	9	8	7	9	5	10	7	10	3	7	220	27,5	756,25	8
Гарантія на виконані роботи	3	5	6	10	7	9	3	1	10	9	10	2	10	4	218	25,5	650,25	7
Розташування СТО (відстань до СТО)	10	2	2	7	2	5	10	5	4	4	6	5	5	6	181	-11,5	132,25	5
Наявність реклами СТО в ЗМІ	6	9	9	5	10	10	8	10	6	6	9	9	9	10	230	37,5	1406,25	9
Зовнішня привабливість СТО (естетика)	8	1	5	2	6	4	6	4	9	3	3	4	4	8	171	-21,5	462,25	4
РАЗОМ	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	1925		9410,5	

Таким чином, проведення оцінювання показників станцій технічного обслуговування у м. Черкаси дозволяє формувати критерії для підвищення ефективності та вдосконалення автосервісних технологій в Україні.

Список літератури

1. Марков О. Д. Станции технического обслуживания автомобилей. Киев: Кондор, 2008. 536 с. 16 цветн. ил.
2. Буренніков Ю. Ю. Стратегічні засади розвитку та підвищення конкурентоспроможності станцій технічного обслуговування автомобілів у сучасних умовах господарювання. *Вісник ЖДТУ*. 2012. № 3 (62). С. 20–24.
3. Хаксевер К., Рендер Б., Рассел Р., Мердик Р. Управление и организация в сфере услуг: пер. с англ. / под ред. В. В. Кулибановой. 2-е изд. Санкт-Петербург: Питер, 2002. 752 с.
4. Бычков В. П., Пеньшин Н. В. Эффективность производства и предпринимательство в автосервисе: учеб. пособ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. 304 с.
5. Шинкаренко В. Г., Легкий С. А. Параметры споживчої цінності послуг пасажирського автомобільного транспорту. *Економіка транспортного комплексу*. 2012. Вип. 20. С. 102–110.
6. Ульянченко О. В. Дослідження операцій в економіці: підруч. для студ. вузів / Харк. нац. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва. Харків: Гриф, 2002. 578 с.
7. Дмитриченко М. Ф., Матейчик В. П., Грищук О. К., Цюман М. П. Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посіб. Київ: НТУ, 2014. 168 с.
8. Голубков Е. П. Технология принятия управленческих решений. Москва: Дело и сервис, 2005. 544 с.
9. Ромашкина Г. Ф., Татарова Г. Г. Коэффициент конкордации в анализе социологических данных. *Социология*. 2005. № 20. С. 131–158.
10. Горбань І. І. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів. Київ, 2003. 244 с.: іл.

References

1. Markov, O. D. (2008) Vehicle service stations. Kiev: Kondor, 536 p. [in Russian].
2. Burennikov, Yu. Yu. (2012) Strategic principles of the development and the increase in competitiveness of vehicle service stations in modern economic conditions. *Visnyk GDTU*, (3), pp. 20-24 [in Ukrainian].
3. Haksever, K., Render, B., Russell, R., Merdik, R. (2002) Management and organization in the field of services. St-Petersburg: Piter, 752 p. [in Russian].
4. Bychkov, V. P., Peshyn, N. V. (2007) Efficiency of production and entrepreneurship in the car service. Tambov: Tambov State Technical University, 304 p. [in Russian].
5. Shynkarenko, V. H., Lehkii, S. A. (2012) Parameters of consumer value of passenger transport services. *Ekonomika transportnoho kompleksu*, (20), pp. 102–110 [in Ukrainian].
6. Ulianchenko, O. V. (2002) Investigation of operations in economy: textbook for university students. Kharkiv State Agrarian University. Kharkiv: Gryf, 578 p. [in Ukrainian].
7. Dmytrychenko, M. P., Mateichyk, V. P., Hryshuk, O. K., Tsyuman, M. P. (2014) Methods of system analysis of the properties of automotive technique. Kyiv: NTU, 168 p. [in Ukrainian].
8. Golubkov, E. P. (2005) Technology of making managerial decisions. Moscow: Delo i service, 544 p. [in Russian].
9. Romashkina, G. F., Tatarova, G. G. (2005) Coefficient of concord in the analysis of sociological data. *Sociologiya*, (20), pp. 131–158 [in Russian].
10. Gorban, I. I. (2003) Probability theory and mathematical statistics for researchers and engineers. Kyiv, 244 p. [in Ukrainian].

O. A. Tryhub, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: toa_oks@ukr.net

A. P. Soltus, *Dr.Tech.Sc., professor*,
e-mail: ate_chdtu.edu.ua

D. V. Rud, *student*
e-mail: ate_chdtu.edu.ua

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

ASSESSMENT OF INDICES OF VEHICLE SERVICE STATIONS IN CHERKASY CITY

Modern market conditions, which are characterized by increasing of competition strictness, create preconditions for maximizing the proximity of service center services to customer requirements. Only under these conditions they will have a certain consumer value. At the same time, the opinions of the worker and the consumer may vary. The authors of the article set the goal to conduct a ranking of subjective consumer values that form the competitiveness of service station from the point of view of the client and from the point of view of the employee. The method of expert evaluations is chosen for the ranking. The respondents' survey has shown that both employees and consumers of service station are unanimous in their opinion about such consumer values: the quality of maintenance and repair work, the price of services, the timing of performance of orders and the external attractiveness of service station (aesthetics).

Keywords: consumer values, grading, competitive ability, expert poll, vehicle service station.

В. Г. Цірук, *к.т.н., головний інженер*
ПАТ «НВО «Київський завод автоматики»
Старокиївська, 10, м. Київ, 04116, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕТАЛЕВОГО РЕЗОНАТОРА ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

У роботі наведено результати розробки та визначення параметрів високотехнологічного, дешевого коріолісового вібраційного гіроскопа, який забезпечує високу точність вимірювань та не поступається своїми характеристиками його основним конкурентам: волоконно-оптичному і лазерному гіроскопу. Показано, що для збільшення технологічності і зменшення вартості виготовлення резонатора його слід виготовляти з металу. Запропоновано акустичний метод, що дає змогу визначати добротність різних типів коливань для довільної кількості неоднорідностей залежно від місця їх розташування в резонаторі, а також параметри добротності самого резонатора. Оцінено правильність проведення операцій термообробки та неоднорідність розподілу маси по окружній координаті резонатора, а також можливість використання резонаторів на подальших етапах складання.

Ключові слова: коріолісовий гіроскоп, навігація, балансування, акустика.

Актуальність теми дослідження. Останнім часом досягнуто високий рівень нових розробок чутливих елементів систем стабілізації та орієнтації. Однією з таких розробок є коріолісовий вібраційний гіроскоп (КВГ), робота якого базується на інерційних властивостях пружних хвиль, що збуджуються в резонаторах на звукових частотах. Саме коріолісовий вібраційний гіроскоп являє собою важливу складову для створення інерціальної технології не тільки тому, що ці гіроскопи продемонстрували високу якість, як, наприклад, кварцовий напівсферичний резонаторний гіроскоп, а й тому, що два інші найбільш популярні типи твердотільних гіроскопів (кільцевий лазерний та волоконно-оптичний) поки не піддаються тому рівню мініатюризації, як коріолісовий вібраційний гіроскоп.

Тому, актуальним і перспективним є створення високотехнологічного, дешевого КВГ, що забезпечує високу точність вимірювань і не поступається метрологічними характеристиками його основним конкурентам: волоконно-оптичному і лазерному гіроскопам.

Постановка проблеми. В статті проводиться аналіз конструкції чутливого елемента коріолісового вібраційного гіроскопа, а також розглядаються створені за участю автора алгоритми управління пружною хвилею резонатора такого гіроскопа та вимірювання її частоти. З метою забезпечення високої точності

гіроскопа конструкція резонатора має забезпечувати ідентичність двох мод коливань (первинної і вторинної), тому що в цьому випадку отримується максимальна точність приладу. Крім того, конструкція повинна мати строгу осьову симетрію. Відомі дві геометричні фігури, що мають високу осьову симетрію: сфера і циліндр. Останній буде розглядатися як модель металевго резонатора вібраційного гіроскопа при визначенні його параметрів акустичним методом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Досягнення високої точності комплексів стабілізації стало можливим завдяки високій якості сучасних елементів гіроскопічної техніки і значному розвитку теорії гіроскопічних пристроїв працями відомих вчених-математиків і механіків, серед яких можна відзначити монографію [1].

При цьому, у наукових працях вчених В. В. Карачуна, В. П. Кваснікова, В. М. Мельника, Х. Міягави, С. Тадано, Р. Такедо та інших показано провідну роль досягнень у розробці інерціальних систем навігації та їх чутливих елементів [2–5].

У той же час питання метрології, дослідження похибок чутливих елементів комплексів стабілізації були висвітлені у роботах О. М. Безвесільної, М. Д. Кошового, О. І. Осмоловського тощо [6–8].

Проте досі залишається невизначеним питання розрахунку добротності КВГ акустичним методом, що дозволило б забезпечити

високу точність вимірювання його коливних характеристик.

Мета роботи: визначити і математично описати методику акустичної перевірки та розрахунку добротності резонатора для подальшого коригування його маси та забезпечення точності вимірювання коливання хвилі.

Виклад основного матеріалу. Типову конструкцію резонатора коріолісового вібраційного гіроскопа зображено на рис. 1.

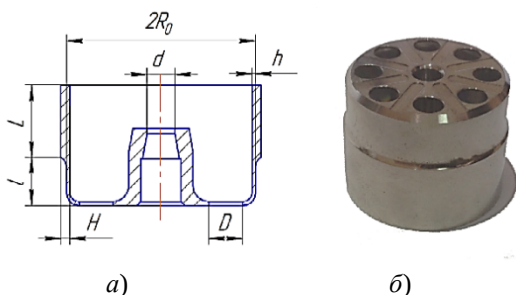


Рис. 1. Схема циліндричного резонатора з циліндричним вузлом кріплення (а) та його загальний вигляд (б)

Оскільки товщина циліндричної частини пружного підвісу менша товщини обода $h < H$, то його власна частота зміщена в нижній діапазон частот.

Це видно з виразу для резонансної частоти циліндричної оболонки:

$$\omega_i = K(i) \frac{h}{R_0^2} \sqrt{\frac{E}{(1+\nu)\rho}}, \quad (1)$$

де $K(i) = \frac{i(i^2 - 1)}{\sqrt{(i^2 + 1)}}$ – коефіцієнт, залежний

від номера i моди коливань, E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона, ρ – щільність матеріалу.

В результаті цього досягається частотна розв'язка між робочою частотою коливань (резонансною частотою обода) і частотою підвісу (у нижній частині циліндра), на якій розташований обід.

Тому пружний підвіс у такій конструкції виконує роль демпфера при дії зовнішніх збурень – вібрацій і ударів.

Зменшення товщини пружного підвісу призводить до зменшення його моменту інерції i , тим самим, знижує вимоги до точності виготовлення і до рівності пружних властивостей спиць.

Це видно із співвідношення моментів інерції кільцевого обода M_k і підвісу M_{nd} , приведених до амплітуди коливань резонатора:

$$\frac{M_{nd}}{M_k} = \left(\frac{h}{H}\right)^2. \quad (2)$$

Тому при виконанні співвідношення $h/H \leq 1/4$ вимоги до точності виконання пружного підвісу зменшуються (ослаблюються) більше, ніж на порядок.

Високі вимоги до точності геометричної форми і пружних властивостей накладаються тільки на обід резонатора, що значно підвищує технологічність і, отже, знижує вартість його виготовлення [9].

Дно резонатора і менша по товщині нижня частина циліндра виконують роль пружного підвісу, але, оскільки на дні розташовуються датчики знімання і збудження, які збільшують жорсткість по осях їх розташування, то для забезпечення коливань резонатора по цих осях необхідно збільшити жорсткість частини дна між датчиками.

Проте між датчиками розташовані отвори, тому порівняємо жорсткості уздовж осі спиць і осі, що проходить через центр отвору.

Жорсткість спиць, які утворюються між отворами, визначається як

$$C_{cn} = \frac{Eh^3}{12R_0^2}. \quad (3)$$

Жорсткість дна уздовж осі, що проходить через центри отворів діаметром D (рис. 1), для круглих отворів визначається як

$$C_z = \frac{Eh^3}{12(R_0 - D)^2}. \quad (4)$$

Для того щоб максимальні коливання збуджувалися уздовж осей, необхідно виконати умову

$$C_{cn} / C_z < 1. \quad (5)$$

Жорсткість датчиків визначається як:

$$C_\theta = \frac{E_\theta b h_\theta^3}{12a^3}, \quad (6)$$

де E_θ – модуль Юнга, b , a , h_θ – ширина, довжина і товщина датчиків.

Сумарна жорсткість спиць і розташованих на ній датчиків при співвідношенні розмірів $a = R_0/2$, $h_\theta = h$ дорівнює

$$C_{\Sigma} = \frac{Eh^3}{12R_0^2} \left(1 + \frac{8E_0b}{ER_0} \right). \quad (7)$$

Для виконання умови (5) вимагається, щоб

$$\left(1 - \frac{d}{R_0} \right)^2 \left(1 + \frac{8E_0b}{ER_0} \right) < 1. \quad (8)$$

Умова (8) виконується при $D \geq R_0/2$.

Таким чином, якщо діаметр отвору буде більшим половини радіуса циліндра, то деформація дна циліндра зосередиться на спицях і буде виміряна датчиками.

На рис. 2 показано стоячу хвилю у циліндричному резонаторі.

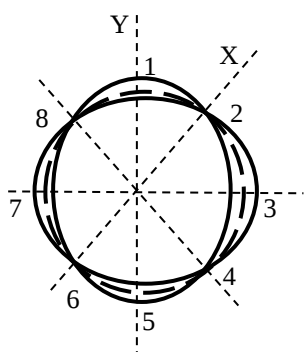


Рис. 2. Стояча хвиля у циліндричному резонаторі

Після виготовлення резонаторів необхідно перевірити точність їх виготовлення.

Першочергово перевіряються його геометричні параметри. Їх перевірка відбувається на спеціальному обладнанні.

Задля отримання високих параметрів точності та чутливості гіроскопічного датчика необхідно, щоб резонатор був виконаний із максимальною точністю (з мінімальними відхиленнями від круглості та симетричності відносно осі деталі).

Геометричні параметри резонатора задаються з точністю до 0,001 мм.

Таким чином, необхідний 100 % контроль резонаторів на відповідність вимогам креслення.

Контроль таких параметрів дозволяє виконати кругломір. Результати замірів наносяться на кругову діаграму (рис. 3).



Рис. 3. Діаграма результатів вимірювання

Основна особливість різниці у вимірюваннях полягає в наступному: якщо вважати, що профіль деталі є періодичною кривою синусоїдальної форми, причому на окружності укладається n періодів відхилень, то показання приладу будуть пов'язані зі значенням відхилення від круглості рівнянням

$$X(p) = \int_{-\infty}^{\infty} x(D) e^{-pD} dt = L\{x(D)\}, \quad (9)$$

де D – вимірювальний діаметр, p – відносна похибка.

Другим етапом перевірки виконання операцій термообробки є перевірка параметрів резонатора акустичним методом.

Основними параметрами при перевірці є:

- резонансні частоти;
- різночастотність;
- добротність.

Для перевірки цих параметрів спроектовано спеціальне робоче місце (рис. 4), що дозволяє здійснювати обробку акустичних даних за допомогою ЕОМ.

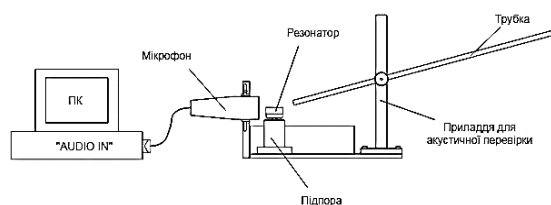


Рис. 4. Схема робочого місця по перевірці акустичних параметрів металевго резонатора

Метод полягає в аналізі звукових коливань в резонаторі після дії механічних збурень.

Ці збурення виникають внаслідок контакту металевої кульки, що скочується по трубці приладдя, з робочою поверхнею резонатора.

Звукові сигнали, що виникають в результаті зіткнення, записуються мікрофоном та оброблюються у цифровому вигляді за допомогою ЕОМ.

Типову діаграму обробленого сигналу зображено на рис. 5.

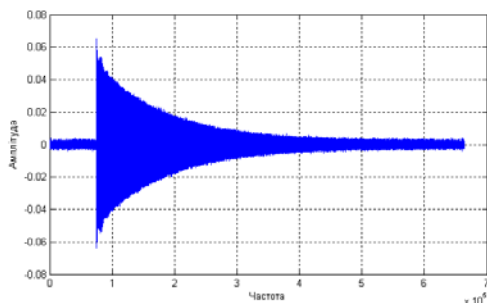


Рис. 5. Діаграма обробленого звукового сигналу при збудженні

Використовуючи швидке перетворення Фур'є для проведення спектрального аналізу, визначаємо робочі резонансні частоти резонатора (рис. 6).

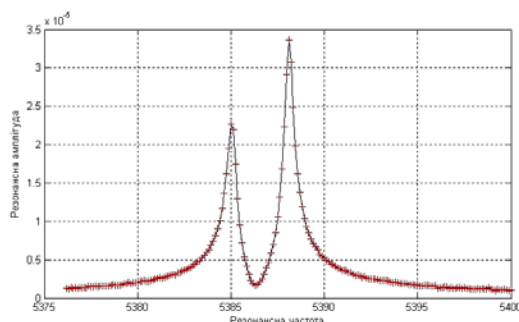


Рис. 6. Резонансні частоти резонатора у збудженому стані

Різничастотність визначається за формулою

$$\Delta F = F_{p2} - F_{p1}, \quad (10)$$

де F_{p1} та F_{p2} – значення першого та другого резонансних піків.

Аналіз цих даних дозволяє оцінити можливість подальшого використання резонаторів, адже для витримки ізотропності амплітуди коливань резонатора його необхідно відбалансувати.

Вимогою до параметра різничастотності є: $\Delta F \leq 10$ Гц.

Добротність – параметр коливальної системи, що визначає ширину резонансу та характеризує, у скільки разів запаси енергії в системі більші, ніж втрати енергії за один період коливань.

Добротність зворотно пропорційна швидкості затухання власних коливань у системі. Тобто, чим вища добротність коливальної системи, тим менші втрати енергії, тим повільніше затухають коливання.

В металевих резонаторах втрата енергії відбувається на стінках резонатора, його матеріалі та в елементах зв'язку.

Добротність резонаторів визначається за формулою

$$Q = \frac{F_p}{F_2 - F_1}, \quad (11)$$

де F_p – резонансна частота; F_1, F_2 – частоти на рівні 0,707 амплітуди вихідного сигналу резонансної частоти (рис. 7).

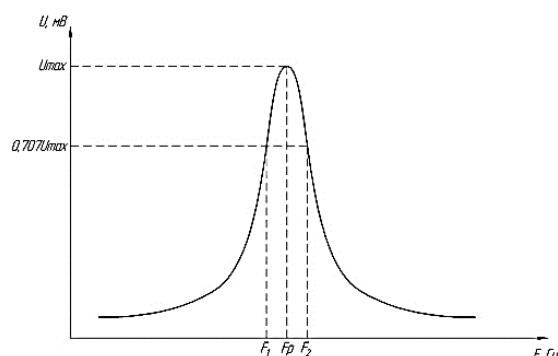


Рис. 7. Типовий резонансний пік у металевому резонаторі при збудженні

Висновки. Визначено та математично описано методику акустичної перевірки та розрахунку добротності коріолісового вібраційного гіроскопа.

Доведено, що використання швидкого перетворення Фур'є для проведення спектрального аналізу дозволяє визначити робочі резонансні частоти резонатора КВГ.

Встановлено, що визначення параметра добротності дає змогу оцінити правильність проведення операцій термообробки, а також неоднорідність розподілу маси по окружній координаті резонатора при використанні резонаторів на етапах складання.

Список літератури

1. Павлов В. О. Гирскопический эффект, его проявления и использование. Ленинград: Судостроение, 1985. 256 с.
2. Karachun V. V., Mel'nik V. N. Determining gyroscopic integrator errors due to diffraction of sound waves. *International Applied Mechanics*. 2004. № 3. С. 328–336.

3. Tadano S., Takeda R., Miyagawa H. Three-dimensional gait analysis using wearable acceleration and gyro sensors based on quaternion calculations. *Sensors*. 2013. Vol. 13, № 7. P. 9321–9343. doi: 10.3390/s130709321
4. Xia D., Yu C., Kong L. The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology. *Sensors*. 2014. Vol. 14, № 1. P. 1394–1473. doi: 10.3390/s140101394
5. Квасніков В. П., Кочеткова О. В. Проектування вимірювальної системи на нейронних мережах. *Автоматика. Автоматизація. електротехнічні комплекси і системи*. 2005. № 2. С. 138–141.
6. Квасніков В. П., Осмоловський О. І. Підвищення динамічної точності слідкуючих систем з обмеженою лінійною зоною датчика відхилення. *Електроніка та системи управління*. 2005. № 2. С. 128–131.
7. Безвесільна О. М., Кошовий М. Д. Вимірювання лінійних прискорень на основі штучної нейтронної мережі. *Вісник Інженерної академії України*. 2012. № 3. С. 80–84.
8. Безвесільна О. М., Цірук В. Г., Квасніков В. П. Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації. *Вісник Інженерної академії України*. 2014. № 2. С. 155–159.
9. Антонюк В. С., Возняковський А. О., Пономаренко А. І., Цірук В. Г. Спосіб виготовлення резонатора коріолісового вібраційного гіроскопа: пат. № 125819 Україна. МПК 7G01C 19/00; опубл. 25.05.2018, бюл. № 10/2018.
2. Karachun, V. V., Mel'nik, V. N. (2004) Determining gyroscopic integrator errors due to diffraction of sound waves. *International Applied Mechanics*, No. 3, pp. 328–336.
3. Tadano, S., Takeda, R., Miyagawa, H. (2013) Three-dimensional gait analysis using wearable acceleration and gyro sensors based on quaternion calculations. *Sensors*, Vol. 13, № 7, pp. 9321–9343. doi:10.3390/s130709321
4. Xia, D., Yu, C., Kong, L. (2014) The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology. *Sensors*, Vol. 14, № 1, pp. 1394–1473. doi: 10.3390/s140101394
5. Kvasnikov, V. P., Kochetkova, O. V. (2005) Development of measuring system on neural networks. *Avtomatyka. Avtomatyzacija. elektrotekhnichni kompleksi i systemy*, No. 2, pp. 138–141 [in Ukrainian].
6. Kvasnikov, V. P., Osmolovskij, O. I. (2005) Increasing the dynamic accuracy of monitoring systems with a limited linear zone of deviation sensor. *Elektronika ta systemy upravlinnja*, No. 2, pp. 128–131 [in Ukrainian].
7. Bezvesiljna, O. M., Koshovyj, M. D. (2012) Measurement of linear accelerations on the basis of artificial neuron network. *Visnyk Inzhenernoji akademiji Ukrainy*, No. 3, pp. 80–84 [in Ukrainian].
8. Bezvesiljna, O. M., Tsiрук, V. H., Kvasnikov, V. P. (2014) Analysis of foreign systems of guidance and stabilization. *Visnyk Inzhenernoji akademiji Ukrainy*, No. 2, pp. 155–159 [in Ukrainian].
9. Antonjuk, V. S., Voznjakovskij, A. O., Ponomarenko, A. I., Tsiрук, V. H. A method of manufacturing a resonator of a coriolis vibration gyroscope. Patent 125819 Ukraine 7G01C 19/00). Published 25.05.2018, bull. No. 10/2018.

References

V. H. Tsiрук, Ph.D., chief engineer
PJSC «NPO«Kiev Automation Plant»
Starokievskaya str., 10, Kyiv, 04116, Ukraine

DETERMINATION OF PARAMETERS OF METALLIC RESONATOR OF VIBRATORY GYROSCOPE BY ACOUSTIC METHOD

The results of the development and determination of parameters of high-tech, cheap coriolis vibratory gyroscope, which provides high accuracy of measurements and is not inferior to the characteristics of its main competitors: fiber-optic and laser gyroscopes, are presented in the work. It is

shown that in order to increase the productivity and to reduce the cost of resonator manufacturing, it should be made of metal. The acoustic method is proposed, which allows to determine the Q-factor of different types of oscillations for an arbitrary number of heterogeneities, depending on their location in the resonator, as well as the parameters of the Q-factor of the resonator itself. The correctness of the heat treatment operations and the heterogeneity of mass distribution along cohesive coordinates of the resonator, as well as the possibility of using resonators at subsequent stages of assembling are evaluated.

Keywords: *coriolis gyroscope, navigation, balancing, acoustics.*

О. О. Броварець, к.т.н., доцент

e-mail: brovaretsnau@ukr.net

Київський кооперативний інститут бізнесу і права
вул. Ломоносова, 18, м. Київ, 03041, Україна

ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ У АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Стаття присвячена оптимізації урожайності і забезпеченню екологічної якості сільськогосподарської продукції за допомогою сучасних інформаційно-технічних систем, із урахуванням варіабельності зон управління сільськогосподарським полем. Запропоновано неоднорідність ґрунту представити як ієрархічну підпорядкованість явищ. При цьому питання вимірювання неоднорідності пропонується вирішити шляхом кількісного порівняння об'єктів вимірювання з використанням відповідних критеріїв. За цих умов виникає необхідність у пошуку найбільш ефективного способу для оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь, що відкриває нові перспективи до ведення органічного землеробства з використанням інтелектуальних сільськогосподарських машин.

Ключові слова: інформаційно-технічна система, оперативний моніторинг, ґрунт, проби, варіабельність, величина.

Постановка проблеми. В сучасних умовах слід відзначити широке використання інформаційно-вимірювальних технологій та інформаційно-технічних систем для виконання технологічних операцій у рослинництві.

Існуючі способи керування агробіологічним станом ґрунтового середовища та відбором проб ґрунту за наявними методиками не враховують варіабельності їх параметрів по площі сільськогосподарських угідь. Для реалізації технології диференційованого внесення технологічного матеріалу здебільшого використовується спрощений спосіб рівномірного розбиття поверхні поля на рівні квадрати (переважно площею 5–15 га) для подальшої діагностики та керування полем із використанням такої диференціації. За цією методикою до умовно рівного квадрата на полі можуть потрапляти ділянки з принципово різними параметрами, середнє значення яких не відображатиме реальних параметрів даної ділянки. Спосіб рівномірного розбиття на рівні квадрати поверхні поля не враховує специфіки поля та зон неоднорідності, як наслідок – низька достовірність даних, отриманих із використанням такого методу, а відповідно і можливість використання таких даних для якісного керування технологічними процесами з використанням технології диференційованого внесення технологічного матеріалу. Тому такий спосіб реалізації ди-

ференційованого внесення технологічного матеріалу буде неефективним.

Один із головних підходів при застосуванні сучасних технологій землеробства – оптимізувати урожайність і забезпечити екологічну якість сільськогосподарської продукції з урахуванням варіабельності зон управління сільськогосподарським полем (рис. 1).

Знання певної структури варіабельності ґрунтового покриву дозволяє прийняти ефективні рішення для управління агробіологічним потенціалом сільськогосподарських угідь [1].



Рис. 1. Схема сучасного управління агробіологічним потенціалом агропідприємства

Таким чином, схема сучасного управління агробіологічним потенціалом сільсько-

господарського агропідприємства (рис. 1) передбачає наявність загальних елементів: склад технологічних матеріалів, виробництво та склад нафтопродуктів, а також новітніх елементів сільськогосподарських підприємств для ефективного функціонування сільськогосподарського виробництва шляхом підвищення якості виконання технологічних операцій.

Важливим елементом цих технологій є безперервний моніторинг стану сільськогосподарських угідь за трьома напрямками: супутниковий моніторинг (реалізація за допомогою супутників), аеромоніторинг (з використанням літальних апаратів) та ближній моніторинг (за допомогою рухомих транспортних засобів). Така організація дає можливість сформувати модель стану агробіологічного потенціалу поля та прийняти керівнику (інженеру, агроному, начальнику відділу, голові господарства, начальнику відділу при міністерстві) ефективні рішення для управління агробіологічним потенціалом поля. Причому, керівник може проводити аналіз рішень дистанційно, незалежно від власного місця розміщення, з використанням мобільних обчислювальних засобів. Отримання достовірних даних можливе лише з використанням новітніх систем і науково обґрунтованих підходів до управління агробіологічним потенціалом поля.

Точне землеробство передбачає виконання [1, 2, 3, 7] кожної технологічної операції згідно з відповідною картограмою, яка розробляється попередньо на основі різнопланової інформації. Загальну схему реалізації точного землеробства наведено на рис. 1.

Закономірним за сучасних умов розвитку техніки та ринкових відносин, що характеризуються розвитком інформаційних технологій і неухильним зростанням цін на енергоносії, є використання нових технологій для моніторингу, застосування яких дає можливість одержувати значний економічний ефект завдяки оптимальному використанню виробничих засобів і технологічних процесів. Невід'ємною складовою сучасного сільського господарства є моніторинг агробіологічного та фітосанітарного стану сільськогосподарських угідь перед сівбою, протягом вегетації та при збиранні врожаю (рис. 2).

Завданням сучасного землеробства є забезпечення належної ефективності сільськогосподарського виробництва шляхом інте-

грації сучасних передових механіко-конструктивних та інформаційно-технічних систем для прийняття ефективного оперативного управлінського рішення.

Неоднорідність вважають фактором, відповідальним за біорізноманіття, тому що завдяки їй формується екологічна складова і забезпечується багатогранність організмів ґрунту [2].

За межами типової системи інформаційного забезпечення процесів планування залишаються задачі, пов'язані з вибором оптимальних рішень, оцінкою альтернативних варіантів розвитку і т. ін.

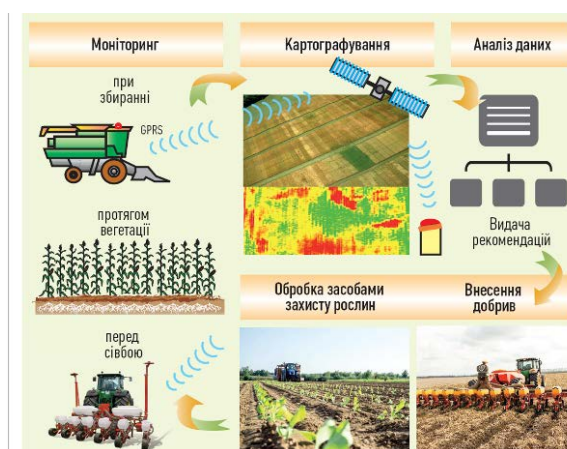


Рис. 2. Схема інформатизації сучасних технологій землеробства

У більшості сільськогосподарських підприємств, що використовують для автоматизації функцій планування системи операційного управління (розроблені на основі як типових, так і індивідуальних проектів), не можуть уникнути головного недоліку цього типу інформаційних систем: зміщення акцентів у бік поточного планування [4].

Очевидно, що за таких умов виникає необхідність у принципово нових підходах до ведення агропромислового виробництва, що полягає у забезпеченні належної якості виконання технологічних операцій. Якість виконання технологічних операцій є інтегральним показником ефективності виробництва сільськогосподарської продукції в межах агробіологічного поля. Необхідна якість виконання основних технологічних процесів у рослинництві забезпечується за рахунок інтегрованих інформаційно-технічних систем оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь [13–15].

На реальних характерних ділянках поля проводять необхідні експертні, агрохімічні, агрофізичні, біологічні та інші дослідження. Відомо, що виробництво та використання мінеральних добрив потребує значних затрат енергії. Наприклад, в країнах Східної Європи вони становлять до 60 % від загальних енерговитрат рослинництва [5]. Разом з тим, результати останніх агрохімічних обстежень ґрунтів показали, що достатню забезпеченість рухомими формами мають 2/3, а обмінним калієм – 48 % земель України [4]. Причому навіть у межах одного поля бувають ґрунти з різним ступенем забезпеченості засвоєваними поживними речовинами, які мають різну необхідність в обробці засобами хімічного захисту рослин.

На основі даних досліджень конкретно-го поля, а також даних «історії» цього поля, урожаю відповідної культури, що планується, метеорологічних прогнозів, матеріально-технічного забезпечення господарства та інших факторів розробляються картографи рекомендованого обробітку характерних ділянок поля. Сучасне сільськогосподарське виробництво передбачає широке використання автоматизованих систем для моніторингу стану сільськогосподарських угідь – інформаційно-технічних систем локального оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь.

Метою цього дослідження є розробка методики виділення зон варіабельності агробіологічного стану сільськогосподарських угідь як основи ефективного використання сучасних інформаційно-технічних систем в агропромисловому виробництві.

Виклад основного змісту дослідження. Технології точного землеробства є ефективним інструментом сільськогосподарського виробництва. На цьому етапі провідні лідери-виробники сільськогосподарських машин та знарядь націлені на їх адаптацію під реалізацію технологій точного землеробства. Причому, інструменти цих технологій закладені в базову комплектацію, що створює передумови для їх широкого впровадження у сучасних агропідприємствах. Проте, незважаючи на таку адаптацію та передумови для їх використання, частка їх використання у сучасних агропідприємствах досить низька.

На активність просторового перерозподілу елементів живлення в ґрунті впливають норма і форма внесених добрив, характер

руху гравітаційної та капілярної вологи в ґрунті, вологість і температура ґрунту, його фізико-хімічні та біологічні властивості, а також спосіб внесення мінеральних добрив. Інформації щодо міграції елементів живлення за локального внесення мінеральних добрив у наукових джерелах майже немає.

Для досягнення оптимального забезпечення рослин елементами живлення необхідно забезпечити їх ефективне застосування шляхом використання оперативних даних про варіабельність агробіологічного стану ґрунтового середовища. В сучасних умовах господарювання найбільш ефективним способом застосування мінеральних добрив є їх диференційоване локально-дозоване внесення. Дослідженнями, проведеними в різних ґрунтово-кліматичних зонах, встановлено, що кількісне і якісне оцінювання вмісту елементів живлення в ґрунті дає можливість точніше встановлювати оптимальні норми добрив та скорегувати дози і строки їхнього внесення.

Методика визначення зон варіабельності агробіологічного стану сільськогосподарських угідь призначена для використання у галузі сільського господарства та може бути використана в сучасних технологіях сільськогосподарського виробництва, технологіях точного землеробства, безпосередньо у рослинництві, загальному землеробстві і призначена для підвищення достовірності визначення агрохімічного стану ґрунтового середовища при оперативному агрохімічному обстеженні ґрунтів шляхом моніторингу агробіологічного стану ґрунтового середовища сільськогосподарських угідь, зокрема відбору проб ґрунту, оперативного визначення потенційної родючості ґрунтів для застосування технологій диференційованого локально-дозованого внесення технологічного матеріалу (добрив, насіння тощо), а також може бути застосована при виконанні агрохімічного обстеження ґрунтів власниками земель та землекористувачами.

У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці методики визначення величини зон варіабельності агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь для забезпечення належної якості виконання технологічних операцій у рослинництві. Це дає можливість підвищити достовірність отриманих даних, а відповідно – і ефективність впровадження сучасних технологій сільськогосподарського виробництва.

Виділення таких зон можливе з урахуванням величини варіабельності цих показників за трьома рівнями:

1. Дані дистанційного моніторингу агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь на основі даних супутникового моніторингу або з використанням дронів X_1 .

2. Дані моніторингу урожайності, а відповідно – і рельєфу поля X_2 .

3. Дані, отримані з використанням пристрою моніторингу електропровідних характеристик ґрунтового середовища, X_3 .

Кожен з наборів цих даних може бути використаний окремо – X_1 , X_2 , X_3 , або у комплексі з коефіцієнтами вагомості впливу на кінцевий коефіцієнт зон варіабельності X_3 :

$$X_3 = k_1 \cdot X_1 + k_2 \cdot X_2 + k_3 \cdot X_3, \quad (1)$$

де k_1 , k_2 , k_3 – коефіцієнти вагомості кожного показника при визначенні зон варіабельності.

Для виділення таких зон, перш за все, необхідно правильно визначити рівні варіювання таких даних (рис. 3).



Рис. 3. Виділення зон варіабельності агробіологічного поля, отриманих з використанням показника електропровідності на основі комплексних показників

Залежно від величини параметрів варіабельності нижнього та верхнього показника стану ґрунтового середовища (урожайність, рельєф, електропровідність тощо) сільськогосподарських угідь та строкатості їх агробіологічних параметрів формується кількість рівнів варіабельності з мінімальним $Q_{\min}$ та максимальним $Q_{\max}$ значенням. Залежно від величини $\Delta = Q_{\max} - Q_{\min}$ визначають кількість рівнів варіювання k . Таким чином, величина кожного рівня N варіювання визначається $\Delta_N = \frac{\Delta}{k} = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{k}$.

Для виділення зон неоднорідностей необхідно виділяти зони неоднорідності на ос-

нові даних (рис. 4). Таким масивом даних можуть бути:

- дані дистанційного моніторингу;
- дані урожайності агробіологічного стану сільськогосподарських угідь;
- дані електропровідних властивостей ґрунтового середовища.

Для цього спочатку отримані дані довільно з рівними інтервалами потрібно розбити на рівні частини. Рекомендовано п'ять рівнів.

Дані дистанційного моніторингу дають можливість виділити зони неоднорідності на основі аналізу даних з таких полів протягом декількох років (як правило, достовірні дані можна отримати на основі даних, отриманих протягом 3–5 років). Проте з такими даними важко працювати у вегетаційний період, оскільки їх неможливо інтерпретувати саме у цей період. Методика дозволяє виявити зони перекриття рослинами поверхні поля. У випадку неперекриття можна у вегетаційний період діагностувати неправильне виконання технологічних операцій або пошкодження посівів (наприклад, замокання чи вилягання). Проте при правильному пророщуванні сільськогосподарських культур, як правило, у вегетаційний період діагностувати ефективність сільськогосподарських угідь неможливо внаслідок їх повного покриття рослинами. Ефективна діагностика такими методиками можлива лише у період воскової стиглості, коли вже фактично неможливо виправити стан посівів та вплинути на кінцеву врожайність. Як правило, такі технології не дають ефективного результату у період червня–вересня, і, відповідно, ефективність таких технологій дуже низька.

Дані урожайності є ефективним інструментом моніторингу зон варіабельності неоднорідності. Проте після формування урожайності відбувається винесення поживних речовин з ґрунту, і на основі даних урожайності важко діагностувати реальний агробіологічний стан ґрунтового середовища. Дані потенційної урожайності показують реальний потенціал агробіологічних зон сільськогосподарських угідь, проте важко оцінити, внаслідок чого була сформована така врожайність: чи внаслідок потенціалу поля, чи внаслідок внесення поживних речовин, та який реальний їх залишок у ґрунті. Важко також оцінити, з яким потенціалом залишилися зони агробіологічного поля.

В ідеалі для виділення зон варіабельності потрібно мати три шари таких даних та оцінити ці зони на основі коефіцієнтів впливу на кінцеву зону.

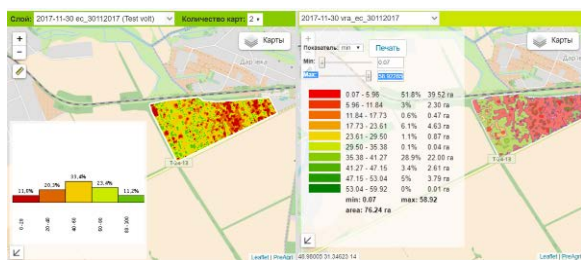


Рис. 4. Дані параметрів електропровідних характеристик та виділені на їх основі зони варіабельності

Кожен із цих класів має свої переваги та недоліки. Найбільш об'єктивним і доступним з точки зору реалізації є моніторинг електропровідних властивостей стану ґрунтового середовища.

Зони варіабельності можуть коливатися від 0,01 га (менше економічно недоцільно) до десятків гектарів (20–50 га). Середнє значення таких зон варіабельності для природно-кліматичних зон України коливається в межах 2–20 га.

Після формування таких зон варіабельності можемо сформувати зони неоднорідності та відповідно сформувати зони, переписані для відбору зразків ґрунтових проб. Як наслідок ми маємо чіткі дані по поверхні поля з урахуванням таких зон, а відповідно – і високу достовірність отриманих даних, що надзвичайно важливо при формуванні зон варіабельності. Такі дані будуть актуальні при роботі з рівнями варіювання, які, до речі, не регламентовані нормативними документами та стандартами.

Далі маємо візуально оцінити закон, за яким такі дані можемо апроксимувати.

При реалізації технологій точного землеробства важливим елементом є моніторинг агробіологічного стану сільськогосподарських угідь, що є основою для прийняття рішення щодо стратегії керування.

Для виділення таких зон потрібно, як правило, враховувати три рівні інформації. Взагалі такі зони можна виділити на основі будь-якої інформації про поле з геоприв'язкою.

Висновки. Запропонована методика дає можливість виділити зони варіабельності агробіологічного стану сільськогосподарських угідь, що підвищує якість їх моніторингу

при зменшенні трудомісткості та є основою ефективного використання сучасних інформаційно-технічних систем в агропромисловому виробництві. Проте при реалізації технологій точного землеробства перелік питань пов'язаний, перш за все, з питаннями ефективного оперативного моніторингу на всіх стадіях вирощування сільськогосподарських рослин: перед сівбою, протягом вегетації та при збиранні врожаю.

Саме ці системи дозволяють ефективно використання сучасних інформаційно-технічних систем у виробництві продукції рослинництва, зокрема шляхом використання диференційованого внесення технологічного матеріалу (насіння, добрив тощо) за допомогою інтелектуальних засобів. Техніка цього класу – це обладнання, яке дає змогу закрити практично увесь перелік технологічних операцій, пов'язаних із реалізацією технологій точного землеробства, на основі даних оперативного моніторингу стану сільськогосподарських угідь.

Список літератури

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. Москва: Наука, 1982. 624 с.
2. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. Москва: Радио и связь, 1988. 440 с.
3. Пархоменко Э. И. Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. Москва: Наука, 1989. 198 с.
4. Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. Подземная гидромеханика. Москва: Недра, 1993. 416 с.
5. Александров П. Н. Эффективные электромагнитные параметры капиллярной системы электропроводности горной породы. *Физика Земли*. 2000. № 2. С. 87–94.
6. Федоров Ф. И. Теория гиротропии. Минск: Наука и техника, 1976. 456 с.
7. Третьяков С. А. Электродинамика сплошных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы. *Радиотехника и электроника*. 1994. Т. 39. Вып. 10. С. 1457–1470.
8. Chen C. L. *IEEE Transactions*. 1966. V. AP – 14. №. 3. P. 283.
9. Chad Hertz A., Hibbard John D. A preliminary assessment of the economics of variable rate technology for applying phosphorus and potassium in corn production. *Farm Economics*.

- Iss. 14. Department of Agricultural Economics, University of Illinois, Champaign-Urbana. 1993. P. 218–231.
10. Медведєв В. В. Неоднородність ґрунтів і точне землеробство. Ч. I. Введення в проблему. Харків, 2007. 296 с.
 11. Иванов Ю. П., Синяков А. Н., Филатов И. В. Комплексирование информационно-измерительных устройств ЛА. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд., 1984. 207 с.
 12. Вадюнина А. Ф. К оценке электропроводности как метода определения влажности ґрунтів. *Почвоведение*. 1937. № 3. С. 391–404.
 13. Wilcox G. G. Determination of electrical conductivity of soil solutions. *Soil Science*. 1947. V. 63. P. 107.
 14. Ewart G. Y., Baver L. D. Salinity effects on soil moisture electrical resistance relationships. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1950. V. 15. P. 56–63.
 15. Воробьев Н. И. К вопросу кондуктометрического определения засоленности ґрунтів и ґрунтов. *Почвоведение*. 1955. № 4. С. 103.
 16. Rhoades J. D., Schifgaarde J. Van. An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 1976. № 5. P. 647–651.
 17. Копикова Л. П. Опыт применения методов электропроводности для составления детальных почвенно-мелиоративных карт. *Бюллетень ВИАУ*. 1979. № 43. С. 21–23.
 18. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. 7 с.
 19. Pansu M., Gautheyrou J. Handbook of soil analysis. Mineralogical, organic and inorganic methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006. P. 993.
 20. URL: <http://agrotechnology.com/tochnoe-zemledelie/ideologi/o-chem-rasskazyvaet-udelnaya-elektroprovodnost-pochvy>.
 21. Гуков Я. С., Линник Н. К., Мироненко В. Г. Автоматизированная система локально-дозированного внесения удобрений, мелиорантов и средств защиты растений. *Труды 2-й МНПК по проблемам дифференциального применения удобрений в системе координатного земледелия*. Рязань, 2001. С. 48–50.
 22. Броварець О. Від безплужного до глобального розумного землеробства. *Техніка і технології АПК*. 2016. № 10 (85). С. 28–30.
 23. Адамчук В. В., Мойсеєнко В. К., Кравчук В. І., Войтюк Д. Г. Техніка для землеробства майбутнього. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Вип. 86. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2002. С. 20–32.
 24. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / за ред. В. І. Кравчука, М. І. Грицишина, С. М. Ковалюка. Київ: Аграрна наука, 2004. 398 с.
 25. Орманджі К. С. Контроль качества полевых работ. Москва: Росагропромиздат, 1991. 191 с.
 26. Масло І. П., Мироненко В. Г. Автоматизована система локально-дозованого внесення добрив і хімічних засобів захисту рослин. *УАНН: Розробки – виробництво*. Київ: Аграрна наука, 1999. С. 348–349.

References

1. Landau, L. D., Lifshits, E. M. (1982) Electrodynamics of continuums. Moscow: Nauka, 624 p. [in Russian].
2. Vaynshteyn, L. A. (1988) Electromagnetic waves. Moscow: Radio i svyaz, 440 p. [in Russian].
3. Parhomenko, E. I. (1989) Geoelectric properties of minerals and rocks at high pressures and temperatures. Moscow: Nauka, 198 p. [in Russian].
4. Basniev, K. S., Kochina, I. N., Maksimov, V. M. (1993) Underground hydromechanics. Moscow: Nedra, 416 p. [in Russian].
5. Aleksandrov, P. N. (2000) Effective electromagnetic parameters of capillary system of rocks electrical conductivity. *Fizika Zemli*, No. 2, pp. 87–94 [in Russian].
6. Fedorov, F. I. (1976) The theory of gyrotropy. Minsk: Nauka i tehnika, 456 p. [in Russian].
7. Tretyakov, S. A. (1994) Electrodynamics of continuums: chiral, double-isotropic and some double-anisotropic materials. *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 39, iss. 10, pp. 1457–1470 [in Russian].
8. Chen, C. L. (1966) *IEEE Transations*, vol. AP – 14, No. 3, p. 283.
9. Chad, Hertz A., Hibbard, John D. (1993) A preliminary assessment of the economics of variable rate technology for applying phosphorus and potassium in corn production. *Farm Economics*, iss. 14. Department of Agricultural Economics, University of Illinois, Champaign-Urbana, pp. 218–231.
10. Medvedev, V. V. (2007) Soil heterogeneity and precision farming. Part I. Introduction to the problem. Kharkov, 296 p. [in Russian].
11. Ivanov, Yu. P., Sinyakov, A. N., Filatov, I. V. (1984) Interconnecting of information and measuring LA devices. Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd., 207 p. [in Russian].
12. Vadyunina, A. F. (1937) To the assessment of electrical conductivity as a method for deter-

- mining soil moisture. *Pochvovedenie*, No. 3, pp. 391–404 [in Russian].
13. Wilcox, G. G. (1947) Determination of electrical conductivity of soil solutions. *Soil Science*, vol. 63, p. 107.
 14. Ewart, G. Y., Baver, L. D. (1950) Salinity effects on soil moisture electrical resistance relationships. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, vol. 15, pp. 56–63.
 15. Vorobyev, N. I. (1955) To the question of conductometric determination of soil and ground salinity. *Pochvovedenie*, No. 4, p. 103 [in Russian].
 16. Rhoades, J. D., Schifgaarde, J. Van. (1976) An electrical conductivity probe for determining soil salinity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, No. 5, pp. 647–651.
 17. Kopikova, L. P. (1979) Experience of using electrical conductivity methods for compiling detailed soil-reclamation maps. *Byulleten VI-UA*, No. 43, pp. 21–23 [in Russian].
 18. GOST 26423-85. Soils. Methods for determining specific electrical conductivity, pH and dense residue of aqueous extract, 7 p. [in Russian].
 19. Pansu, M., Gautheyrou, J. (2006) Handbook of soil analysis. Mineralogical, organic and inorganic methods. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 993.
 20. URL: <http://agrotechnology.com/tochnoe-zemledelie/ideologi/o-chem-rasskazyvaet-udelnaya-elektroprovodnost-pochvy>
 21. Gukov, Ya. S., Linnik, N. K., Mironenko, V. G. (2001) Automated system of locally dosed application of fertilizers, meliorants and plant protection products. *Trudy 2-y MNPk po problemam differentsialnogo primeneniya udobreniy v sisteme koordinatnogo zemledeliya*. Ryazan, pp. 48–50 [in Russian].
 22. Brovarets, O. (2016) From plowless to the global rational agriculture. *Tehnika i tehnologiyi APK*, No. 10 (85), pp. 28–30 [in Ukrainian].
 23. Adamchuk, V. V., Moyseenko, V. K., Kravchuk, V. I., Voytyuk, D. G. (2002) Engineering for agriculture of the future. *Mehanizatsiya ta elektrifikatsiya silskogo gospodarstva*. Glevaha: NNTs «IMESG», iss. 86, pp. 20–32 [in Ukrainian].
 24. Kravchuk, V. I., Gritsishin, M. I., Koval, S. M. (eds.) (2004) Modern trends in the development of agricultural machinery constructions. Kyiv: Agrarna nauka, 398 p. [in Ukrainian].
 25. Ormadzhi, K. S. (1991) Quality control of field works. Moscow: Rosagropromizdat, 191 p. [in Russian].
 26. Maslo, I. P., Mironenko, V. G. (1999) Automated system of locally-dosed fertilizers and chemical plant protection products. *UAAN: Rozrobky – vyrobnytstvu*. Kyiv: Agrarna nauka, pp. 348–349 [in Ukrainian].

O. O. Brovarets, Ph.D., associated professor

e-mail: brovaretsnau@ukr.net

Kyiv Cooperative Institute of Business and Law
Lomonosov str., 18, Kyiv, 03041, Ukraine

THE USE OF MODERN INFORMATION AND TECHNICAL SYSTEMS IN AGRICULTURAL PRODUCTION

The article is devoted to optimization of productivity and provision of ecological quality of agricultural products with the help of modern information and technical systems, taking into account the variability of zones of management by agricultural field. It is proposed to represent the heterogeneity of the soil as a hierarchical subordination of phenomena. At the same time, the issue of measuring heterogeneity is proposed to be solved by quantitative comparison of measuring objects using the appropriate criteria. Under these conditions, there is a need to find the most effective way for operational monitoring of agrobiological state of agricultural land, which opens new prospects for organic farming using intelligent agricultural machines.

Keywords: information and technical system, operational monitoring, soil, samples, variability, value.

О. П. Плахотний, к.т.н., доцент,
доцент кафедри енерготехнологій
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна
e-mail: pldecor@ukr.net

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ АМПЛІТУДНО-ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ІМПУЛЬСІВ НА ПРОЦЕСИ АНОДНОГО РОЗЧИНЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНІЙ ОБРОБЦІ ДРОТЯНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

Комбінована технологія послідовного використання електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом дозволяє отримувати якісну поверхню і формувати металеві компоненти з високою точністю, незалежно від міцності та твердості матеріалів. Застосування імпульсного струму для електрохімічної обробки значно підвищує керованість процесу. В роботі наведено математичну модель масопереносу в дифузійному прианодному шарі, яка разом з розрахунком розподілу густини струму для схеми циліндричний катод – плоский анод дає можливість обґрунтованого вибору амплітудно-часових параметрів електричних імпульсів. Це забезпечує досягнення максимального показника виходу за струмом і точне прогнозування товщини знятого шару при електрохімічній обробці поверхні рухомим дротяним електродом. Проведені експериментальні дослідження по апробації розрахункової методики показали, що теоретичні розрахунки добре узгоджуються з експериментальними даними. Запропонований спосіб дозволяє підвищити ефективність електрохімічного фінішування поверхні після електроерозійної вирізної обробки.

Ключові слова: електроерозійна вирізна обробка, дротяна електрохімічна обробка, дротяний електрод-інструмент, міжелектродний проміжок, приповерхневі явища, дифузійний шар.

Вступ. Електроерозійна вирізна обробка (ЕЕВО) широко використовується в інструментальному виробництві, при виготовленні штампів, пресформ, деталей машин. Висока точність і відсутність механічних навантажень на заготовку зумовлюють застосування технології в мікрообробці. Однак на поверхні деталі залишається термічно змінений шар внаслідок дії високих градієнтів температури, спричинених іскровими розрядами в процесі ЕЕВО, який у багатьох випадках є небажаним явищем [1]. Швидке охолодження матеріалу з розплавленого стану призводить до появи на поверхні білого шару, в якому локалізуються залишкові напруження, що, в свою чергу, ініціює появу тріщин при навантаженні компонента на згин [2]. Для багатьох галузей сучасної промисловості наявність подібних поверхневих шарів є неприпустимою. Тому дослідження, присвячені модифікації поверхонь після ЕЕВО, є актуальними.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Найбільш близькою до ЕЕВО є електрохімічна вирізна обробка дротяним електродом, при якій відсутнє теплове

навантаження на деталь. Але на сьогодні ця технологія достойну конкуренцію ЕЕВО скласти не може через меншу продуктивність різання [3]. Проблемним питанням тут є створення напору електроліту в малому міжелектродному проміжку (МЄП) закритого вузького паза. Інтенсифікація потоку електроліту і прискорення масопереносу при анодному розчиненні можлива за рахунок застосування вібраційного ребристого дротяного електрода [4]. Але це суттєво ускладнює технологічну схему і призводить до послаблення контролю за процесом.

Найбільш вдалим, перспективним є поєднання електроерозійної та електрохімічної технологій при їх послідовному застосуванні [5, 6]. При комбінованій технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом деталь виготовляється за одну установку на електроерозійному верстаті одним і тим же електродом-інструментом [7]. При цьому використовуються висока точність і продуктивність ЕЕВО та високі показники якості вихідної поверхні після електрохімічної обробки.

Потужним ресурсом у керуванні процесами електрохімічного розчинення є можливість варіювання амплітудно-частотними параметрами імпульсного технологічного струму. Дозованість підведеної енергії до електродів дає можливість застосовувати імпульсну електрохімічну обробку для виготовлення мікророзмірних деталей, де необхідна висока точність і керованість процесу.

Правильний вибір амплітудно-часових параметрів імпульсного струму при практичному застосуванні електрохімічного фінішування поверхні дає значний ефект. Так, електрополірування трубчастої поверхні сталі SS316 в електроліті NaCl/NaNO₃ протягом 45 секунд покращило шорсткість поверхні з Ra = 1 мкм до дзеркального вигляду з фіналом Ra = 0,026 мкм [8]. Експериментальні дослідження по фінішуванню деталей з підшипникової сталі GCr15 в суміші розчинів NaCl і NaNO₃ дали можливість підібрати такі режими імпульсного струму, що забезпечили покращення шорсткості поверхні з Ra = 1,6 мкм до Ra = 0,12 мкм [9].

Кількісне моделювання при імпульсній електрохімічній мікрообробці проводять на основі заміщення міжелектродного проміжку еквівалентними електричними схемами [10] або на основі розв'язку системи диференціальних рівнянь масопереносу в електричному полі заряджених реагуючих іонів та рівняння Пуассона для електростатичного потенціалу поля з урахуванням відповідних початкових і граничних умов [11]. Однак для технологічної схеми дротяний циліндричний катод – плоский анод такі математичні моделі не адаптовані.

Мета роботи – розробити математичну модель та провести її експериментальну апробацію для обґрунтованого вибору амплітудно-часових параметрів імпульсного струму, який забезпечить ефективність процесу анодного розчинення при комбінованій технології електроерозійної та електрохімічної обробки дротяним електродом.

Виклад основного матеріалу дослідження. Електрохімічна обробка (ЕХО) є певним типом електролізу з дією електричного струму, що проходить через електроліт у гальванічному елементі. Деталь, що обробляється, служить анодом. Струм, що подається ззовні, проходить від анода до катода, приводить до видалення поверхневих шарів металу, які розчиняються в електроліті, стають катіонами і прямують до катода. При електрохімі-

чній обробці використовують такі електроліти, матеріали анода (переважно сталі) та катода (латуні), катіони яких не осідають на поверхні катода. Таким підбором забезпечується основна перевага ЕХО – незмінність форми електрода-інструмента [13]. Кількість видаленого металу залежить від розчину електроліту, температури, густини струму і електрохімічного еквіваленту матеріалу заготовки. Зазвичай амплітуда струму і час – дві керовані змінні для здійснення контрольованого перебігу процесу і досягнення необхідних показників поверхні деталі. Граничні обмеження керованості цих змінних пов'язані з механізмами процесів, які відбуваються на поверхні металу при ЕХО (рис. 1). Вважається [12], що інтенсивність анодного розчинення може бути обмежена масопереносом, а саме, дифузією іонів металу, що розчиняються, акцепторних компонентів з електроліту та молекул води. На поверхні анода утворюється пористо-компактна соляна плівка. Причому, утворення компактного сольового шару товщиною близько 10 нм відбувається переважно на дні впадин, і рух іонів у ньому здійснюється завдяки наявності високого електричного поля. Цей шар має великий опір через низьку рухомість іонів у твердому стані. Далі знаходиться пористий шар плівки товщиною близько кілька мікронів, заповнений електролітом, насиченим іонами металів, що розчинилися. В сукупності ці компактно-пористі шари становлять адсорбційний подвійний шар (рис. 1). Густина струму контролюється підходом акцепторних іонів до поверхні шару, тобто процесами масопереносу в дифузійному шарі, який розташований далі. Катіони металу, що виділяються і адсорбуються на поверхні подвійного шару, видаляються (сольватуються) акцепторними іонами, які дифундують до поверхні. В стаціонарному стані дії електричного поля концентрація акцепторних іонів у дифузійному шарі менша, ніж в об'ємі електроліту і на межі електрод/електроліт набуває значення, близького до нуля, якщо іони споживаються, як тільки доходять до поверхні. Концентрація катіонів металу, навпаки, зростає, відбувається блокування поверхні цими адсорбованими іонами, що призводить до виникнення надпотенціалу перенапруження. Це, в свою чергу, ініціює сторонні хімічні реакції, що споживають частину кількості затраченої електрики, і ефективність основного процесу розчинення падає, змінюється якість обробленої поверхні.

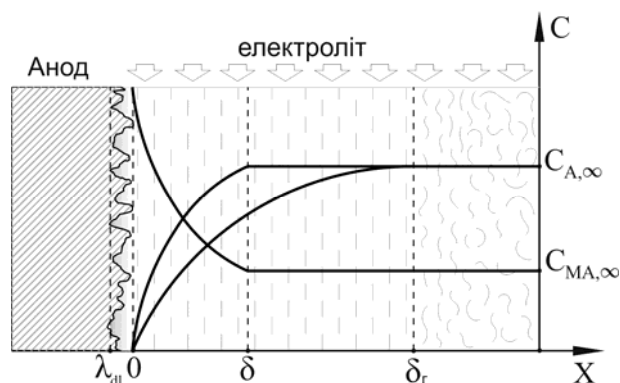


Рис. 1. Розподіл концентрації акцепторних іонів C_A і адсорбованих іонів металу C_{MA} в електроліті біля поверхні анода: $\lambda_{ад}$ – товщина адсорбційного подвійного шару, δ – товщина дифузійного шару, δ_g – товщина гідродинамічного пограничного шару [12]

Місцева густина струму на аноді, яка залежить від значення амплітуди імпульсів струму, є дуже важливим параметром для контролю за процесом розчинення. Для конфігурації циліндричний дротяний катод – плоский анод такий розподіл описується аналітичними формулами. При поверхневій обробці підбирають такий склад і концентрацію електролітів, щоб досягти більшої густини струму на виступах порівняно з впадинами і досягти вирівнювання поверхні завдяки переважному розчиненню виступів. Важливим завданням є забезпечення достатньої густини струму для рухомості іонів у в'язкому адсорбційному подвійному шарі. Але збільшення амплітуди струму викликає необхідність скорочувати час дії імпульсу через більш швидке виникнення дифузійних обмежень. Тому кількісні моделі розподілу густини струму і дифузійних процесів у МЕР є дієвим інструментом для керування процесами поверхневого анодного розчинення.

Математична модель масопереносу в прианодних шарах електроліту при ЕХО. Математична модель базується на розв'язку нестационарної задачі дифузії в приелектродній області (рис. 1), який описує коливання концентрації $C(x,t)$ реагуючих іонів в електроліті внаслідок дії періодичного струму. Для двокомпонентних електролітів типу NaCl , NaNO_3 розглядаються $C_1(x,t)$ – концентрація натрію (катиони), $C_2(x,t)$ – концентрація хлору (аніони) та D_1 , D_2 – коефіцієнти дифузії відповідно натрію і хлору.

Приймемо наступні спрощення: розчин електроліту має достатньо інертні іони солі, тому потоком міграції іонів внаслідок дії електричного поля можна знехтувати; фізичні параметри електроліту постійні; дія сил тяжіння в області дифузії незначна; в об'ємі

електроліту не відбуваються хімічні реакції. Період імпульсів повинен бути довшим, ніж час зарядки-розрядки подвійного електричного шару, який зазвичай триває кілька мікросекунд. За таких умов рівняння дифузії має вигляд [14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C = D \nabla^2 C. \quad (1)$$

Початкові та граничні умови:

$$C = C_\infty \text{ при } t=0;$$

$$C = C_\infty \text{ при } x \rightarrow \infty; \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{i(t)}{nFD} \text{ при } x=0;$$

де D – коефіцієнт дифузії іонного компонента, $\vec{v}$ – швидкість електроліту, C_∞ – значення концентрації далеко від електрода (в об'ємі електроліту), n – кількість електронів, які перенесені в електродній реакції, $F = 9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль – число Фарадея.

Для малих періодів імпульсів струму в тонких приелектродних шарах, які знаходяться всередині гідродинамічного пограничного шару (рис. 1), внесок конвективної складової $\vec{v} \cdot \vec{\nabla} C$ є незначним [14, 15]. Тому рівняння (1) можна спростити:

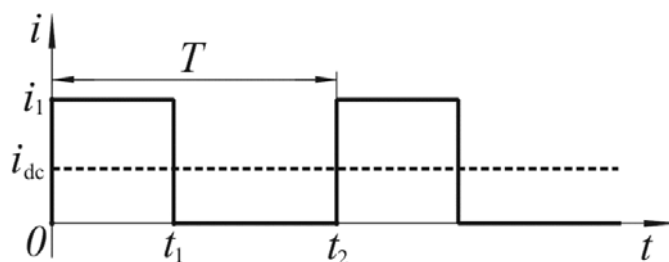
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C. \quad (3)$$

Представимо імпульсний струм (рис. 2), який проходить через поверхню розділу електрод/електроліт, у вигляді суми усередненої по часу постійної складової i_{dc} і змінної складової коливального струму i_{ac} :

$$i(t) = i_{dc} + i_{ac}(t), \quad (4)$$

тут середня постійна густина струму

$$i_{dc} = \frac{i_1 t_1}{T}. \quad (5)$$

Рис. 2. Форма технологічних імпульсів струму $i(t)$ при ЕХО

Змінна густина струму на двох ділянках

$$i_{ac}(t) = \begin{cases} i_1 - i_{dc} & \text{при } 0 < t < t_1, \\ -i_{dc} & \text{при } t_1 < t < t_2. \end{cases} \quad (6)$$

Аналогічно можна розкласти концентрацію

$$C(x, t) = \bar{C}(x) + \tilde{C}(x, t), \quad (7)$$

де $\bar{C}(x)$ – стала концентрація, що встановилася, $\tilde{C}(x, t)$ – змінна концентрація.

За умови (7) із рівнянь (2), (3) одержимо два рівняння для $\bar{C}(x)$ та $\tilde{C}(x, t)$ з відповідними граничними та початковою умовами.

Рівняння для $\bar{C}(x)$:

$$\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} = 0, \quad (8)$$

за умов

$$\bar{C} = C_\infty \text{ при } x \geq \delta, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = -\frac{i_{dc}}{nFD} \text{ при } x = 0. \quad (10)$$

Розв'язком рівняння (8) буде:

$$\bar{C}(x) = C_1 x + C_2,$$

де C_1, C_2 – сталі інтегрування. Задовольнивши умови (9) і (10), отримаємо:

$$C_1 = -\frac{i_{dc}}{nFD}, \quad C_2 = C_\infty + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta. \quad (11)$$

Тому розв'язок рівняння (8) набуде наступного вигляду:

$$\bar{C}(x) = -\frac{i_{dc}}{nFD} x + C_\infty + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta. \quad (12)$$

Знайдемо $\bar{C} \Big|_{x=0} = C_\infty + \frac{i_{dc}}{nFD} \delta$. В граничному випадку при $i_{dc} = i_{lim}$ буде

$$0 = C_\infty + \frac{i_{lim}}{nFD} \delta, \text{ звідки}$$

$$i_{lim} = -\frac{nFDC_\infty}{\delta} \quad (13)$$

– обмежуюча величина густини постійного струму [12].

В літературі наведені різні формули для визначення товщини дифузійного шару. При потенціостатичному режимі: $\delta_n = \sqrt{\pi D t_1}$ [16];

при гальваностатичному режимі: $\delta_e = 2\sqrt{\frac{D t_1}{\pi}}$

[12, 16, 17]; з урахуванням швидкості v руху

електроліту по електроду: $\delta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{vH}{v}} \cdot \left(\frac{D}{v}\right)^{\frac{1}{3}}$,

де v – кінематична в'язкість електроліту, H – відстань від початку контакту потоку, що набігає, з поверхнею анода [16].

Для коливальної частини концентрації

$\tilde{C}(x, t)$ отримуємо рівняння:

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} = D \nabla^2 \tilde{C} \quad (14)$$

з умовами:

$$\tilde{C} = 0 \text{ при } x = \delta,$$

$$\tilde{C} = 0 \text{ при } t = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial x} = -\frac{i_{ac}(t)}{nDF} \text{ при } x = 0.$$

Задача (14), (15) розв'язується з використанням перетворення Лапласа [15, 18]. Поверхнева змінна концентрація:

$$\tilde{C}_s(t) = -\frac{1}{nF} \int_0^t Y(t-u) \cdot i_{ac}(u) du, \quad (16)$$

$$\text{де } Y(t) = \frac{2}{\delta} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{\pi^2 D}{\delta^2} (m-\frac{1}{2})^2 t}.$$

Введемо безрозмірні величини:

$$C^* = \frac{C}{C_\infty}, C_s^* = \frac{C_s}{C_\infty}, \bar{C}_s^* = \frac{\bar{C}_s}{C_\infty}, \tilde{C}_s^* = \frac{\tilde{C}_s}{C_\infty}, t^* = \frac{t}{T}, T^* = \frac{DT}{\delta^2},$$

$$\theta_1 = \frac{t_1 - 0}{T}, \theta_2 = \frac{t_2 - t_1}{T}, i_{PL}^* = \frac{i_{PL}}{i_{lim}}, i_1^* = \frac{i_1}{i_{lim}}, i_{ac}^* = \frac{i_{ac}}{i_{lim}}, i_{dc}^* = \frac{i_{dc}}{i_{lim}}, \quad (17)$$

де θ – сквапність, i_{PL} – гранично допустима густина струму, при якій поверхнева концентрація $C_s = 0$. Тоді згідно з (7) повна безрозмірна поверхнева концентрація:

$$C_s^* = 1 - i_{dc}^* - \frac{1}{nFC_\infty} \int_0^{t^*} Y(t^* - u) \cdot i_{ac}(u) du. \quad (18)$$

Формула (18) свідчить, що C_s^* зменшується за рахунок середнього струму i_{dc} та змінного струму $i_{ac}(t)$. У формулі (18) згідно з (6) $i_{ac}(t)$ стала для кожної ділянки (рис. 2), тому обрахунок інтегралу слід вести по ділянках. Отримаємо Ψ_1 , Ψ_2 значення інтегралу по ділянках:

$$\Psi_1 = 2T^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \left\{ \left[1 - e^{-\lambda_m t_1^*} \right] \right\} \text{ при } 0 < t^* < t_1^*,$$

$$\Psi_2 = 2T^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m} \left\{ \left[1 - e^{-\lambda_m t_2^*} \right] - \left[1 - e^{-\lambda_m t_1^*} \right] \right\} \text{ при } t_1^* < t^* < t_2^*, \quad (19)$$

$$\text{тут } \lambda_m = \pi^2 T^* \left(m - \frac{1}{2} \right)^2.$$

При малих значеннях T власні числа λ_m набутимуть малих значень і ряди у формулах (19) будуть збігатися повільно. Щоб спростити (19), винесемо за знак Σ параметри, що не залежать від m , та врахуємо, що

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{\pi^2}{8}.$$

$$\Psi_1 = 1 - \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(m - \frac{1}{2} \right)^2} e^{-\lambda_m t_1^*},$$

$$\Psi_2 = \frac{2}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(m - \frac{1}{2} \right)^2} \left(e^{-\lambda_m t_1^*} - e^{-\lambda_m t_2^*} \right). \quad (20)$$

Загальна безрозмірна поверхнева концентрація набуде вигляду:

$$C_s^* = 1 - \frac{i_{dc}}{i_{lim}} - \left(\frac{i_1 - i_{dc}}{i_{lim}} \Psi_1 + \frac{i_{dc}}{i_{lim}} \Psi_2 \right). \quad (21)$$

Прирівняємо до нуля C_s^* у формулі (21) та знайдемо допустиму густину струму $i_{PL} = i$

при $C_s^* = 0$ та при $t^* = t_1^*$, t_2^* , тобто в кінці кожної ділянки [15, 18].

Для прямокутного імпульсу (рис. 2), де навантажена перша ділянка, отримаємо:

$$i_{PL} = \frac{i_{lim}}{\theta_1 + (1 - \theta_1) \Psi_1}. \quad (22)$$

Для ефективної обробки з максимальним значенням коефіцієнта виходу за струмом необхідне виконання умови

$$i_{max} \approx i_{PL}, \quad (23)$$

де i_{max} – максимальне значення густини струму на поверхні деталі для конкретної конфігурації електродів технологічної схеми ЕХО. У нашому випадку – це циліндричний дріт-катод і плоский анод, для яких розподіл напруженості електричного поля і густини струму обраховується за аналітичними формулами [7, 19, 20].

Вимогу (23) можна задовольнити, змінюючи технологічні параметри – напругу на електродах, величину міжелектродного проміжку, діаметр дріт-анода, концентрацію електроліту, а також за рахунок вибору t_1 , T , розв'язавши рівняння (22) відносно θ_1 .

Експериментальні дослідження ефективності анодного розчинення. Для узгодження розрахункової моделі з реальним технологічним процесом електрохімічної обробки дріт-анодом проведено серії експериментів. Використовувались дві технологічні схеми – з нерухомим електродом (рис. 3), в результаті розчинення утворювалась вертикальна канавка на поверхні деталі, і з рухомим електродом (рис. 4), відбувалося розчинення поверхневого шару деталі певної товщини.

Експерименти електрохімічної обробки поверхні деталі висотою 11,5 мм (матеріал заготовки – штампова сталь X12Ф1) проводились у середовищі електроліту 1М NaCl при температурі 37–42°C. Як катод використовувався латунний дріт (ДКРПМ ФКТЛ63) діаметром 0,2 мм. Величина міжелектродного зазору варіювалась в межах 0,2–0,4 мм; напруга, підведена в міжелектродний проміжок, вибиралася в межах 4–12 В; тривалість електричних імпульсів становила 0,2–5 мс, сквапність – 20–50 %, загальний час дії електрохімічного розчинення становив 240–900 с для нерухомого електрода, швидкість подачі – 0,6–3,5 мм/хв. для експериментів з рухомим електродом.

Ефективність електрохімічного розчинення для різних амплітудно-часових параметрів імпульсів визначалася за коефіцієнтом

виходу за струмом при зіставленні експериментальних і теоретично розрахованих показників.

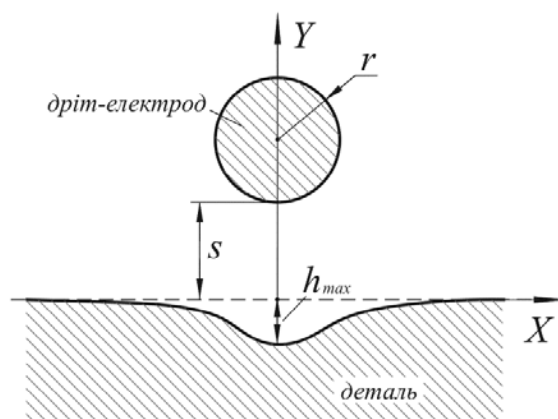


Рис. 3. Отримання канавки на поверхні деталі в результаті анодного розчинення з нерухомим катодом

Для експериментів з нерухомим катодом коефіцієнт виходу за струмом $\eta = \frac{h_{\text{екс}}}{h_{\text{max}}}$, де

$h_{\text{екс}}$ – глибина експериментально отриманої канавки, h_{max} – розрахункова глибина канавки. Теоретичний розрахунок проводився за формулами [7, 19]:

$$h_{\text{max}} = \frac{2U\kappa}{a \ln(p)} K_v \frac{t_1}{T} t, \quad a = \sqrt{2rs + s^2}, \quad p = \frac{a-s}{a+s}; \quad (24)$$

де U – напруга на електродах, κ – провідність електроліту, K_v – електрохімічний еквівалент матеріалу анода, t_1 , T – тривалість і час імпульсу струму відповідно, t – загальний час роз-

чинення, r – радіус дроту-електрода, s – величина міжелектродного проміжку.

Максимальна густина струму

$$i_{\text{max}} = \frac{2U\kappa}{a \ln(p)}. \quad (25)$$

В табл. 1 наведено амплітудно-часові параметри імпульсів струму, розраховані значення допустимої густини струму i_{PL} та значення коефіцієнта виходу за струмом η для експериментів з нерухомим катодом. Результати свідчать, що при відхиленні величини максимальної густини струму i_{max} , реалізованої в експерименті, від розрахованої i_{PL} коефіцієнт виходу за струмом падає.

Таблиця 1

Результати обчислення коефіцієнта виходу за струмом в експериментах з нерухомим катодом

Код експерименту	$i_{\text{max}}, \text{A/cm}^2$	$t_1, \text{мс}$	$T, \text{мс}$	$i_{PL}, \text{A/cm}^2$	η
6K1	5,6	2	8	6,95	0,96
6K2	14,97	2	8	6,95	0,64
6K3	31,08	2	8	6,95	0,48
6K4	30,91	2	4	6,04	0,38
6K5	28,9	1	2	8,54	0,43

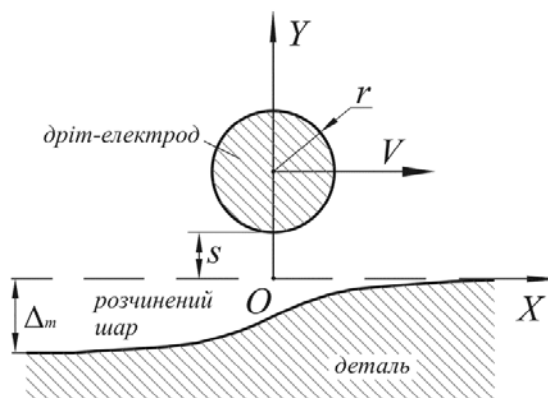


Рис. 4. Анодне розчинення поверхневого шару деталі з рухомим катодом

Для технологічної схеми з рухомим дрітяним електродом розрахунки проводились за наступними формулами [20]. Коефіцієнт виходу за струмом

$$\eta = \frac{\Delta_{\text{екс}}}{\Delta_m},$$

де $\Delta_{\text{екс}}$ – виміряна товщина розчиненого шару в результаті експерименту, Δ_m – розрахункова

товщина розчиненого шару: $\Delta_m = \frac{2\pi U \kappa K_v}{V \ln(p)}$,

V – швидкість руху дрітяного електрода.

Максимальна густина струму:

$$i_{\text{max}} = \frac{2U\kappa}{a \ln(p)}.$$

З рухомим дрітяним електродом проведено серії експериментів. Найбільш переконливі результати наведено в табл. 2. В експерименті 1П9 значення i_{max} близьке до розрахованої величини i_{PL} і отримано високу ефективність ЕХО з коефіцієнтом виходу за струмом 0,9. А в експерименті 4П6(1) так вибрані технологічні параметри, що i_{max} майже в 3 рази перевищує допустиме значення i_{PL} і маємо низьку ефективність процесу з коефіцієнтом виходу за струмом 0,15.

Таблиця 2

**Результати обчислення коефіцієнта виходу за струмом
в експериментах з рухомим катодом**

Код експерименту	$i_{\text{max}}, \text{A/cm}^2$	$t_I, \text{мс}$	$T, \text{мс}$	$i_{PL}, \text{A/cm}^2$	η
1П9	4,59	5	10	4,68	0,90
4П6(1)	35,0	2	10	11,7	0,15

З підвищенням густини струму в експериментах з рухомим катодом спостерігалась загальна тенденція до зменшення шорсткості вихідної поверхні. Однак в експерименті 4П6(1) через значне порушення умови (23) отримали не тільки низьку ефективність виходу за струмом, але й гіршу якість поверхні порівняно з експериментом 1П9, де застосовувалась менша густина струму. Це означає, що побічні реакції, на які витрачається частина електричної енергії, призводять тільки до погіршення якості обробленої поверхні. Отже, для отримання якісної поверхні з низькою шорсткістю слід підвищувати густина струму,

обов'язково зважаючи на вимоги наведеної вище розрахункової методики. Крім того, встановлений коефіцієнт виходу за струмом забезпечує точне прогнозування товщини знятого шару (термічно зміненого внаслідок електроерозійних іскрових розрядів) при застосуванні ЕХО в складі комбінованої електрохімічної і електроерозійної обробки дрітяним електродом.

Висновки

1. У ході теоретично-експериментальних досліджень процесів анодного розчинення при електрохімічній обробці дрітяним електродом встановлено, що розроблена математична мо-

дель дифузії в прианодних шарах дає можливість розрахувати технологічні параметри, які забезпечать максимальну ефективність ЕХО по виходу за струмом. Проведені зіставлення результатів експериментів з дотриманням теоретичних рекомендацій і з відхиленням від них доводять, що створена методика дає можливість виконати обґрунтований вибір амплітудно-часових параметрів при проектуванні технологічних процесів електрохімічної обробки дрітним електродом.

2. Запропонований підхід з використанням математичного моделювання дає можливість у перспективі перейти до застосування більш складних форм імпульсів технологічного струму, що надасть додаткові важелі в керуванні процесами в МЕП для покращення якості вихідної поверхні внаслідок анодного розчинення дрітним електродом.

Список літератури

1. Straka L., Čorný I., Pitel J. Properties evaluation of thin microhardened surface layer of tool steel after wire EDM. *Metals*. 2016. V. 6, № 5. P. 95.
2. Klocke F., Hensgen L., Klink A., Ehle L., Schwedt A. Structure and composition of the white layer in the wire-EDM process. *Procedia CIRP*. 2016. V. 42. P. 673–678.
3. Debnath S., Kundu J., Bhattacharyya B. Modeling and influence of voltage and duty ratio on wire feed in WECM: possible alternative of WEDM. *Journal of the Electrochemical Society*. 2018. V. 165, № 2. P. E35–E44.
4. Zou X., Fang X., Chen M., Zhu D. Investigation on mass transfer and dissolution localization of wire electrochemical machining using vibratory ribbed wire tools. *Precision Engineering*. 2018. V. 51. P. 597–603.
5. Skoczypiec S. Discussion of ultrashort voltage pulses electrochemical micromachining: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 87, № 1-4. P. 177–187.
6. Skoczypiec S., Ruszaj A. A sequential electrochemical-electrodischarge process for micropart manufacturing. *Precision Engineering*. 2014. V. 38, № 3. P. 680–690.
7. Osipenko V. I., Plakhotny A. P., Denisenko A. Yu. Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2014. Вип. 1 (43). С. 55–60.
8. Taylor E. J., Inman M. Electrochemical surface finishing. *The Electrochemical Society Interface*. 2014. V. 23, № 3. P. 57–61.
9. Zheng X. H., Wei Z. F., Huang S. Experiment study of pulse electrochemical finishing of GCr15 bearing steel. *Advanced Materials Research*. 2013. V. 705. P. 203–208.
10. Kozak J., Gulbinowicz D., Gulbinowicz Z. The mathematical modeling and computer simulation of pulse electrochemical micromachining. *Engineering Letters*. 2008. V. 16, № 4. P. 556–561.
11. Kumsa D., Scherson D. A. Theoretical aspects of pulsed electrochemical micromachining. *Journal of The Electrochemical Society*. 2013. V. 160, № 8. P. H481–H488.
12. Yang G., Wang B., Tawfiq K., Wei H., Zhou S., Chen G. Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surface Engineering*. 2016. V. 33, № 2. P. 149–166.
13. Справочник по электрофизическим и электрохимическим методам обработки / [ред. В. А. Волосатов]. Москва: Машиностроение, 1988. 719 с.
14. Smets N., Van Damme S., De Wilde D., Weyns G., Deconinck J. Time-averaged concentration calculations in pulse electrochemical machining, spectral approach. *Journal of applied electrochemistry*. 2009. V. 39, № 12. P. 2481–2488.
15. Chin D. T. Mass transfer and current-potential relation in pulse electrolysis. *Journal of the Electrochemical Society*. 1983. V. 130, № 8. P. 1657–1667.
16. Bagotsky V. S. Fundamentals of electrochemistry. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ., 2005. 722 p.
17. Purushothaman B., Morrison P., Landau U. Reducing mass-transport limitations by application of special pulsed current modes. *Journal of the Electrochemical Society*. 2005. V. 152, № 4. P. J33–J39.
18. Choo R., Toguri J., El-Sherik A., Erb U. Mass transfer and electrocrystallization analyses of nanocrystalline nickel production by pulse plating. *Journal of applied electrochemistry*. 1995. V. 25, № 4. P. 384–403.
19. Осипенко В. И., Плахотный А. П., Билан А. В. Исследование процессов съема материала при электрохимической размерной обработке проволочным электро-

дом. *Вісник СевНТУ*: зб. наук. праць. 2011. Вип. 118. С. 107–112.

20. Житников В. П., Зайцев А. Н. Импульсная электрохимическая размерная обработка: монография. Москва: Машиностроение, 2008. 413 с.

References

1. Straka, L., Corny, I. and Pitel, J. (2016) Properties evaluation of thin microhardened surface layer of tool steel after wire EDM. *Metals*, 6 (5), p. 95.
2. Klocke, F., Hensgen, L., Klink, A., Ehle, L. and Schwedt, A. (2016) Structure and composition of the white layer in the wire-EDM process. *Procedia CIRP*, (42), pp. 673–678.
3. Debnath, S., Kundu, J. and Bhattacharyya, B. (2018) Modeling and influence of voltage and duty ratio on wire feed in WECM: possible alternative of WEDM. *Journal of the Electrochemical Society*, 165 (2), pp. E35–E44.
4. Zou, X., Fang, X., Chen, M. and Zhu, D. (2018) Investigation on mass transfer and dissolution localization of wire electrochemical machining using vibratory ribbed wire tools. *Precision Engineering*, (51), pp. 597–603.
5. Skoczypiec, S. (2016) Discussion of ultra-short voltage pulses electrochemical micromachining: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87 (1–4), pp. 177–187.
6. Skoczypiec, S. and Ruszaj, A. (2014) A sequential electrochemical-electrodischarge process for micropart manufacturing. *Precision Engineering*, 38 (3), pp. 680–690.
7. Osipenko, V. I., Plakhotnyi, A. P. and Denisenko, A. Yu. (2014) Improved methodology for calculating the processes of surface anodic dissolution of spark eroded recast layer at electrochemical machining with wire electrode. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu*, 1 (43), pp. 55–60.
8. Taylor, E. J. and Inman, M. (2014) Electrochemical surface finishing. *The Electrochemical Society Interface*, 23 (3), pp. 57–61.
9. Zheng, X. H., Wei, Z. F. and Huang, S. (2013) Experiment study of pulse electrochemical finishing of GCr15 bearing steel. *Advanced Materials Research*, (705), pp. 203–208.
10. Kozak, J., Gulbinowicz, D. and Gulbinowicz, Z. (2008) The mathematical modeling and computer simulation of pulse electrochemical micromachining. *Engineering Letters*, 16 (4), pp. 556–561.
11. Kumsa, D. and Scherson, D. A. (2013) Theoretical aspects of pulsed electrochemical micromachining. *Journal of the Electrochemical Society*, 160 (8), pp. H481–H488.
12. Yang, G., Wang, B., Tawfiq, K., Wei, H., Zhou, S. and Chen, G. (2016) Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surface Engineering*, 33 (2), pp. 149–166.
13. Volosatov, V. A. (ed.) (1988) Reference book of electrophysical and electrochemical methods of processing. Moscow: Mashinostroenie. 719 p. [in Russian].
14. Smets, N., Van Damme, S., De Wilde, D., Weyns, G. and Deconinck, J. (2009) Time-averaged concentration calculations in pulse electrochemical machining, spectral approach. *Journal of applied electrochemistry*, 39 (12), pp. 2481–2488.
15. Chin, D. T. (1983) Mass transfer and current-potential relation in pulse electrolysis. *Journal of the Electrochemical Society*, 130 (8), pp. 1657–1667.
16. Bagotsky, V. S. (2005) Fundamentals of electrochemistry. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ. 722 p.
17. Purushothaman, B., Morrison, P. and Landau, U. (2005) Reducing mass-transport limitations by application of special pulsed current modes. *Journal of the Electrochemical Society*, 152 (4), pp. J33–J39.
18. Choo, R., Toguri, J., El-Sherik, A. and Erb, U. (1995) Mass transfer and electrocrystallization analyses of nanocrystalline nickel production by pulse plating. *Journal of applied electrochemistry*, 25 (4), pp. 384–403.
19. Osipenko, V. I., Plakhotnyi, A. P. and Bilan, A. V. (2011) Investigation of material removal processes in electrochemical machining using wire electrode. *Visnik SevNTU: coll. of sci. works*, (118), pp. 107–112 [in Russian].
20. Zhitnikov, V. P. and Zaitsev, A. N. (2008) Pulse precision electrochemical machining. Moscow: Mashinostroenie, 413 p. [in Russian].

O. P. Plakhotnyi, *Ph.D., associate professor,*
department of Energy Technology
Cherkasy State Technological University,
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
e-mail: pldecor@ukr.net

**MODELING OF INFLUENCE OF AMPLITUDE-TIME PARAMETERS
OF ELECTRICAL PULSES ON ANODE DISSOLUTION PROCESSES
IN WIRE ELECTROCHEMICAL MACHINING**

Combined technology of sequential use of electroerosive and electrochemical machining with wire electrode allows to obtain high-quality surface and to form metal components with high accuracy, regardless of material strength and hardness. Pulsed current in electrochemical machining greatly increases process controllability. The paper provides mathematical model of mass transfer in near-anode diffusion layer. This, together with calculation of current density distribution for a scheme with cylindrical cathode and flat anode, gives reasonable choice of amplitude-time parameters of electrical impulses. Such approach provides maximal current efficiency and precise prediction of removed layer thickness of surface obtained by a moving wire electrode. Conducted experimental researches on approbation of calculated method have shown that theoretical calculations are well consistent with experimental data. Proposed method allows to increase efficiency of electrochemical surface finishing after electroerosive cutting.

Keywords: *wire electrical discharge machining, wire electrochemical machining, wire tool-electrode, inter-electrode spacing, surface phenomena, diffusion layer.*

М. П. Рудь, к.т.н., доцент,
e-mail: hochspannung77@gmail.com

О. О. Похил, аспірант,
e-mail: olegpokhyl@gmail.com

С. В. Заболотний, д.т.н., доцент,
e-mail: s.zabolotnii@chdtu.edu.ua

А. П. Солтус, д.т.н., професор
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

КІНЦЕВОЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ВИРОБІВ З ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННІ МЕТОДОМ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

3D-друк функціональних деталей має суттєві переваги порівняно з традиційними технологіями завдяки здатності виготовляти деталі зі складними формами без необхідності виготовляти спеціалізовану оснастку. Однак існує ряд геометричних форм об'єктів, отримання яких з допомогою 3D-друку потребує додаткових досліджень. Одними з таких об'єктів є тонкостінні деталі. В роботі побудовано математичну модель теплопровідності процесу 3D-друку тонкостінних виробів з метою визначення оптимальних параметрів технологічного процесу, при яких забезпечуються мінімальні термодеоформації виробу і максимальна адгезія шарів.

Ключові слова: 3D-принтер, FDM, моделювання методом наплавлення, метод скінченних елементів.

Вступ. Технології адитивного виробництва являють собою групу технологій, в яких виготовлення виробу здійснюється за рахунок нарощування матеріалу шар за шаром. Історично адитивне виробництво стало розвитком технологій швидкого прототипування (Rapid Prototyping) і передбачає створення функціональних деталей, готових до використання. Технологія моделювання методом наплавлення Fused Deposition Modeling (FDM) або Fused Filament Fabrication (FFF) на сьогодні є найбільш поширеною та доступною з технологій адитивного виробництва [1]. Ця технологія інтенсивно розвивається, постійно розширюючи сферу застосування та перелік доступних матеріалів з широким вибором властивостей.

Аналіз проблеми та останніх досліджень. Процес виготовлення виробів методом наплавлення є багатофакторним. Результатом виконання процесу є виготовлення виробу, який має відповідати заданим вимогам якості. Фактори, що впливають на властивості виробу, можна розділити на такі, що залежать від конструктивних особливостей 3D-принтера, і технологічні параметри власне 3D-друку. На сьогодні відомі різноманітні різновиди конструкцій 3D-принтерів, які за заявами виробників дозволяють досягати високих показників якості деталей.

FDM 3D-друк функціональних деталей має суттєві переваги порівняно з традиційни-

ми технологіями завдяки здатності виготовляти деталі зі складними формами без необхідності виготовляти спеціалізовану оснастку, як то ливарні форми, профільні інструменти тощо. Функціональні вироби, виготовлені методом FDM, що мають різноманітне застосування в медицині, автомобілебудуванні та інших важливих галузях, повинні забезпечувати різноманітні вимоги з геометричної точності, механічних властивостей, хімічної стійкості, біосумісності тощо [2-9].

Як нова технологія, яка знаходить все більше практичне застосування, 3D-друк привертає увагу широкого кола науковців та практиків. Значна частина досліджень присвячена вивченню термомеханічної поведінки виробів під час друку та впливу технологічних параметрів 3D-друку на геометричну точність виробів [10-11]. Точність геометричних форм функціональних деталей є важливим фактором, який визначає їх експлуатаційні характеристики.

Серед завдань, які на сьогодні є недостатньо дослідженими, можна виокремити процеси формування тонкостінних деталей методом наплавлення. Виготовлення таких виробів може становити значний інтерес завдяки перевагам 3D-друку, за умови вирішення проблем, викликаних низькою жорсткістю виробу, що може деформуватися в результаті явищ термодеоформації, оплавлення кількох нижніх шарів пластику при накладанні нового

шару, механічного впливу від сопла екструдера, під дією гравітаційних сил тощо [12].

Метою дослідження є побудова математичної моделі теплопровідності процесу 3D-друку тонкостінних виробів та визначення оптимальних параметрів технологічного процесу, при яких забезпечуються мінімальні термодформації виробу і максимальна адгезія шарів.

Виклад основного матеріалу

Постановка задачі теплопровідності.

Розглянемо пряму задачу теплопровідності. Як видно на рис. 1, модель складається з двох

частин, а саме: робочого столу зі скла (I) та виробу, який друкується з ASA пластику (II). На верхню границю виробу діє теплове джерело від сопла екструдера з циліндричним розподілом потужності по перерізу, що рухається вздовж стінок виробу з постійною швидкістю. Також будемо вважати, що всі поверхні моделі знаходяться у контакті з повітрям навколишнього середовища з кімнатною температурою 25°C. Початкові умови задачі також враховують температуру попереднього нагріву робочого столу 100°C.

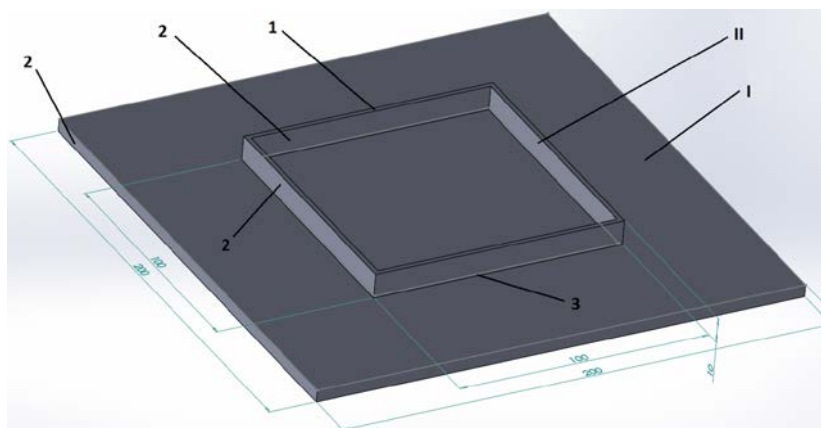


Рис. 1. Схема моделі розрахунку теплопровідності під час 3D-друку

Поверхні зразка обмінюються теплом з навколишнім середовищем температури T_{amb} за рахунок механізмів теплопровідності та конвективного теплообміну.

Розподіл потужності на контакті сопла екструдера та поверхні виробу описується законом $F(x,t)$, який відповідає циліндричному джерелу тепла діаметром 1 мм.

Розподіл температури всередині деталі описується диференціальним рівнянням:

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

де $\lambda(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $C_v(T)$ – об'ємна теплоємність, Дж/(кг·К).

Початкові та граничні умови:

Як початкова умова береться температура повітря 25°C і температура робочого столу (об'єкт I) 100°C.

Як граничні умови задається тепловий потік на поверхні 1 від сопла екструдера (крайові умови II роду), на поверхні 3, що відпо-

відає контакту між нагрівним столом і друкованою деталлю, умова неперервності теплового потоку (крайові умови IV роду), для всіх інших модельованих поверхонь задаються умови конвективного теплообміну (крайові умови II роду).

Розробка цифрової моделі досліджуваного об'єкта. Описана вище задача може бути вирішена лише на базі чисельних методів.

Розв'язання цієї задачі здійснимо за допомогою пакета моделювання фізичних процесів COMSOL Multiphysics. Вирішення диференціальних рівнянь у цьому пакеті здійснюється методом кінцевих елементів.

Побудова фізичної моделі в COMSOL складається з наступних етапів:

1) Вибір вимірності, фізичної задачі та числового вирішувача. Задано вирішення тривимірної задачі, фізична задача теплопровідності в твердих тілах Heat Transfer in Solids, обрано двокрокове вирішування: перший крок для стаціонарних умов – Stationary, другий для нестаціонарних – Time Dependent.

2) Прорисовка геометрії моделі. Ми будемо проводити розрахунки для випадку початку друку та в процесі друку (коли виріб

вже частково сформовано на робочому столі). Геометричні розміри відповідають зображе-

ним на рис. 1. Вигляд заготовки моделі з обраними параметрами показано на рис. 2.

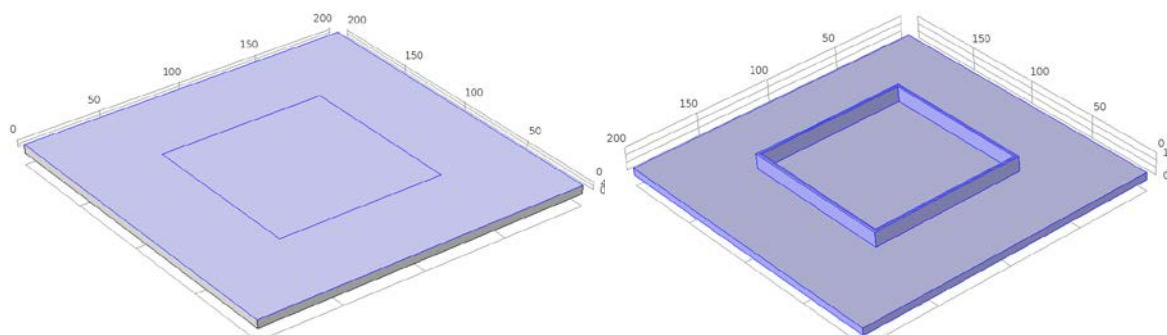


Рис. 2. Побудова геометрії моделі в пакеті COMSOL

3) Встановлення фізичних властивостей об'єкта моделювання та початкових умов задачі. Було обрано з бібліотеки матеріалів віконне скло та ABS пластик. Слід зазначити, що за умовами задачі (1) коефіцієнт теплопровідності λ та питома теплоємність C_p залежать від температури. В реальному матеріалі ця залежність нелінійна і її врахування збільшить точність розрахунку.

4) Встановлення граничних умов задачі. Граничні умови задачі встановлені відповідно до постановки задачі теплопровідності.

Початкові умови визначають кімнатну температуру навколишнього середовища.

$$T(x, y, z)|_{t=0} = T_{amb} = 25^\circ\text{C}.$$

Граничні умови:

Границя 1 (рис. 1): тепловий потік через поверхню (нелінійні крайові умови)

$$-n \cdot q = P_l \cdot f(O, e) \frac{|e \cdot n|}{\|e\|}, \quad (2)$$

де P_l – потужність джерела тепла (від дії сопла екструдера), Вт; e – вектор орієнтації на пряму джерела тепла; O – координати розташування точки центру джерела тепла.

Необхідно задати рівняння руху джерела тепла, при якому воно обчислюється по квадратній траєкторії зі швидкістю 2,5 см/с. Для цього задаються функції руху джерела по осях Ox та Oy . Графіки рівняння складаються з хвилеподібної трикутної функції $ts(t)$, аналітичної функції $xst(t) = (ts(t+1.25)+0.05)$ і шматочної функції $sx(x, t)$ та $sy(y, t)$ (табл. 2, 3) і представлені на рис. 3.

Таблиця 1

Шматочна функція $sx(x, t)$

Start	End	Function
0	2,5	$xst(t)$
2,5	5	0,1
5	7,5	$xst(t)$
7,5	10	0

Таблиця 2

Шматочна функція $sy(y, t)$

Start	End	Function
0	2,5	$xst(t)$
2,5	5	0,1
5	7,5	$xst(t)$
7,5	10	0

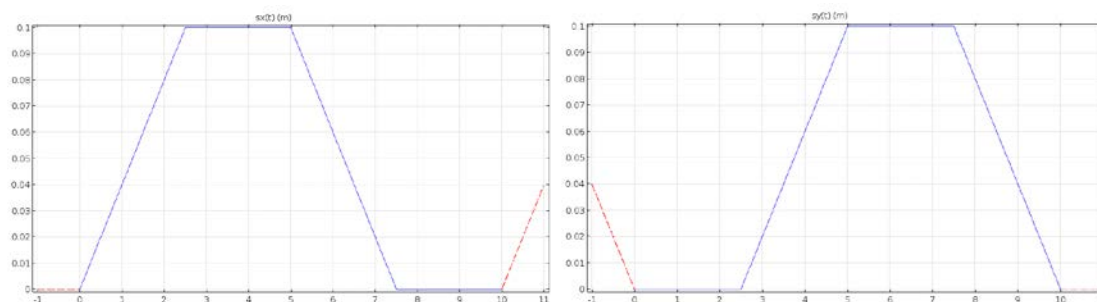


Рис. 3. Функції руху джерела тепла по осях Ox та Oy

Границя 2: вільний конвективний теплообмін уздовж вертикальної стінки

$$-n \cdot q = q_0, \quad (3)$$

де $q_0 = h(T_{\text{ext}} - T)$;

h — коефіцієнт тепловіддачі

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) & \text{if } Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} \left(0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492k}{\mu C_p} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right) & \text{if } Ra_L > 10^9 \end{cases}^2$$

L — висота стінки;

Ra_L — число Релея.

Границя 3: умова неперервності теплового потоку

$$-n_1 \left(-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) - n_2 \left(-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) = 0; \quad (4)$$

$$T_1(x, z) = T_2(x, z); (x, z)$$

5) Розбиття об'єкта на кінцеві елементи. Пакет COMSOL дозволяє автоматично розбивати об'єкти на елементи. Обираючи початкові параметри сітки розбиття, користувач може керувати цим процесом відповідно до необхідної точності розрахунку.

Для цієї моделі було обрано такі параметри: кінцеві елементи мають форму трикутників (Lagrange-Quadratic), автоматично будується сітка з параметром Extremely Coars (надзвичайно груба), за винятком поверхні друкованого виробу, для якого обрано параметр сітки Coarser (грубіша) та границі, на якій відбувається контакт джерела тепла з моделлю (рис. 1), де обрано сітку Extremely Fine (надзвичайно тонка) з максимальним розміром кінцевих елементів 0,5 мм (оскільки саме на цій границі можливі найбільші градієнти температури від дії теплового джерела). Результат розбиття об'єкта показано на рис. 4. Сітка складається з 11027 та 7394 елементів відповідно.

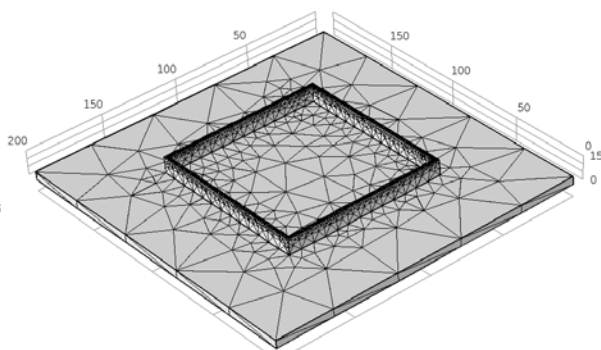
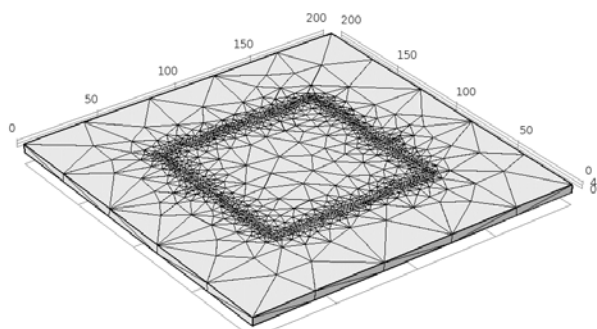


Рис. 4. Зображення моделі в режимі розбиття на кінцеві елементи

Вирішення задачі. Перед запуском вирішення задачі необхідно задати параметри вирішення та обрати один з вирішувачів пристроїв, реалізованих у пакеті COMSOL. Для вирішення першої задачі (початок друку) вирішення проходить в один етап. Враховуючи час проходження сопла по заготовці, обрано часовий діапазон вирішення від 0 до 20 секунд з кроком 0,1 секунди, що дозволить провести розрахунок двох проходів сопла по периметру деталі. Для вирішення другої задачі (друк стінки) вирішення відбувається в два етапи. Оскільки нагрів друкованої стінки відбувається знизу від нагрівного стола з постій-

ною температурою і час нагріву значно більший, ніж час проходження соплом одного периметра, цей процес можна вважати стаціонарним. Тому використовуємо вирішувач Stationary. Другий крок вирішення відбувається аналогічно, як для першої задачі. Для дослідження поширення тепла на нижні шари під час друку проведемо розрахунок дев'яти проходів сопла по периметру деталі.

Обробка отриманих даних. В досліджуваному випадку нас цікавить розподіл температури на поверхні об'єкта та на стінках виробу, що друкується.

Результати розрахунку для початку друку представлені на рис. 5. Розподіл температури на поверхні робочого стола при проходженні сопла екструдера в різні моменти

часу зображено на рис. 6. Основним завданням розрахунку цієї моделі є визначення оптимальних параметрів, при яких можна забезпечити фіксацію першого шару на підложці.

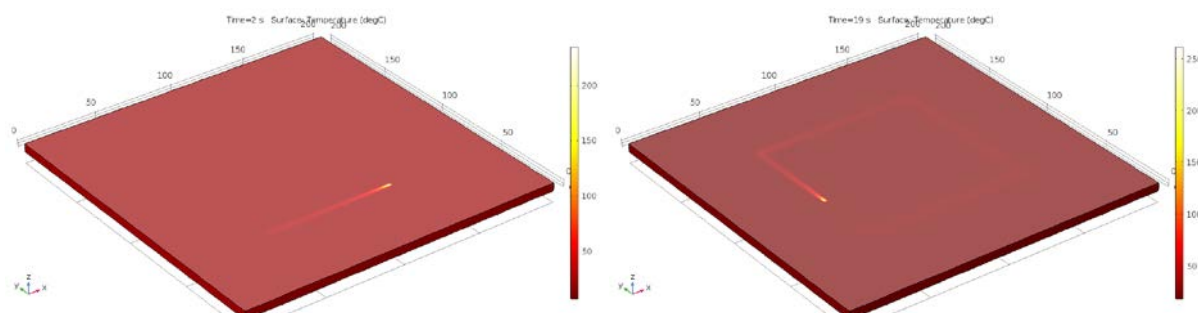


Рис. 5. Розподіл температури на поверхні робочого стола при проходженні сопла екструдера

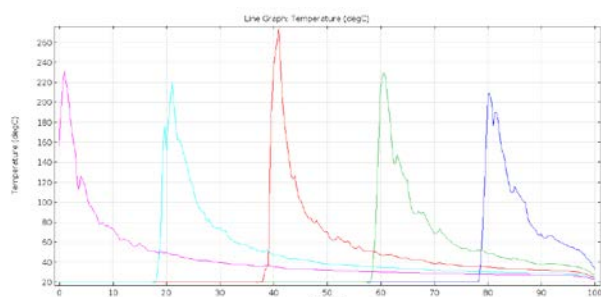


Рис. 6. Розподіл температури на поверхні скляної підложки в різних положеннях сопла екструдера при нанесенні першого шару деталі

На рис. 7-8 показано розраховану температуру в частково надрукованому виробі. Цей розрахунок дозволяє встановити розподіл температури вздовж стінки виробу під час друку, а також зміну температури на попередньо надрукованих шарах виробу. Це дасть змогу визначити оптимальні параметри друку, при яких не відбувається оплавлення нижніх шарів, що може призвести до деформації моделі. Іншим важливим завданням моделювання є визначення термодеомацій для запобігання деламінації шарів моделі.

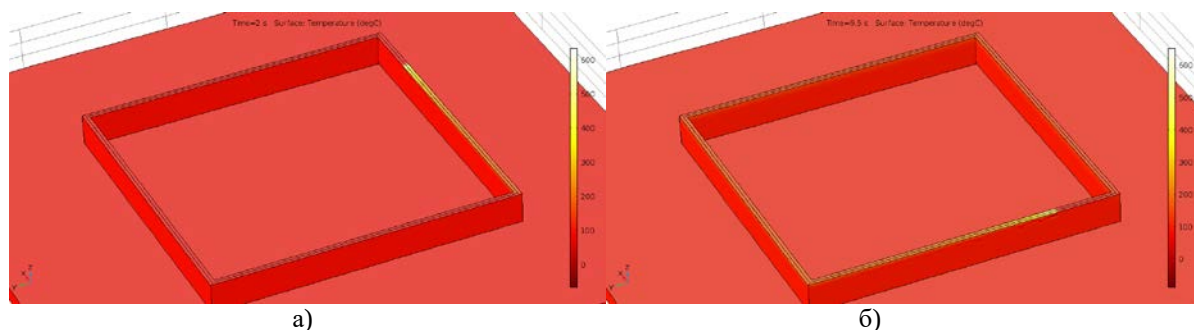


Рис. 7. Розподіл температури на поверхні друкованого виробу при проходженні сопла екструдера (а – перший прохід, б – дев'ятий прохід)

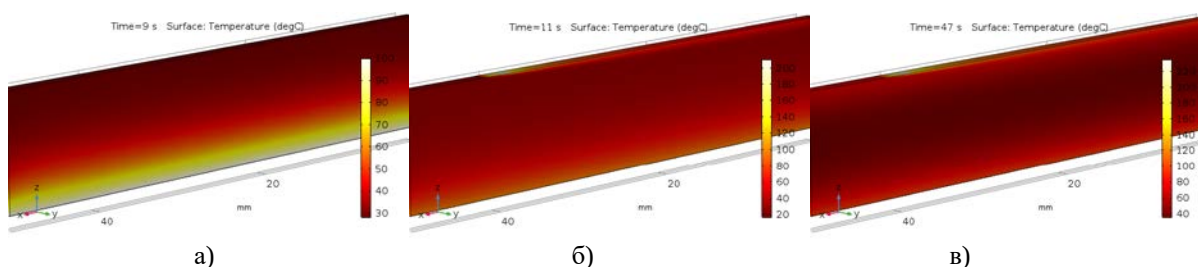


Рис. 8. Розподіл температури на поверхні стінки друкованого виробу при проходженні сопла екструдера (а – після вирішення стаціонарної задачі, б – перший прохід, в – дев'ятий прохід)

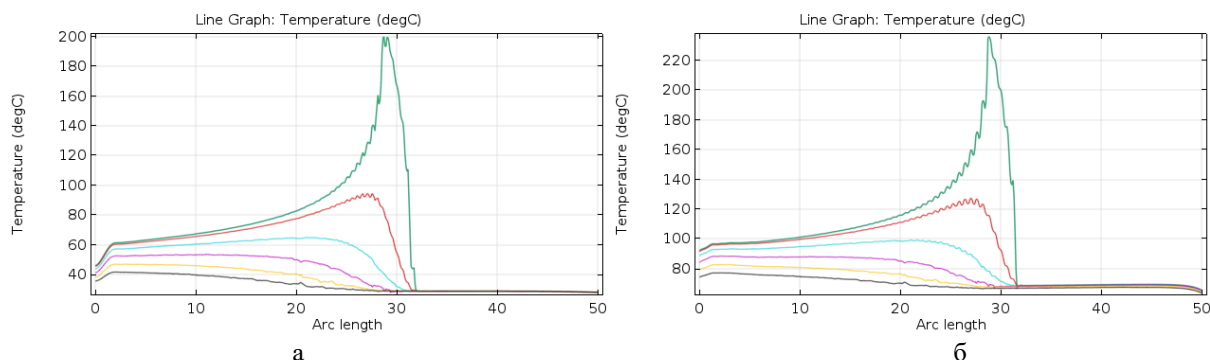


Рис. 9. Розподіл температури на поверхні стінки друкованого виробу та в приповерхневих шарах на глибині з кроком 0,1 мм (товщина одиничного шару при друці) при проходженні сопла екструдера (а – перший прохід, б – дев'ятий прохід)

Дослідження розподілу температури на поверхні стінки друкованого виробу та в приповерхневих шарах в моменти проходження сопла (рис. 9) показало, що при обраних режимах друку перший нижній шар може нагріватись до температури 120°C, а другий шар – до температури 95°C. Враховуючи, що для ABS пластику температура розм'якшення знаходиться в межах 95–117°C, можна вважати обрані режими друку оптимальними з точки зору геометричних параметрів моделі, тому що вони забезпечують максимальну адгезію нанесених шарів з мінімальною деформацією внаслідок оплавлення нижніх шарів.

Також було проведено дослідження зміни температури на поверхні друкованої стінки протягом дев'яти проходів сопла. Як можна побачити на рис. 10, максимальна температура спочатку поступово зростає і після п'яти-шести проходів залишається практично незмінною. Це дозволяє зробити висновок, що, оскільки моделювання не проводиться за весь час друку виробу (що потребувало б дуже великих затрат машинного часу), перші розраховані проходи не цілком адекватно описують термічну поведінку моделі. Для моделювання необхідно обчислювати не менше шести проходів сопла. Це збільшує загальний час розрахунку. Але такий підхід значно ефективніший, ніж розрахунок побудови всієї моделі.

Для друку якісної моделі тонкостінного виробу, як раніше зазначалось, важливе значення має контроль термодеомацій. На рис. 11 представлено розподіл температури по глибині стінки друкованого виробу. Як видно з розрахунку, при висоті стінки 10 мм перепад температури досягає близько 55°C. Графік для дев'ятого проходження сопла майже симетричний,

що дозволяє зробити висновок про правильно обрану температуру попереднього нагріву стола, яка мінімізує термодеомаційні навантаження. Водночас для великих деталей такі зміни температури можуть призвести до деламінації виробу. Тому в таких випадках слід використовувати попередній нагрів повітря в камері принтера.

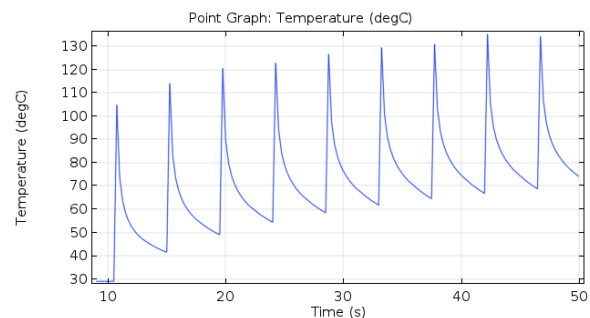


Рис. 10. Зміна температури на поверхні стінки друкованого виробу за дев'ять проходів сопла

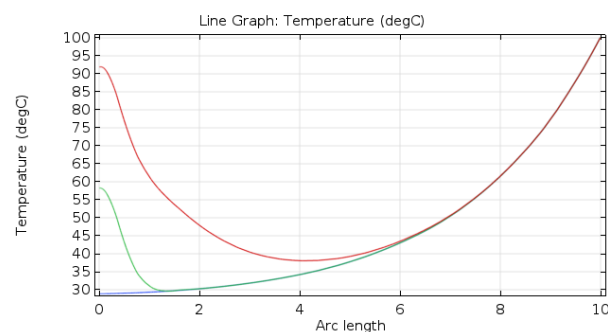


Рис. 11. Розподіл температури по глибині стінки друкованого виробу після вирішення стаціонарної задачі, після першого проходження та після дев'ятого проходження

Висновки. Було проведено кінцево-елементне моделювання поширення тепла в процесі 3D-друку тонкостінного виробу методом пошарового наплавлення. В результаті

досліджень було запропоновано оптимальні параметри технологічного процесу 3D-друку для оптимізації термомеханічної поведінки виробів, при яких забезпечуються мінімальні термодформації виробу і максимальна адгезія шарів для тонкостінних виробів простої прямокутної форми. Показано необхідність коригування параметрів залежно від довжини периметра виробу.

Розроблена математична модель в подальшому може використовуватись для коригування технологічних параметрів 3D-друку виробів складної форми зі змінним периметром по висоті деталі.

Список літератури

1. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2014. Vol. 20, No. 3. P. 192–204.
2. Yin J., Lu C., Fu J., Huang Y., Zheng Y. Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion. *Materials & Design*. 2018. Vol. 150. P. 104–112.
3. Zhang J., Wang X. Z., Yu W. W., Deng Y. H. Numerical investigation of the influence of process conditions on the temperature variation in fused deposition modeling. *Materials and Design*. 2017. Vol. 130. P. 59–68.
4. Costa S. F., Duarte F. M., Covas J. A. Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition techniques. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 245. P. 167–179.
5. Malekipour E., Attoye S., El-Mounayri H. Investigation of layer based thermal behavior in fused deposition modeling process by infrared thermography. *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 26. P. 1014–1022.
6. Wang J., Xie H., Weng Z., Senthil T., Wu L. A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials & Design*. 2016. Vol. 105. P. 152–159.
7. Montero M., Roundy S., Odell D. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. *Proceedings of Rapid Prototyping & Manufacturing Conference*. 2001. P. 1–21.

8. Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Q., Advincula R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 20. P. 44–67.
9. Ahn S. H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P. K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002. Vol. 8, No. 4. p. 248–257.
10. Armillotta A., Bellotti M., Cavallaro M. Warpage of FDM parts: experimental tests and analytic model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018. Vol. 50, May. P. 140–152.
11. Sun Q., Rizvi G. M., Bellehumeur C. T., Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*. 2008. Vol. 14, No. 2. P. 72–80.
12. Du J., Wei Z., Wang X., Wang J., Chen Z. An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 234. P. 332–341.

References

1. Turner, B. N., Strong, R., Gold, S. A. (2014) A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, No. 3, pp. 192–204.
2. Yin, J., Lu, C., Fu, J., Huang, Y., Zheng, Y. (2018) Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion. *Materials & Design*, vol. 150, pp. 104–112.
3. Zhang, J., Wang, X. Z., Yu, W. W., Deng, Y. H. (2017) Numerical investigation of the influence of process conditions on the temperature variation in fused deposition modeling. *Materials and Design*, vol. 130, pp. 59–68.
4. Costa, S. F., Duarte, F. M., Covas, J. A. (2017) Estimation of filament temperature and adhesion development in fused deposition techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 245, pp. 167–179.
5. Malekipour, E., Attoye, S., El-Mounayri, H. (2018) Investigation of layer based thermal behavior in fused deposition modeling process by infrared thermography. *Procedia Manufacturing*, vol. 26, pp. 1014–1022.

6. Wang, J., Xie, H., Weng, Z., Senthil, T., Wu, L. (2016) A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials & Design*, vol. 105, pp. 152–159.
7. Montero, M., Roundy, S., Odell, D. (2001) Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments. *Proceedings of Rapid Prototyping & Manufacturing Conference*, pp. 1–21.
8. Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., Advincula R. C. (2018) Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44–67.
9. Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright P. K. (2002) Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, vol. 8, No. 4, pp. 248–257.
10. Armillotta, A., Bellotti, M., Cavallaro, M. (2018) Warpage of FDM parts: experimental tests and analytic model, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 50, May, pp. 140–152.
11. Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., Gu P. (2008) Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, vol. 14, No. 2, pp. 72–80.
12. Du, J., Wei, Z., Wang, X., Wang, J., Chen, Z. (2016) An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 234, pp. 332–341.

M. P. Rud, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: hochspannung77@gmail.com

O. O. Pokhyl, *postgraduate student*,
e-mail: olegpokhyl@gmail.com

S. V. Zabolotnii, *Dr.Tech.Sc., associate professor*,
e-mail: s.zabolotnii@chdtu.edu.ua

A. P. Soltus, *Dr.Tech.Sc., associate professor*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

FINITE ELEMENT MODELING OF THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF POLYMERIC MATERIALS PRODUCTS AT THEIR MANUFACTURE BY THE METHOD OF LAYER-BY-LAYER BUILDING-UP

The 3D printing of functional components has significant advantages over conventional technologies due to the ability to fabricate parts with complex shapes without the need to produce specialized equipment. However, there are a number of geometric forms of objects, which require extra research, using 3D printing. Thin-walled parts are one of these objects. In the paper the mathematical model of thermal conductivity of the process of 3D printing of thin-walled products is constructed in order to determine the optimal parameters of technological process, which provide the minimum thermal deformation of the product and the maximum adhesion of layers.

Keywords: 3D printer, FDM, modeling by building-up method, finite element method.

УДК 005.8

С. К. Чернов, д.т.н., професор, завідувач кафедри управління проектами,
О. Ю. Савіна, аспірант кафедри управління проектами
e-mail: oksanasavina14@gmail.com

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

МЕТОД ЦІННІСНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОТИРИЗИКОВОГО ФУНКЦІОНАЛЬНО-ВАРТІСНОГО АНАЛІЗУ ПОРТФЕЛІВ НАУКОМІСТКИХ ПРОЕКТІВ ПІДПРИЄМСТВ

У статті висвітлено основні підходи до бюджетування проектів. Проаналізовано існуючі методи функціонально-вартісного аналізу. Встановлено, що для створення перспективного портфеля наукомістких проектів підприємств необхідно враховувати цінності проектів портфелів та самих портфелів наукомістких проектів підприємств. Запропоновано удосконалити існуючий протиризиковий метод функціонально-вартісного аналізу проектів ціннісними складовими та розширити його використання за рахунок застосування до рівня портфелів проектів. Наведено схему запропонованого методу ціннісно-орієнтованого протиризикового функціонально-вартісного аналізу та алгоритм його впровадження.

Ключові слова: наукомісткий проект, портфелі наукомістких проектів, ціннісно-орієнтоване управління, функціонально-вартісний аналіз.

Постановка проблеми. На якість зростання наукомісткого ринку впливають дві обставини [1]: перша полягає в тому, що ринок збільшується в основному за рахунок продажів продукції й послуг, що відповідають рівню передової техніки і технології на споживчому ринку та у виробничому секторі; друга – має збільшуватися частка попиту, орієнтованого на споживання високотехнологічної продукції. Крім того, як зазначається в дослідженнях техніко-економічного і технологічного розвитку, явно чи не явно, присутні уявлення про наявність функціонального зв'язку між витратами на розвиток науки і науково-технічним рівнем продукції, що випускається.

Практика свідчить, що прибутковість підприємств, які реалізують наукомісткі проекти, є вищою, ніж у галузях з консервативним типом розвитку.

Наукомістким вважається проект, що базується на проведенні наукових досліджень, з метою отримання наукового результату з можливим подальшим створенням, реалізацією та експлуатацією унікального наукомісткого продукту (або послуги), в умовах часових та ресурсних обмежень протягом усього життєвого циклу продукту проекту, за умови, що частина витрат на наукові дослідження не <3,5-4 % від суми загальних витрат на проект.

Характерною рисою найбільших і процвітаючих наукомістких виробництв є те, що більша частина їхніх наукомістких проектів (зокрема, продукції та послуг) призначена для задоволення потреб широких верств населення. Звідси й високі показники рентабельності (як відомо, в середньому в світовій економіці нормальним вважається рівень рентабельності до інвестиційного капіталу в розмірі 7-8 % [2]).

Найважливішими пріоритетами національних підприємств, які реалізують наукомісткі проекти в сучасних умовах, є підвищення конкурентоспроможності та інноваційної привабливості. Без проектного управління підприємства і подальшого вартісного аналізу проектів, що реалізуються на цих підприємствах, вирішити ці проблеми неможливо.

Для ефективного управління сукупністю наукомістких проектів підприємств вони об'єднуються в портфелі таких проектів. Управління портфелями наукомістких проектів підприємств (ПНПП) пов'язане з великими витратами, високими ризиками та значною кількістю стейкхолдерів, що мають свої ціннісні настанови, які обов'язково повинні резонувати зі стратегічними цілями підприємства. Тому таке управління повинне враховувати всі специфічні риси ПНПП та мати особливий інструментарій для досягнення найкращого ефекту.

Успішність процесу управління вартістю пояснюється його спроможністю виявляти можливості усунення надлишкових затрат під час реалізації проектів [3]. Як правило, такий підхід приводить до економії у виробництві без зміни концепції проектів та портфелів проектів (ПП).

Сьогодні є багато методів бюджетування проектів, менше – ПП, але вони мають як переваги, так і недоліки [1, 3–5], тому для бюджетування ПНПП необхідно розробити такий метод, який би був здатний полегшити роботу керівника та інших учасників офісу управління проектами під час планування й дозволити вчасно реагувати на зміни бюджету під час його реалізації, враховувати цінність портфеля та його наукомістких проектів, а також управляти ризиками, що можуть мати вплив на реалізацію ПП.

Метод функціонально-вартісного аналізу (ФВА) є практичним інструментом оцінювання систем, процесів, проектів, що забезпечує менеджерів інформацією, яка необхідна для обґрунтування і прийняття управлінських рішень [1]. Він характеризується тим, що в результаті його використання з'являється нова або більш удосконалена концепція проекту, яка виконує необхідні функції простіше, з більш високою якістю та більш економічними технологічними процесами або обладнанням.

Метою ФВА для удосконалення управління ПНПП є досягнення покращень у роботі підприємств стосовно показників вартості, трудомісткості та продуктивності, зменшення ризиків та підвищення цінності ПНПП.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В процесі управління ПНПП існують особливості, що притаманні саме цим підприємствам, їх наукомістким проектам та портфелям. Насамперед, це велика кількість одночасно виконуваних проектів різної специфіки та їх масштаби, складність виробництва, наявність багатосерійного й малосерійного виробництва, значна частина науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, активність об'єктів управління та участь значної кількості галузей, стейкхолдерів, підрозділів і відділів, участь всебічно спрямованих та різнокваліфікованих фахівців і т. д. [6].

Ці особливості породжують низку проблем управління [7], а саме: неправильний вибір проектів до ПП, що не враховують ціннісні орієнтири стейкхолдерів і необхідні показники для конкурентного зростання підпри-

ємства та його продукції, діяльність в умовах невизначеностей, які характеризуються відповідними до цієї діяльності видами ризиків та інше.

Як для управління наукомісткими підприємствами в цілому, так і для управління вартістю в наукомістких проектах та ПНПП ключовим поняттям є бюджет, що являє собою розподіл статей витрат і доходів за періодами часу. Існують різні види бюджетів [2]: бюджетні очікування, попередній, уточнений, остаточний, фактичний та бюджет зі змінами та доповненнями. У випадку перевищення бюджету ПП може бути закритий чи припинений. Тому, однією з необхідних умов реалізації ПНПП, поряд із плануванням, контролем їх змісту, визначенням часу реалізації, є і здійснення точного фінансового планування та контролю.

В джерелі [8] описано метод формування ціннісно-орієнтованого ПНПП, виходячи з якого, обов'язковим є визначення запланованих вартостей та обмежень за вартостями таких ПП.

Для забезпечення конкурентоспроможності продукції в процесі її розробки необхідно ясно розуміти, що вартість – це міра вибору споживача (покупця). Щоб гарантувати, що продукція буде затребувана, її слід проектувати відповідно до критеріїв споживача, тобто відповідно до вартості та цінності. Витрати – це один із двох (крім якості) основних показників вимірювання вартості. З одного боку, витрати багато в чому зумовлюють вартість і служать одним із головних її чинників, з другого боку, додавання витрат не приводить до адекватного зростання вартості. Якщо перед розробниками стоїть мета – зробити продукцію дешевшою, слід її проектувати, виходячи з витрат, а якщо кращою – проектувати, виходячи з якості. Два інші важливі показники вимірювання вартості, які відносяться до проектних атрибутів, – це проектування, виходячи із заданих термінів (щоб реалізувати точно в строк), що суперечить природі якості, і проектування, виходячи з тимчасового циклу (щоб скоротити терміни проектування), на яке впливає як проектування, виходячи з витрат, так і проектування, виходячи із заданих термінів [1].

Під ФВА розуміють метод техніко-економічного інженерного аналізу, який дає змогу підвищити цінність проекту при змен-

шенні його вартості на фазах реалізації протягом усього життєвого циклу проекту [1, 3, 4].

Його впровадження дає змогу:

- 1) дослідити розподілення затрат за функціями, а також виявити найбільш дорогі функції з метою їх першочергового удосконалення;
- 2) визначити, за якими функціональними напрямками слід здійснювати діяльність самостійно, а за якими – користуватися послугами сторонніх організацій або поєднувати два способи у визначеній пропорції;
- 3) провести вартісне моделювання бізнес-процесів, визначаючи при цьому структуру бізнес-процесу з найбільш оптимальною вартістю;
- 4) визначити складову накладних витрат у собівартості продукції з високою точністю;
- 5) установити та обґрунтувати нормативи на виконувани структурними підрозділами функції;
- 6) при зіставленні з традиційними методами рознесення затрат визначити напрями можливого скорочення витрат [1, 3].

ФВА вирішує задачу виявлення резервів зниження витрат на дослідження, розробку, виробництво і експлуатацію об'єктів. Так, основна мета ФВА виробів на стадії науково-дослідних робіт, підготовки і освоєння нових видів продукції (тобто в наукомістких проектах) полягає в попередженні самої можливості виникнення зайвих непотрібних витрат; на стадії виробництва – в забезпеченні рівня витрат не вищого проектних, а бажано нижчого; на стадії застосування продукції – в скороченні або повному виключенні невиправданих експлуатаційних витрат; на стадії утилізації – в отриманні максимального ефекту від повторного використання сировини, скорочення витрат і відходів [1]. Таким чином, ФВА проводиться з метою: зниження собівартості виробів (збільшення прибутку); зниження витрат на експлуатацію; підвищення якості та конкурентоспроможності виробів.

Переваги ФВА полягають у тому, що він з'єднує воедино: техніку та економіку, оптимізуючи співвідношення між споживчими властивостями продуктів праці і витратами на створення цих властивостей; всі ланки життєвого циклу аналізованого об'єкта: дослідження і розробку проекту, підготовку і організацію виробництва, експлуатацію та утилізацію; дії розробників, виробників, споживачів (користувачів) об'єктів.

До основних особливостей методу, які забезпечили йому таку високу ефективність і перспективність, можна віднести [1, 3]:

- функціональний підхід, згідно з яким кожний об'єкт розглядається як комплекс функцій для найбільш повного і економічного задоволення вимог споживачів;

- принцип системності, при якому функції розглядаються з системних позицій з виділенням функцій зовнішніх і внутрішніх;

- принцип безперервного порівняння значущості функцій і витрат на їх реалізацію, виділення найбільш дорогих функцій і зон функціональних надмірностей;

- принцип колективної творчості, який передбачає участь у ФВА групи фахівців різних професій, ефективне використання найширшого арсеналу методів, що стимулюють творче мислення, вироблення нестандартних рішень (морфологічний метод, «мозковий штурм», синектика, метод контрольних питань, творчих нарад і т. д.);

- принцип універсальності, що дозволяє використовувати ФВА практично в усіх сферах людської діяльності, які пов'язані з витратами.

За допомогою ФВА вдається оцінити внутрішню будову об'єктів, їх специфічні властивості, системні властивості (зовнішні функції) і пов'язану з ними поведінку об'єктів (тобто функціонування об'єктів). Внаслідок своєї системності ФВА дозволяє виявити в кожному досліджуваному об'єкті причинно-наслідкові зв'язки між якістю, тобто експлуатаційно-технічними характеристиками, і витратами. На основі цього створюються умови для виключення механічних методів планування витрат від досягнутого рівня, встановлення нормативів на основі сформованого рівня трудомісткості, витрат матеріалів і в цілому собівартості [1].

ФВА-метод є основою для інших методів управління підприємством, а саме: АВМ (Activity Based Management) – управління, що базується на діях (функціях, операціях); АБВ (Activity Based Budgeting) – бюджетування на основі виконуваних дій (функцій, операцій); АРР (Activity Resource Planning) – функціональне планування ресурсів. В основі методу ФВА лежать дані, які забезпечують менеджерів інформацією, необхідною для обґрунтування і прийняття управлінських рішень при застосуванні таких методів, як: «точно в строк» (Just-in-time, JIT) і KANBAN; глобальне управління якістю (Total Quality Management, TQM); безперервне поліпшення (Kaizen); реінжиніринг бізнес-процесів (Business Process Reengineering, BPR).

В основі управління, що ґрунтується на функціях, лежать кілька аналітичних методів, які використовують ФВА-інформацію. Це – стратегічний аналіз, вартісний аналіз, часовий аналіз, аналіз трудомісткості, визначення цільової вартості і розрахунок вартості, виходячи з життєвого циклу продукту або послуги. Одним із напрямків використання принципів, засобів і методів ФВА є планування бюджету, що ґрунтується на функціях. Планування бюджету використовує ФВА-модель для визначення обсягу робіт і потреби в ресурсах.

ФВА-інформація дозволяє приймати усвідомлені і цілеспрямовані рішення про розподіл ресурсів, що базуються на розумінні взаємозв'язків функцій і вартісних об'єктів, вартісних факторів і обсягу робіт. ФВА відрізняється від інших підходів управління тим, що об'єднує методичні прийоми, які зазвичай не застосовуються разом. Різні методології, що нині використовуються, призначені для досягнення певних цілей, проте їх сукупність можна зустріти в методології ФВА. Вони включають виявлення і задоволення вимог споживача, встановлення показників, що описують ці вимоги, моделювання витрат, вдосконалення бізнес-процесів, безперервне удосконалення в рамках системи менеджменту якості, організацію та проведення навчання персоналу. Методологія ФВА приділяє велику увагу інтегрованим процесам і дозволяє застосовувати різні методичні прийоми як єдину систему залежно від постановки конкретної мети аналізу. Цей метод дає змогу сформулювати мету роботи, намітити шляхи досягнення мети і послідовно пройти весь шлях аж до її реалізації, поєднуючи при цьому найрізноманітніші, але такі, що взаємно доповнюють один одного, методи, в тому числі й залучаючи на якихось етапах проведення ФВА метод АВС (Activity Based Costing) і АВС-аналіз (діаграми Парето).

Можна виділити два шляхи використання ФСА: вибір пріоритетних напрямків діяльності, пов'язаних зі стратегічними цілями; розробка реалістичного бюджету.

Ідентифікація функцій, які не створюють цінності, розглянута в [1]. Цей концептуальний підхід призначений для визначення функцій процесу, які додають цінність продукції. Якщо функція процесу не додає цінності, то, можливо, вона не потрібна і може бути видалена з процесу. Однак деякі функції, що не додають цінність, не можуть бути видалені

з таких причин: функція або процес призначені для забезпечення роботи іншої функції або процесу, які додають цінність. Це означає, що такі функції або процеси можуть бути видалені тільки при реорганізації відповідних процесів; функція або процес визначаються діяльністю підприємства, його метою і стратегією (реклама, дослідження, розвиток і т. д.), тобто такі функції або процеси не додають цінність у ту продукцію, яка виробляється прямо зараз, але вони необхідні для розвитку підприємства або розробки нової продукції; функції або процеси, потрібні існуючою законодавчою базою або нормативними документами. Ідентифікація функцій, які не створюють цінності, дозволяє визначити функції або процеси, які потенційно можуть бути негайно припинені.

Методична основа ФВА – функціональний підхід у поєднанні з сучасними методами активізації творчого мислення та пошуку оригінальних ідей, оцінювання якості варіантів і витрат на забезпечення й реалізацію заданих етапів проекту. Функціональний підхід являє собою сукупність прийомів, що дозволяють розглядати і вдосконалювати проект не в конкретній формі, а як комплекс функцій, який він виконує або повинен виконувати [3].

Ефективність методу ФВА в управлінні проектами як одного з методів визначення вартості цих проектів полягає в тому, що: 1) об'єкт аналізу – це проект і функції його елементів, визначення потрібних (корисних) і непотрібних (даремних) функцій. Це дозволяє встановити корисний потенціал проекту та намітити шляхи його найбільш ефективної реалізації. В кінцевому підсумку, для підприємства, яке націлене на ефективне виробництво шляхом переходу на проектно-керовану форму, системи управління із застосуванням ФВА як методу визначення вартості реалізованих проектів, цінним є не проект сам по собі, а корисні функції, які буде мати продукт, отриманий в результаті реалізації проекту і його споживча вартість; 2) метод зумовлює комплексний, системний підхід, що включає не тільки аналітичні, а й інші, пов'язані між собою роботи: організаційні, конструкторські, технологічні, маркетингові та ін. [1].

Основні відмінності в процесі проектного бюджетування від традиційного сконцентровані в процедурах планування та контролю бюджетів проектів [1], що входять до портфеля, виконання яких має здійснюватися

в рамках установленого бюджету ПП. Далі, дані по бюджетуванню окремих наукомістких проектів консолідується й агрегуються на рівні ПП і підприємств в цілому, і на підставі цих даних проводиться фінансове планування, планування балансового результату, планування калькуляційного результату, планування руху коштів тощо по підприємству в цілому.

В джерелі [3] розглянуто аспекти ФВА наукових проектів за допомогою спеціалізованого програмного продукту AllFusion Process Modeler. Автор [5] доповнив традиційний метод ФВА наукових проектів розрахунком ризиків, отримавши протиризиковий метод ФВА.

Аналіз останніх досліджень та публікацій констатує, що метод ФВА ще не застосовувався для портфельного управління та, зокрема, до ПНПП.

Метою статті є розробка методу ціннісно-орієнтованого протиризикового ФВА ПНПП.

Виклад основного матеріалу. Портфелем наукомістких проектів називають сукупність проектів, що згруповані за показником наукомісткості проектів, для отримання наукового результату, створення унікального наукомісткого продукту (послуги), досягнення ефективного управління й забезпечення відповідності стратегічним цілям підприємства, а також підвищення його конкурентоспроможності у ринковому середовищі, в умовах обмеженості часу, ресурсів та фінансування.

Розглянемо можливість застосування методу ФВА для планування бюджету ПНПП.

Існуючі процедури та метод ФВА не враховують ціннісних показників проектів та

ПП, тому, відповідно до методу ціннісно-орієнтованого формування ПНПП [8] пропонується удосконалити протиризиковий метод ФВА [5], впровадивши в нього розрахунок цінності за проектами та ПП.

Передумовою розробки нового методу ціннісно-орієнтованого протиризикового ФВА ПНПП є та особливість, що проекти в портфелі не пов'язані між собою ні логічно, ні технічно (за визначенням). Отже, виходячи з цього твердження, можна планувати зв'язки між проектами портфеля по-різному.

Метод ціннісно-орієнтованого протиризикового ФВА ПНПП включає чотири етапи та полягає в наступному:

1. Будується структура ПНПП. На цьому етапі відбувається збір інформації про структуру ПНПП.

2.1. Проводиться аналіз часу, вартості та ризиків для наукомістких проектів претендентів до ПП.

2.2. Проводиться аналіз цінності наукомістких проектів.

3.1. Розраховуються час, вартість та ризики за наукомісткими проектами портфелів з використанням протиризикового методу ФВА [5].

3.2. Розраховуються цінності наукомістких проектів.

4.1. Розраховується час, вартість та ризики для ПНПП.

4.2. Розраховуються цінності ПНПП. Проводиться аналіз результатів: часових, вартісних, ризиків та цінності ПНПП і розробляються рекомендації.

Схему методу ціннісно-орієнтованого протиризикового ФВА ПНПП зображено на рис. 1.

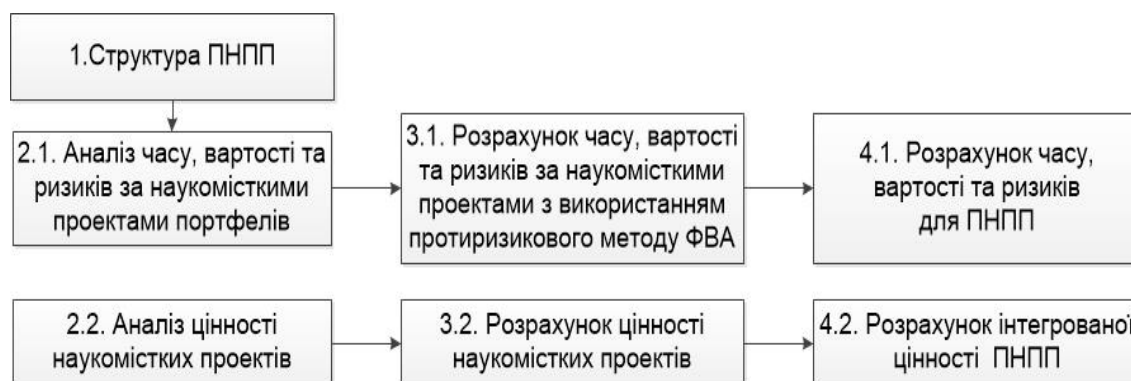


Рис. 1. Схеми методу ціннісно-орієнтованого протиризикового ФВА ПНПП

Визначення й оцінювання цінностей на рівні наукомістких проектів та їх портфелів дозволяє на етапі формування включати до ПНПП проекти з найбільшою цінністю та формувати портфель, що має найвищі показники інтегрованої цінності.

Опишемо детальніше запропонований метод ціннісно-орієнтованого протиризикового ФВА ПНПП:

1. Після процедури ініціації формування ПНПП збираються дані про наявні наукомісткі проекти на підприємстві, які плануються до включення в портфель. Таким чином, визначається множина наукомістких проектів претендентів до портфеля:

$$Q = \{q_1; \dots; q_k; \dots; q_l\}, (k = \overline{1; l}).$$

Для кожного проекту q_k ($k = \overline{1; l}$).

2. Визначається час реалізації, вартість та ризику за протиризиковим методом ФВА [5].

Відповідно до протиризикового методу ФВА розрахунок вартості проекту ($BP_{\text{протириз}}$) можна провести за допомогою формули

$$BP_{\text{протириз}} = \sum_{i=1}^n B\Phi_{\text{протириз}_i},$$

при $i = \overline{1; n}$,

де $BP_{\text{протириз}}$ – вартість проекту, що розраховується за допомогою протиризикового методу ФВА, грошовий еквівалент; $B\Phi_{\text{протириз}_i}$ – вартість i -ї фази, грошовий еквівалент; n – кількість фаз життєвого циклу проекту.

В свою чергу, вартість i -ї фази життєвого циклу з урахуванням ризиків буде розраховуватися за наступною формулою:

$$B\Phi_{\text{протириз}_i} = \sum_{j=1}^{z_i} BP_{\text{протириз}_j},$$

де $BP_{\text{протириз}_j}$ – вартість j -ї роботи проекту, грошовий еквівалент; z_i – кількість робіт i -ї фази життєвого циклу проекту.

В свою чергу, вартість i -ї роботи ($BP_{\text{протириз}_j}$) з урахуванням впливу ризиків буде розраховуватися за наступною формулою:

$$BP_{\text{протириз}_j} = BPP_j \cdot \text{ЧР}_j \cdot \text{ПР}_j + BV_j \cdot \text{ПУ}_j \cdot \text{ЧР}_j + P_j \cdot V_j,$$

де BPP_j – сумарна вартість ресурсів роботи, грошовий еквівалент/час; ЧР_j – час виконання роботи, час; ПР_j – періодичність ви-

конання роботи, раз/час; BV_j – вартість управління роботою, грошовий еквівалент/час; ПУ_j – періодичність управління роботою, раз/час; P_j – ймовірність понесення додаткових втрат під час виконання роботи; V_j – очікувані додаткові втрати від ризику під час виконання роботи, грошовий еквівалент.

3. Визначається адитивний показник цінності наукомісткого проекту V_k :

$$V_k = \sum_{i=1}^n w_{ki} \cdot y_{kij}, (k = \overline{1; l}),$$

де y_{kij} – показник результативності проекту, ($j = \overline{1; m}$), w_{ki} – показник досягнення стратегічних цілей проектом, ($k = \overline{1; l}$; $i = \overline{1; n}$).

4. Формується рейтинг проектів за цінністю, з урахуванням визначених показників їх часу реалізації, вартості та ризиків:

$$R_k, (k = \overline{1; l}).$$

На цьому етапі проводиться попередній аналіз проектів на включення до ПП. Якщо проект має низькі показники цінності, то може бути вилучений з рейтингу альтернативних проектів претендентів до портфеля та перенесений до множини проектів резерву. Кількість проектів у рейтингу зменшилась на 1:

$$R_k = R_k - 1.$$

Перехід до пункту 9.

Формування множини альтернативних ПНПП:

$$P = \{p_1; \dots; p_h; \dots; p_e\}, (h = \overline{1; e}).$$

4. Визначається час реалізації ПНПП T_p за формулою

$$T_p = \left[T_{s \max}; \sum_{s=1}^u T_s \right],$$

де $T_{s \max}$ – час виконання найдовшого проекту; $\sum_{s=1}^u T_s$ – сумарний час реалізації всіх проектів у портфелі.

Якщо час реалізації ПНПП не задовольняє умові, то даний ПП переміщується до множини ПП резерву P_r . Кількість ПП резерву збільшилась на 1:

$$P_r = P_r + 1.$$

5. Визначається вартість ПНПП за формулою

$$C_p = \sum_{s=1}^u C_s,$$

де C_s – вартість наукомістких проектів, що входять до портфеля.

6. Визначається сумарний ризик R_p ПНПП за формулою

$$R_p = \sum_{s=1}^u R_s,$$

де R_s – ризик наукомістких проектів, що входять до портфеля.

7. Визначається інтегральна цінність ПНПП за формулою

$$IV_p = \sum_{s=1}^u V_s,$$

де V_s – показник цінності наукомістких проектів, що входять до портфеля.

8. Отримуємо запланований час реалізації, вартість, ризик та цінність ПНПП. Формується рейтинг оптимальних ПНПП.

9. Проводиться аналіз отриманих результатів. Топ-менеджери, разом з керівником проектного офісу та комерційного відділу підприємства, виносять регулююче рішення про обрання оптимального ПНПП.

Алгоритм ціннісно-орієнтованого ФВА ПНПП зображено на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм ціннісно-орієнтованого ФВА ПНПП

Висновки. Отже, під час оцінювання бюджету ПНПП можна застосувати метод ціннісно-орієнтованого протиризикового ФВА, який дозволяє: 1) дослідити розподілення затрат за роботами наукоміських проєктів портфелів, а також виявити найдорожчі роботи проєктів з метою їх першочергового вдосконалення; 2) провести вартісне моделювання робіт проєктів ПП, визначаючи при цьому структуру роботи з найбільш оптимальною вартістю; 3) визначити складову накладних витрат у собівартості результату ПНПП з високою точністю; 4) установити та обґрунтувати нормативи на виконуваних структурними підрозділами роботи; 5) передбачити резерви часу на реакцію на ризиковані події та коштів з метою усунення впливу ризикованих подій на реалізацію робіт наукоміського проєкту; 6) визначити цінність кожного наукоміського проєкту з портфеля для встановлення їх важливості, пріоритетності та запровадження коригуючих управлінських дій, що впливають на формування запланованого бюджету ПП і обмежень його за вартістю; 7) розглядати цінність як функцію для ПНПП та не включати до портфелів ті наукоміські проєкти, що мають низькі показники цінностей, і приймати до реалізації ПНПП з найбільшою інтегральною цінністю; 8) визначити час реалізації ПНПП, його вартість та ризики для врахування і передбачення реакції відповіді на ризиковані події й планування коштів на їх подолання; 9) провести інтегральне моделювання ПНПП, що враховує його вартість, час реалізації, ризики та цінність, визначивши при цьому структуру ПП з відповідними оптимальними показниками. Вперше запропоновано застосування методу ФВА до портфельного управління наукоміських проєктів, що розширює можливості цього методу та відкриває нові шляхи його реалізації, що в кінцевому результаті дозволяє підвищити ефективність управління ПНПП.

Список літератури

1. Функціонально-стоимостной анализ в управлении проектами наукоемких предприятий: монография / Е. Б. Данченко, Л. С. Чернова, Д. И. Бедрий, Е. В. Погорелова, А. И. Мазуркевич. Днепропетровск: IMA-Press, 2011. 237 с.
2. Бедрий Д. І. Огляд методів бюджетування наукових проєктів. *Східно-Європейський*

журнал передових технологій. 2011. № 1/7 (49). С. 43–45.

3. Данченко О. Б., Бедрий Д. І. Функціонально-вартісний аналіз наукових проєктів. *Управління розвитком складних систем.* 2012. № 12. С. 48–54.
4. Застосування функціонально-вартісного аналізу в процесі бюджетування наукових проєктів / А. А. Златкін, О. Б. Данченко, Д. І. Бедрий, Л. С. Чернова. *Управління розвитком складних систем.* 2011. № 6. С. 43–46.
5. Бедрий Д. І. Управління вартістю проєктів наукових установ з врахуванням ризиків: автореферат ... канд. техн. наук, спец.: 05.13.22 – управління проєктами та програмами. – Одеса: Одес. нац. політехн. ун-т, 2013. 20 с.
6. Савина О. Ю. Особенности наукоемких предприятий и специфика управления их проектами. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки.* 2017. № 1. С. 77–87.
7. Савина О. Ю. Особенности портфелей проєктів наукоміських підприємств та специфіка управління ними. *Управління розвитком складних систем.* 2017. № 30. С. 62–74.
8. Савина О. Ю., Чернов С. К. Метод формування ціннісно-орієнтованого портфеля проєктів наукоміського підприємства. *Управління розвитком складних систем.* 2018. № 34. С. 275–290.

References

1. Danchenko, O. B., Chernova, L. S., Bedriy, D. I., Pogorelova, E. V., Mazurkevich, A. I. (2011) Functional-cost analysis in the management of projects of science-based enterprises. Dnepropetrovsk: IMA-Press, 237 p. [in Russian].
2. Bedriy, D. I. (2011) Review of methods of scientific projects budgeting. *Shidno-Yevropeiskiy zhurnal peredovyh tehnologiy*, 1/7 (49), pp. 43–45 [in Ukrainian].
3. Danchenko, O. B., Bedriy, D. I. (2012) Functional-cost analysis of scientific projects. *Upravlinnya rozvytkom skladnyh system*, (12), pp. 48–54 [in Ukrainian].
4. Zlatkin, A. A., Danchenko, O. B., Bedriy, D. I., Chernova, L. S. (2011) Application of functional-cost analysis in the budgeting process of scientific projects. *Up-*

- ravlinnya rozvytkom skladnyh system, (6), pp. 43–46 [in Ukrainian].
5. Bedriy, D. I. (2013) Management by the cost of projects of scientific institutions taking into account risks: author's summary for Ph.D. Odesa: Odes. nats. politehn. un-t, 20 p. [in Ukrainian].
 6. Savina, O. Yu. (2017) Features of high-technology enterprises and the specifics of the management of their projects. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu. Seria: Tehnichni nauky*, (1), pp. 77–87 [in Ukrainian].
 7. Savina, O. Yu. (2017) Features of portfolio projects of science-based enterprises and peculiarities of their management. *Upravlinnya rozvytkom skladnyh system*, (30), pp. 62–74 [in Ukrainian].
 8. Chernov, S. K., Savina, O. Yu. (2018) Method of formation of value-oriented portfolio management of high-tech enterprises projects. *Upravlinnya rozvytkom skladnyh system*, (34), pp. 275–290 [in Ukrainian].

S. K. Chernov, Dr.Tech.Sc., professor,

Head of the Department of Project Management

O. Yu. Savina, postgraduate student of the Department of Project Management

e-mail: oksanasavina14@gmail.com

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

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

METHOD OF VALUE-ORIENTED ANTI-RISK FUNCTION-COST ANALYSIS OF THE PORTFOLIOS OF SCIENCE-BASED PROJECTS OF ENTERPRISES

Currently, enhancing competitiveness and innovation attractiveness are the most important priorities of national enterprises implementing science-based projects. These problems cannot be solved without project management of the enterprise and further cost analysis of its science-based projects and project portfolios.

The analysis of recent publications shows that function-cost analysis has not yet been applied in portfolio management, particularly for science-based project portfolios. Hence, the article aims to develop a method of value-oriented anti-risk function-cost analysis of science-based projects portfolios.

The article analyzes basic approaches to project budgeting and existing methods of function-cost analysis. It is established that creation of a high-potential portfolio of science-based projects requires taking into account the values of portfolio projects and portfolios themselves. The existing anti-risk method of function-cost analysis has been improved with value components; its application range has been expanded with project portfolios. The article provides a diagram of the method of function-cost analysis and an algorithm for its introduction.

The proposed method provides the following: studying cost allocation by the works of science-based portfolio projects; revealing the most expensive project works with the purpose of their immediate improvement; cost modeling of portfolio project works; establishing the share of overhead costs in the cost of the result of a science-based project portfolio with a high accuracy; establishing and substantiating the norms on the work performed by enterprise units; providing time reserves for the response to risky events and monetary reserves to eliminate their impact on the project works; determining the value of each portfolio project to establish its importance, priority and introduce corrective management actions affecting formation of the planned portfolio budget and its limitations; considering value as a function for a project portfolio, ignoring low-value projects and incorporating projects with the highest integral value into portfolios; determining the time, cost and risks of implementation of portfolio project to allow for the response to risky events and prearrange appropriate funds; performing integrated modeling of a science-based project portfolio, considering its cost, time of implementation, risks and value, while establishing portfolio structure with optimal indicators.

Keywords: science-based project, science-based project portfolio, value-oriented management, function-cost analysis.

Наукове видання

ВІСНИК
Черкаського державного
технологічного університету

СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ
3 • 2018

VISNYK
Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu

SERIA: TEHNICHNI NAUKY
3 • 2018

Статті друкуються в авторській редакції.

Відповідальність за точність і коректність посилань та достовірність наукових результатів у публікаціях несуть автори. Точка зору редколегії не завжди збігається з позицією авторів. Матеріали друкуються з максимальним збереженням авторської стилістики та орфографії.

*Технічний редактор Давиденко К. В.
Комп'ютерна обробка Вознюк Т. І.
Коректура Костенко Т. В.*

Видавець – Черкаський державний технологічний університет
бульвар Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006.

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 896 від 16.04.2002 р.

Виготівник – ФОП ГОРДІЄНКО Є.І.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції Серія ДК № 4518 від 04.04.2013 р.

Україна, 18000, м. Черкаси тел./факс: (0472) 56-56-12, (067) 444-28-94

e-mail: book.druk@gmail.com

Формат 60x84 1/8. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 13,48. Обл.-вид. арк. 14,36. Наклад 100 прим. Вид. № 18-168.