

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION  
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного  
технічного університету  
«ХПІ». Серія: Нові рішення  
в сучасних технологіях**

**№ 4(6)' 2020**

**Збірник наукових праць**

**Видання засноване у 1961 р.**

**Bulletin of the National  
Technical University  
"KhPI". Series: New solutions  
in modern technology**

**No. 4(6)' 2020**

**Collection of Scientific papers**

**The edition was founded in 1961**

**Харків  
НТУ «ХПІ», 2020**

**Kharkiv  
NTU "KhPI", 2020**

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях** = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2020. — № 4(6). — 152 с. — ISSN 2079-5459.

Видання публікує наукові результати та досягнення мультидисциплінарних досліджень молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, техніки та електрофізики високих напруг, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, high voltage techniques and electrophysics, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Свідцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України  
КВ № 23776-13616 від 14 лютого 2019 року.

Мова статей – українська, англійська.

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях** включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», **категорія «Б»** (накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р. та №886 від 02.07.2020 р.).

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

**Офіційний сайт видання:** <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

Засновник  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

#### Редакційна колегія

*Відповідальний редактор:*

Сокол С. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

*Члени редколегії:*

Авдєєва О. П., НТУ «ХПІ», Україна

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Буряковський С. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Вєхов Є., Мерілендський університет, США

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Данильченко Д. О., НТУ «ХПІ», Україна

Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Клепиков В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Мележик Є., Інститут фізики напівпровідників імені В. Є.

Лашкарьова НАНУ, Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

Мінакова К. О., НТУ «ХПІ», Україна

Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс,  
Бразилія

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Томашевський Р. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Чжан К. Л., проф., Вроцлавський технологічний університет,  
Польща

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шестопалов О. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

#### Editorial staff

*Associate editor:*

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

*Editorial staff members:*

Avdieieva O. P., NTU "KhPI", Ukraine

Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Buriakovskii S. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Vekhov Ye., University of Maryland, College Park, USA

Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK

Danylchenko D. O., NTU "KhPI", Ukraine

Demidov I. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Zakovorotniy A. Yu., prof., NTU "KPI", Ukraine

Klepikov V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Melezhik Ye., V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics  
NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine

Minakova K. O., NTU "KhPI", Ukraine

Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Tomashevskiy R. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Chrzan K. L., prof., Wroclaw University of Technology, Poland

Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 7 від 29 грудня 2020 р.

UDC 621.318

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01

## MAGNETIC-PULSED ATTRACTION OF SHEET BILLETS WITH "DIRECT PASSAGE OF CURRENT"

**Yu. BATYGIN, O. YERYOMINA\*, S. SHINDERUK, V. STRELNIKOVA, E. CHAPLYGIN**

*Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE*

*\*e-mail: elena.yeryomina@gmail.com*

**ABSTRACT** The theoretical substantiation of the efficiency of magnetic-pulse attraction method of sheet metal with "direct current transmission" through the object being processed is presented. The analysis of well-known works in this area is carried out, it is shown that the lack of sufficiently complete theoretical studies does not allow effectively performing a given production operation. By solving the boundary-value electrodynamic problem, analytical expressions are obtained for the phase dependences of currents in the experimental system and the excited forces of attraction of the processed object. It is proved by numerical estimates that the low-frequency mode of the ongoing electromagnetic processes is preferable when the fields penetrate intensively through the conducting components of the system under study. It was found that the calculated dependence of the developed forces on the discharge voltage of the capacitive storage allows an approximate estimate of the efficiency of attraction when operating in the accepted range of energy capabilities of the power source. It is shown that the degree of inhomogeneity of the transverse distribution of attractive forces in the region under study does not exceed ~ 20%. A working experimental model has been designed and created, consisting of a tool for magnetic-pulse attraction of sheet metal and a power source - an energy unit. Based on the obtained ratios, the characteristics of the pilot plant and the test modes were calculated. A dosed magnetic-impulse force action has been practically implemented, which makes it possible to control the deformation of sheet metal in the processing zone. Experiments have been carried out to remove dents on samples made of various types of steel under conditions close to the corresponding real production operation. The practical possibilities of the means of magnetic-pulse attraction of certain sections of sheet metals with "direct current transmission" through them have been successfully demonstrated. The effectiveness of the method under consideration is proved when using the indicators of the technological operation, calculated based on theoretically obtained dependences.

**Keywords:** magnetic-pulsed attraction; thin-walled sheet metal; electromagnetic processes; "direct passage of current"; experimental approbation; flattening automobile bodies

## МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНЕ ПРИТЯГАННЯ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК ПРИ «ПРЯМОМУ ПРОПУСКАННІ СТРУМУ»

**Ю. В. БАТИГІН, О. Ф. ЄРЬОМІНА, С. О. ШИНДЕРУК, В. А. СТРЕЛЬНІКОВА,  
Є. О. ЧАПЛИГІН**

*Кафедра фізики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, УКРАЇНА*

**АНОТАЦІЯ** Представлено теоретичне обґрунтування працездатності методу магнітно-імпульсного притягання листового металу з «прямим пропусканням струму» через оброблюваний об'єкт. Проведено аналіз відомих робіт в цій галузі, показано, що відсутність досить повних теоретичних досліджень не дозволяє ефективно виконувати задану виробничу операцію. Шляхом вирішення крайової електродинамічної задачі отримані аналітичні вирази для фазових залежностей струмів в експериментальній системі і порушених сил притягання оброблюваного об'єкта. Доведено чисельними оцінками, що низькочастотний режим електромагнітних процесів, що протікають, кращий при інтенсивному проникненні полів через провідні компоненти досліджуваної системи. Встановлено, що розрахована залежність сил, що розвиваються, від напруги розряду ємнісного накопичувача дозволяє приблизно оцінити ефективність притягання при роботі в прийнятному діапазоні енергетичних можливостей джерела живлення. Показано, що ступінь неоднорідності поперечного розподілу сил притягання в досліджуваній області не перевищує ~ 20%. Спроектована і створена діюча експериментальна модель, що складається з інструменту магнітно-імпульсного притягання листового металу і джерела живлення - енергетичного блоку. На основі отриманих співвідношень розраховані характеристики дослідної установки та режими проведення випробувань. Практично реалізовано дозований магнітно-імпульсний силовий вплив, що дозволяє контролювати деформацію листового металу в зоні обробки. Були проведені експерименти з усунення вм'ятин на зразках, виготовлених з різних видів сталі в умовах, наближених до відповідної реальної виробничої операції. Успішно продемонстровані практичні можливості засобів магнітно-імпульсного притягання певних ділянок листових металів при «прямому пропусканні струму» через них. Доведено ефективність розглянутого методу при використанні показників технологічної операції, розрахованих на підставі теоретично отриманих залежностей.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсне притягання; тонкостінний листовий метал; електромагнітні процеси; "Пряме проходження струму"; експериментальна апробація; сплющування автомобільних кузовів

### Introduction

The attraction methods of defined areas of sheet metals using the energy of pulsed magnetic fields for different types of processing technologies are purchasing more relevant in different industries [1]. Special attention is paid to the development of dent removal and leveling surfaces of sheet metals technologies during the restoration of aircraft hulls and car bodies. Firstly, the necessity of such operation is due to defection of aerodynamic characteristics of the aircraft down to the loss of stability in flight. Secondly, it's not only aesthetic considerations but often impossibility of further maintenance of the vehicle with a damaged body. That is why of particular interest are on devices allowing for restoration of the damages (dents) on the surface from the outside of metallic coating without disassembling of aircraft hull or car body. For example, the suggestions of American industry companies ("Boeing Company", "ElectroImpact" etc.) [2,3] and also European firms leading in the field of modern cars body repair [4] are meeting to this requirements.

### A brief publications review

Propositions of using pulsed electromagnetic fields for the attraction of defined areas of sheet metals have a long history. One of the first is the proposal of some inductor system the action principle of which is based on antiphase superposition low frequency (LF) and high frequency (HF) magnetic fields. Firsts of them penetrate through the metal and the second without penetration concentrate on its surface from inductor side – the source of pulsed magnetic field. Superposition of the LF and HF-fields leads to their mutual cancel from one side of sheet metal and concentration of the penetrated LF-field from the other side. The metal being processed undergoes action unilateral magnetic pressure and attracts to the inductor. This type of systems was developed by American engineers and implemented in restoring technologies of the aircraft hulls [2,3].

The physical meaning of other propositions suggested using exclusively low-frequency magnetic fields allowing work in the mode of their intensive penetration through sheet metals [5,6]. As the theory and experiments showed, during ferromagnets, processing the repulsing action of Lorentz forces is suppressed and attraction becomes prevalence because of magnetic properties of the processed metal. By the authors of paper [5], there were proposed and designed "inductor systems with attracting screen", allowing excitation of high forces of attraction as for ferromagnets as non-ferromagnets (so named the universal tools of attraction). The proposition essence is consisting of including rigidly-fixed auxiliary conductive screen into the construction of the inductor system. Conductors with unidirectional currents induced in the

screen and processed metal experience the mutual attraction. When the screen is rigidly fixed, the metal being processed will move towards the screen. The papers [5,7] unite a complex of all theoretical and experimental researches of the methods on magnetic-pulsed attraction based on different physical nature phenomena. As well here are shown main directions of their practical usage in the modern repair technologies of vehicles.

If we are talking about progressive technologies with using of magnetic-pulsed fields energy there should be mentioned some other existing methods of dents removing. So, among mechanical devices, there are widely known so named pulling out tools. Their main functional components are a pulling out element – a rod, one end welded or glued to the metal in the center of the dent to be removed, and lever mechanism allowing gradual pulling of the rod free end to the level of the surface being restored [4]. The method of vacuum dent removing on a body car is defended by the Patent of "Dent Defyer Inc." concern [8]. A special suction cup is placed on the area with a dent. In the internal cavity between them creates a rarefaction. The appeared forces of attraction are pulling out the dented metal. The main disadvantages of mechanical and vacuum methods of attraction are the complexity of their technical implementation, unreliability (damages are possible), high requirements for the qualification of the performer, etc.

Back to the mentioned below progressive technologies of the magnetic-pulsed attraction of the defined areas of sheet metals, should describe not only their benefits. The main disadvantages are the power possibilities finiteness conditioned of induction effects with which the electromagnetic energy essential losses are connected [9]. In this regard, a method of "direct passage of current" through the processed metal becomes a very appealing way of the magnetic-pulsed attraction of thin-walled sheet metals. This method can become a basis for the design of an effective tool for external restoration of metal coatings of any vehicles. Its attractiveness is caused by simple technical realization and quite high energy indicators. Description of propositions and experimental testing results of the magnetic-pulsed tools with the "direct passage of current" for dents removing on the body cars are given in papers [10,11].

A common disadvantage of well-known works in this area is the lack sufficiently complete theoretical studies with output to optimal designs of tools with "direct passage of current" allowing the effective implementation of a given production operation, for example, the restoration of metal coatings of vehicle of any purpose (ground-based, aircrafts, aqueous etc.).

### Purpose of the work

The aim of the this paper is the theoretical justification of workability of the method of the magnetic-pulsed attraction of sheet metals with "direct passage of

current” through the processing object, experimental researches fulfilling and practical testing of the proposed method in conditions closed to the real production operation.

## Main text

### Calculated ratios for currents and forces

The principal model scheme of the tool for magnetic-pulsed attraction with “direct passing of current” is shown in the fig. 1.

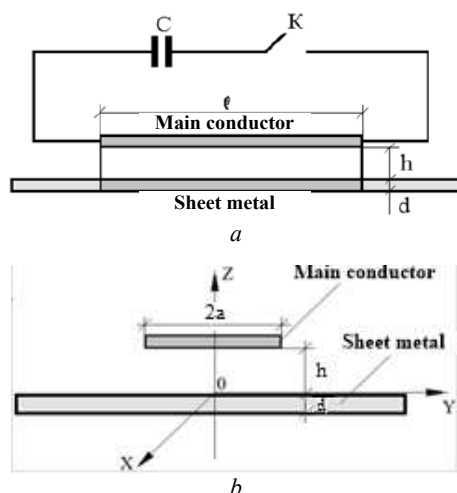


Fig.1 – The principal scheme: a) electrical equivalent circuit;  
b) calculated electrodynamical model

In the solution will be used the algorithms presented and developed by the authors of scientific publications [7, 9]. In fairness, it should be mentioned that the analogical questions were already considered in [9]. However, the immediate use of obtained solutions and relations is impossible what is conditioned by the accepted conditions formulating and solving of the considered problems.

Let us formulate assumptions quite adequate to reality and allowing obtaining analytical dependencies in quadratures.

Processing object (here and after – this is the billet) is non-magnetic sheet metal with quite big transverse dimensions, thickness –  $d$  and conductivity –  $\gamma$ .

The main conductor is “transparent” for the active fields, so its metal has no influence on occurring electromagnetic processes.

There is a geometric symmetry of the system relative to the coordinate plane  $ZOX$ .

The system has a sufficiently long length along the  $X$ -axis, so  $\frac{\partial}{\partial x} = 0$ .

A uniformly distributed current with a density  $j(t) = j_m \cdot j(t)$  flows in the main conductor in the direction of the axis  $OX$ , where  $j_m = \frac{I_m}{2a}$  – is the

amplitude ( $I_m$  – maximum current),  $j(t)$  – is the time dependence.

The frequency characteristics of the exciting current are such that the condition of quasi-stationarity is defined by inequality –  $\frac{\omega}{c} \cdot b \ll 1$  [6,8], here  $\omega$  – is the cyclic process frequency,  $c$  – is the light speed in the vacuum,  $b$  – is the characteristic system size.

The non-zero components of the electromagnetic field intensities are excited in the system:  $E_x \neq 0, H_{y,z} \neq 0$ .

### Maxwell's integral equations in $L$ -image space

Within the accepted assumptions Maxwell's equations for non-zero components of the electromagnetic field intensities converted on Laplace ( $L$ -transforming), taking into account zero initial conditions, take the form [12,13]:

$$\frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z), \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z), \quad (3)$$

where  $p$  – the  $L$ -transforming parameter;

$$E_x(p, y, z) = L\{E_x(t, y, z)\};$$

$$H_{y,z}(p, y, z) = L\{H_{y,z}(t, y, z)\};$$

$$j_x(p, y, z) = L\{j_x(t, y, z)\};$$

$\mu_0$  – is the vacuum permeability.

In the general case, the current density on the right side of equation (1) is written as:

$$j_x(p, y, z) = (p \cdot \varepsilon_0 + \gamma) \cdot E_x(p, y, z) + j_{xi}(p, y, z), \quad (4)$$

where  $\varepsilon_0$  is the vacuum permittivity,  $j_{xi}(t, y, z)$  – is the current density in the main conductor,  $j_{xi}(p, y, z) = j(p) \cdot f(y) \cdot \delta(z-h)$ ,  $j(p) = j_m \cdot j(p)$ ,

$j_m = \frac{I_m}{2a}$  – is the amplitude,  $j_i(p) = L\{j_i(t)\}$ ,  $j_i(t)$  – is the time dependence of exciting current,  $f(y)$  – is the transverse distribution of current density,  $\delta(z-h)$  – is the Dirac impulse function.

Solving the problem in the accepted model of calculation, it is necessary to select areas with homogeneous electrophysical characteristics.

According to fig. 1b, it can be believed that these areas are:

a) the free half-space above the sheet metal of the billet from the side of the main conductor, where  $z \in [0, \infty)$ ;

b) the area of sheet metal billet,  $z \in [-d, 0]$ ;

c) the free half-space from the external side of the billet,  $z \in (-\infty, 0]$ .

From the differential equations (1–3) taking into account the expression (4) there are obtained equations for the longitudinal component of the electric field strength  $E_x(p, y, z)$  in the highlighted areas:

a)  $z \in [0, \infty)$ ,

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = p \cdot \mu_0 \cdot j_x(p, y, z), \quad (5)$$

b)  $z \in [-d, 0]$ ,

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = \gamma \cdot E_x(p, y, z), \quad (6)$$

c)  $z \in (-\infty, 0]$ ,

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = 0. \quad (7)$$

Next step is to apply the Fourier integral cosine-transform [13] for equations (5–7). Its admissibility is determined by the geometric and electrical symmetry of the problem under consideration relative to the  $ZOX$  plane.

Thus, we have

$$\int_0^\infty E_x(p, y, z) = E_x(p, \lambda, z) \cdot \cos(\lambda y) d\lambda; \quad (8)$$

$$j_x(p, y, z) = \int_0^\infty j_x(p, \lambda, z) \cdot \cos(\lambda y) d\lambda; \quad (9)$$

where

$$j_x(p, \lambda, z) = \int_0^\infty j_x(p, y, z) \cdot \cos(\lambda y) dy = j(p) f(\lambda) \delta(z);$$

$$f(\lambda) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\infty f(y) \cdot \cos(\lambda y) dy, \text{ according to the}$$

accepted assumption of uniform distribution of the exciting current in the main conductor, integrating will give the following result:

$$f(\lambda) = \frac{2a}{\pi} \cdot \frac{\sin(\lambda a)}{(\lambda a)}.$$

Taking into account (8) and (9), the equations (5–7) can be written in the kind of ordinary linear differential equations of the second order [13]:

a)  $z \in [0, \infty)$ ,

$$\frac{d^2 E_x(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 E_x(p, \lambda, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z - h), \quad (10)$$

where  $K(p, \lambda) = \mu_0 \cdot p \cdot j(p) \cdot f(\lambda)$ ;

b)  $z \in [-d, 0]$ ,

$$\frac{d^2 E_x(p, \lambda, z)}{dz^2} - q^2(p, \lambda) \cdot E_x(p, \lambda, z) = 0; \quad (11)$$

where  $q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p \cdot \mu_0 \cdot \gamma}$  is the separation parameter, the physical sense of which is the wave number in a non-magnetic metal with an electrical conductivity  $\gamma$ ;

c)  $z \in (-\infty, 0]$ ,

$$\frac{d^2 E_x(p, \lambda, z)}{dz^2} - \lambda^2 \cdot E_x(p, \lambda, z) = 0. \quad (12)$$

The general integrals of equations (10), (11) and (12) for defined areas are the following [13]:

a)  $z \in [0, \infty)$ , to the condition of boundedness at  $z \rightarrow 0$  the following function satisfies:

$$E_x^{(1)}(p, \lambda, z) = C(p, \lambda) e^{-\lambda \cdot z} + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \times \\ \times (sh(\lambda(z-h)) \cdot \eta(z-h) - 0.5e^{\lambda(z-h)}), \quad (13)$$

where  $C(p, \lambda)$  is an arbitrary integration constant;

b)  $z \in [-d, 0]$ ,

$$E_x^{(2)}(p, \lambda, z) = D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot z} + D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot z}, \quad (14)$$

where  $D_{1,2}(p, \lambda)$  is an arbitrary integration constants;

c)  $z \in (-\infty, 0]$ , to the condition of boundedness at  $z \rightarrow 0$  the following function satisfies:

$$E_x^{(3)}(p, \lambda, z) = B(p, \lambda) \cdot e^{\lambda(z+d)}, \quad (15)$$

where  $B(p, \lambda)$  – is an arbitrary integration constant.

Images of the tangential components of the magnetic field intensities can be found using equations (13–15) and (3):

a)  $z \in [0, \infty)$ ,

$$H_y^{(1)}(p, \lambda, z) = \frac{\lambda}{p\mu_0} \left( C(p, \lambda) e^{-\lambda \cdot z} - \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \times \right. \\ \left. \times (ch(\lambda(z-h)) \eta(z-h) - 0.5e^{\lambda(z-h)}) \right) \quad (16)$$

b)  $z \in [-d, 0]$ ,

$$H_y^{(2)}(p, \lambda, z) = -\frac{q(p, \lambda)}{p\mu_0} \times \\ \times (D_1(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot z} - D_2(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot z}) \quad (17)$$

c)  $z \in (-\infty, 0]$ ;

$$H_y^{(3)}(p, \lambda, z) = -\frac{\lambda}{p\mu_0} \cdot B(p, \lambda) \cdot e^{\lambda(z+d)}. \quad (18)$$

From the condition of continuity of the tangent components of the electromagnetic field intensities at the

distinguished areas boundaries there are obtained systems of algebraic equations for determining unknown arbitrary constants of integration in the expressions (13–18) [12].

1.  $z = 0$ :

$$\begin{cases} C(p, \lambda) - \frac{K(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{2\lambda} = D_1(p, \lambda) + D_2(p, \lambda) \\ C(p, \lambda) + \frac{K(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{2\lambda} = -\frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \times \\ \times (D_1(p, \lambda) - D_2(p, \lambda)) \end{cases}; \quad (19)$$

2.  $z = -d$ :

$$\begin{cases} D_1(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot d} + D_2(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot d} = B(p, \lambda) \\ \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} (D_1(p, \lambda) \cdot e^{-q(p, \lambda) \cdot d} - D_2(p, \lambda) \cdot e^{q(p, \lambda) \cdot d}) = \\ = B(p, \lambda). \end{cases} \quad (20)$$

Further, we are interested in excitation of electromagnetic field in the sheet metal. Therefore, we are looking for only unknown arbitrary constants  $D_{1,2}(p, \lambda)$ .

From the system of the linear algebraic equations it is received that,

$$\begin{cases} D_1(p, \lambda) = -\frac{K(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{2\lambda} \cdot \frac{e^{q(p, \lambda) \cdot d} \cdot \left(1 + \frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right)}{\Delta(p, \lambda)} \\ D_2(p, \lambda) = \frac{K(p, \lambda) \cdot e^{-\lambda h}}{2\lambda} \cdot \frac{e^{-q(p, \lambda) \cdot d} \cdot \left(1 - \frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right)}{\Delta(p, \lambda)} \end{cases}, \quad (21)$$

$$\text{where } \Delta(p, \lambda) = \left(1 + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right)^2\right) \cdot \text{sh}(q(p, \lambda)d) + \\ + 2 \cdot \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right) \cdot \text{ch}(q(p, \lambda)d).$$

$D_{1,2}(p, \lambda)$  from the relations (21) should substitute into expression (14). After simple mathematical transformations, it is obtained that,

$$E_x(p, \lambda, z) = -\frac{K(p, \lambda) e^{-\lambda h}}{\lambda} \times \\ \times \frac{\left(\text{sh}(q(p, \lambda)(z+d)) + \left(\frac{q(p, \lambda)}{\lambda}\right) \text{ch}(q(p, \lambda)(z+d))\right)}{\Delta(p, \lambda)}. \quad (22)$$

The obtained dependence is an image of the longitudinal component of the electric field intensity excited in the sheet metal.

The expression (22) should multiply by the electrical conductivity of the sheet metal –  $\gamma$ . The result should substitute in the formula (8).

After all necessary substitutions, the density of induced current in  $L$ -space will be found.

$$j_x(p, y, \zeta) = -\left(\frac{2a\tau}{\pi d^2}\right) \cdot (p \cdot j(p)) \times \\ \times \int_0^\infty \frac{\sin(\lambda a)}{(\lambda a)} \cdot \frac{e^{-\lambda h}}{\lambda} \cdot \frac{F(p, \lambda, \zeta)}{\Delta(p, \lambda)} \cdot \cos(\lambda y) d\lambda, \quad (23)$$

where  $\tau = \mu_0 \gamma d^2$  is the characteristic time of diffusion in the sheet metal which was introduced by the author of the monograph [12],

$$F(p, \lambda, \zeta) = \text{sh}(q(p, \lambda)d \cdot (1 - \zeta)) + \\ + \frac{q(p, \lambda)}{\lambda} \text{ch}((q(p, \lambda)d) \cdot (1 - \zeta)),$$

$\zeta = \left(-\frac{z}{d}\right)$  – is a spatial variable associated with the thickness of the sheet metal,  $\zeta \in [0, 1]$ .

### Currents and forces in originals space

In expression (23), we make the transition to the space of originals [12, 13].

To calculate the singular points of the integrand function the fraction denominator in expression (23) it is necessary to equate to zero. The product of the wave number and the thickness of the sheet should be represented as the imaginary quantity:

$$\begin{cases} \Delta(p, \lambda) = 0 \\ (q(p, \lambda) \cdot d) = i \cdot \beta_k \end{cases}, \quad (24)$$

where  $i = \sqrt{-1}$  – the imaginary unit.

Using system (24) we obtain the equation for  $\beta_k$ :

$$\text{ctg} \beta_k = 0.5 \cdot \left(\frac{\beta_k}{(\lambda d)} - \frac{(\lambda d)}{\beta_k}\right), \quad (25)$$

As follows from the (24) and (25), the singular points of a function of a complex variable under the sign of the integral in the expression (23) are the distinguished from zero the simple poles –  $p_k$  [18]:

$$p_k = -\frac{1}{\tau} \cdot (\beta_k^2 + (\lambda \cdot d)^2), \quad k = 0, \pm 1, 2, \dots \quad (26)$$

Further, in accordance with the theorem on the original of the rational fraction and the theorem on the functions convolution we find the corresponding temporal dependence from the expression (23):

$$\frac{p \cdot j(p)}{\Delta(p, \lambda)} \times \\ \times (\text{sh}(q(p, \lambda) \cdot d(1 - \zeta)) + \frac{q(p, \lambda) \cdot d}{(\lambda d)} \cdot \text{ch}(q(p, \lambda) \cdot d(1 - \zeta))) \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow \sum_{k=0}^{\infty} \frac{i \cdot \left( \sin(\beta_k(1-\zeta)) + \frac{\beta_k}{\lambda d} \cdot \cos(\beta_k(1-\zeta)) \right)}{\frac{d}{dp} [\Delta(p, \lambda)]} \Bigg|_{p=p_k} \times \times \frac{dj_t(t)}{dt} * e^{p_k t}, \quad (27)$$

where  $\zeta = -\frac{z}{d}$ ,  $\zeta \in [0, 1]$  – the coordinate associated with the thickness of the sheet metal, in relative units;

$$\delta_k = \begin{cases} 1.0 & \text{for } k = 0 \\ 2.0 & \text{for } k \neq 0 \end{cases}$$

**Remark.** The presence of the Kronecker symbol –  $\delta_k$  is due to the evenness of the roots  $\beta_k$  in equation (25).

Finally, using the dependence (27) after the necessary identical transformations we find the original for the current density excited in the sheet metal.

$$j_x(t, \zeta, y) = I_m \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(\lambda a)}{(\lambda a)} e^{-\lambda h} \times \times \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{F(\beta_k, \lambda, \zeta)}{\Phi(\beta_k, \lambda)} \left( \frac{dj_t(t)}{dt} * e^{p_k t} \right) \lambda \cos(\lambda y) d\lambda, \quad (28)$$

where

$$F(\beta_k, \lambda, \zeta) = \beta_k \cdot \left[ \sin(\beta_k(1-\zeta)) + \left( \frac{\beta_k}{\lambda \cdot d} \right) \cdot \cos(\beta_k(1-\zeta)) \right],$$

$$\Phi(\beta_k, \lambda) = \cos(\beta_k) \cdot [(\lambda d)^2 + 2(\lambda d) - \beta_k^2] + + 2\beta_k \sin(\beta_k) \cdot [(\lambda d) + 1].$$

The expression (28) should reduce to a form suitable for calculations. For this, we introduce a new integration variable  $\alpha = \lambda d$ ,  $\alpha \in [0, \infty)$ ,  $d\lambda = \frac{1}{d} \cdot d\alpha$ .

$$j_x(t, \zeta, y) = I_m \left( \frac{2}{\pi d^2} \right) \int_0^{\infty} \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} \cdot e^{-\alpha \frac{h}{d}} \times \times \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{F(\beta_k, \alpha, \zeta)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left( \frac{dj_t(t)}{dt} * e^{p_k t} \right) \alpha \cos\left(\alpha \frac{y}{d}\right) d\alpha, \quad (29)$$

where

$$F(\beta_k, \alpha, \zeta) = \beta_k \cdot \left[ \sin(\beta_k(1-\zeta)) + \left( \frac{\beta_k}{\alpha} \right) \cdot \cos(\beta_k(1-\zeta)) \right],$$

$$\Phi(\beta_k, \alpha) = \cos(\beta_k) \cdot [\alpha^2 + 2\alpha - \beta_k^2] + 2\beta_k \sin(\beta_k) \cdot [\alpha + 1]$$

$\beta_k$  satisfied the equation:  $\text{ctg}\beta_k = 0.5 \cdot \left( \frac{\beta_k}{\alpha} - \frac{\alpha}{\beta_k} \right)$ .

Dependence (29) is integrated over the thickness of the sheet metal. By this way we obtain the expression for calculation describing the transverse distribution of the induced current:

$$J_x(t, y) = I_m \left( \frac{2}{\pi d} \right) \int_0^{\infty} \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} e^{-\alpha \frac{h}{d}} \times \times \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left( \frac{dj_t(t)}{dt} * e^{p_k t} \right) \alpha \cos\left(\alpha \frac{y}{d}\right) d\alpha, \quad (30)$$

$$\text{where } G(\beta_k, \alpha) = \left[ (1 - \cos \beta_k) + \left( \frac{\beta_k}{\alpha} \right) \cdot \sin \beta_k \right].$$

The integral of dependence (30) in a transverse variable gives the expression for the magnitude of the current induced in the sheet metal –  $y \in [-a, a]$ :

$$I_x(t) = I_m \left( \frac{4a}{\pi d} \right) \times \times \int_0^{\infty} \left( \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} \right)^2 e^{-\alpha \frac{h}{d}} \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left( \frac{dj_t(t)}{dt} * e^{p_k t} \right) \alpha d\alpha \quad (31)$$

Let the external current from a third-party source be supplied into the sheet metal and its cross distribution under the main conductor is also uniform.

Summing the third-party and induced signals, we find the dependencies for the resulting current and its density in the specified limited area of the sheet metal.

The total current is written in the form:

$$I_x^{(S)}(t) = I_m \left[ j(t) - \left( \frac{4a}{\pi d} \right) \int_0^{\infty} \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} \times \times e^{-\alpha \frac{h}{d}} \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left( \frac{dj_t(t)}{dt} * e^{p_k t} \right) \alpha d\alpha \right] \quad (32)$$

The resulting current density flowing in this part of the sheet metal, taking into account the expression (29), is written in the form:

$$j_x^{(S)}(t, \zeta, y) = \frac{I_m}{(2ad)} \left[ j(t) - \left( \frac{4a}{\pi d} \right) \cdot \int_0^{\infty} \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} \cdot e^{-\alpha \frac{h}{d}} \times \times \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \frac{F(\beta_k, \alpha, \zeta)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \left( \frac{dj_t(t)}{dt} * e^{p_k t} \right) \alpha \cos\left(\alpha \frac{y}{d}\right) d\alpha \right]. \quad (33)$$

Equation (33) allows the calculation of the current distribution in the cross section of the sheet metal, where a superposition of the induced and the external current has a place.



An illustrative characteristic of the flowing electromagnetic processes is the linear density of the total current in the sheet metal in the area under the main conductor. It describes the lateral distribution of the current and, ultimately, illustrates the degree of homogeneity of the excited attractive forces along the coordinate  $y \in [-a, a]$ .

Integrating the equation (33) at  $\zeta \in [0, 1]$  taking into account that  $\zeta = -\frac{z}{d}$ ,  $z \in [-d, 0]$ , we obtain

$$J_x^{(s)}(t, y) = \frac{I_m}{(2ad)} \left[ j(t) - \left( \frac{4a}{\pi d} \right) \cdot \int_0^\infty \frac{\sin\left(\alpha \frac{a}{d}\right)}{\left(\alpha \frac{a}{d}\right)} e^{-\alpha \frac{h}{d}} \times \right. \\ \left. \times \sum_{k=0}^\infty \delta_k \frac{G(\beta_k, \alpha)}{\Phi(\beta_k, \alpha)} \cdot \left( \frac{dj_t(t)}{dt} * e^{p_k t} \right) \cdot \alpha \cos\left(\alpha \frac{y}{d}\right) d\alpha \right]. \quad (34)$$

Speaking of the electromagnetic processes in the investigating system with the parallel electrical connection of the main conductor with  $l$  – length to a section of the same length on sheet metal, the following circumstances should be mentioned.

The first. As it was pointed out in the formulation of the problem the main conductor is “transparent” for the active fields and does not affect the occurring electromagnetic processes. But let us suppose that it is made of the same metal as the sheet billet.

The second. In the first approximation, the influence of induction effects on the current characteristics in the excitation source of the system – the main conductor – can be taken into account if, based on the physical principles of similarity, we assume that the electromagnetic processes in it and in zone of the sheet metal under it are identical [17].

Taking into account the above circumstances, the total values of the current characteristics in the main conductor can be represented by dependencies (32–34).

The integral force of attraction, excited by the interaction of parallel currents, described by expression (32), takes the form [17]:

$$F_{attr}(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left( I_x^{(s)}(t) \right)^2 \cdot \frac{\ell}{h}. \quad (35)$$

Expression (35) in combination with dependence (32), as well as relations (33) and (34) for the linear density of the excited currents are the solutions of the electrodynamic problem posed. They adequately describe the processes in the tool of magnetic-pulsed attraction with the “direct passage of current” through the metal being processed.

### Experimental approbation

First, there should be underlined, that the represented experiments on the magnetic-pulsed attraction

with “direct passage of current” unlike the cited works [15, 16] were conducted in view of the new groundworks and experiences in a given scientific area. It allowed moving from the first approbations of the action principle to experiments with an understanding of the physics of the processes and the specific recommendations development for the creation of equipment for the effective implementation of a given production operation. In addition, the experience of previous studies was taken into account, according to which the low-frequency mode of the flowing electromagnetic processes is preferable. This is about an intensive penetration of the fields being excited through the conductive components of the investigated system.

### Calculation of the experimental tool model characteristics

Design of the given experimental model is principal corresponding to fig.1 and it is equally as for ferromagnet as non-ferromagnet materials (in particular, steel and aluminum).

The given model consists of the following components:

- the main conductor – is a metal strip with a given width;
- the flat metal sheet which defined part is a subject for attraction is located on the certain distance from the main conductor;
- all geometrical and electrophysical parameters of the tool are supposed given (dimensions and conductivity);
- the instrument is connected to a power source with a voltage through a matching device that provides the specified operating frequency [10].

The calculation of the characteristics of the developed experimental model of the magnetic-pulsed attraction tool with the “direct passage of current” through a given area of sheet metal – the billet, is carried out using the equations for the excited currents and forces (32–35).

Let us start from the calculations for the steel sheet,  $\gamma \approx 0,5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ohm} \cdot \text{m}}$ .

Operating frequency is  $f=1500$  Hz, discharge voltage is  $U=2000$  V, operating zone is:  $l \times 2a=0,06 \times 0,01$  m<sup>2</sup>.

From the calculations it follows that:

- the maximum capacity of the power source while reducing the transverse size of the inductor main conductor to  $\sim 0,01$  m is corresponding to the attraction force maximum  $\sim 4000$  N (Fig. 2), which is more than  $\sim 2$  times higher of the same maximum for the width of the conductor  $\sim 0,06$  m;

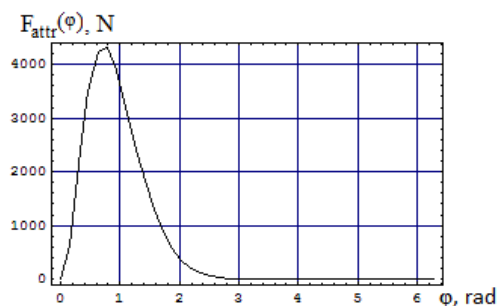


Fig. 2 – Excited attraction force (steel sheet),  $\varphi = \omega t$  is a phase of a signal

– from the physical viewpoint, the reason of attractive forces increasing with a decrease in the transverse size of the main conductor can be explained by increasing the excited fields amplitudes (effect of concentration), that obviously leads to the intensification of the induction processes;

– the transverse distribution of total currents, reflecting the level of the transverse distribution of attractive forces, is almost uniform (fig. 3).

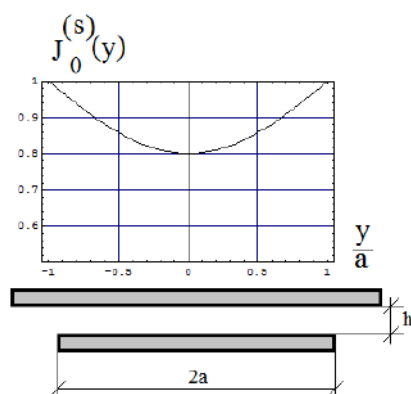


Fig. 3 – The transverse distribution of the relative magnitude of the total current normalized to a maximum

Summary. Reducing the width of the main conductor of the inductor can significantly increase the power performance of the system of magnetic-pulsed attraction with a "direct passing of current" through the metal being processed.

Calculations conducted for under voltage  $U=1500$  V show that

– the force of the magnetic-pulsed attraction is  $\sim 1100$  N, that is almost  $\sim 4$  times less the developed force at maximum discharge voltage for the given power source;

– there is a quadratic dependence between the excited forces of attraction and the magnitude of the discharge voltage, that is, when the voltage drops to  $\sim 1500$  V the attraction with an amplitude  $\sim 1778$  N can be expected;

– physically, the established functional relationship between the voltage and the excited forces of attraction is determined by the quadratic relationship between the voltage of the capacitive storage and the

stored energy spent on the excitation of the corresponding forces.

**Remark.** The established quadratic relationship between forces and discharge voltage does not take into account losses during the transmission of electromagnetic energy from a source into the working area of the instrument.

Summary. The established quadratic dependence of the developed forces on the discharge voltage allows approximate estimates of the attraction effectiveness when operating in the accepted range of energy possibilities of the power source.

Let us turn to numerical estimates for the aluminum sheet with  $\gamma \approx 3,75 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ohm} \cdot \text{m}}$ .

The operating frequency is  $f=1500$  Hz, the voltage is  $U=2000$  V, the operating zone is:  $l \times 2a = 0,06 \times 0,01$  m<sup>2</sup>.

The main results:

1. The maximum force of attraction is  $\sim 1750$  N (Fig. 4);
2. The level of heterogeneity of the transverse distribution of the total current, which characterizes the degree of uniformity of the transverse distribution of attractive forces, does not exceed  $\sim 20\%$ .

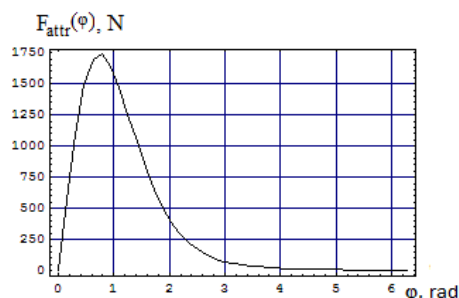


Fig. 4 – Excited attraction force (aluminum sheet),  $\varphi = \omega t$  is a phase of a signal

Summary. The magnetic-pulsed attraction with the "direct passage of current" through the processed aluminum is quite effective when using technological equipment and the characteristic indicators of the manufacturing operation, which were adopted to deform the steel sample.

### Equipment, experimental objects for processing

Experimental equipment for performing a given production operation included two main components:

- the tool of magnetic-pulsed attraction;
- the power source – the energetic block (magnetic-pulse installation).

The power source – the magnetic-pulse installation MPIS-2 was elaborated and created at the laboratory of electromagnetic technologies of Kharkov National Automobile & Highway University. The general view of the installation (together with a tool) is shown in fig. 5.



Fig. 5 – The magnetic-pulsed installation MPIS-2 with a tool, (maximum of the stored energy is  $\sim 2,4$  kJ at voltage  $\sim 2$  kV)

Structurally, MPIS-2 is formed as a single unit in which all electrical equipment is concentrated, as well as an air cooling system for the switches and for the charging device.

On the upper plane of the body, a horizontal massive dielectric board is placed, which is used as a technological table. Current collectors (electrical terminals) are brought to its surface to connect the load – a tool of the production operation.

Characteristics of the magnetic-pulsed installation MPI-2 [9]:

- the maximum stored energy  $W \approx 2.0$  kJ;
- the capacity of the condenser battery  $C = 1200$   $\mu$ F;
- the own frequency  $f_0 \approx 7$  kHz;
- the voltage in the range  $\sim 100 \div 2000$  V;
- the repeat frequency of generated current pulses  $1 \div 10$  Hz;

– the multiple repetition regime is provided by an electronic control unit that synchronizes the processes "charge - discharge";

- the switch type is the thyristor switches;
- the supply voltage is  $\sim 380/220$  V.

**Remark.** The choice of the geometric shape of the instrument is due to the requirement of the minimum inductance of the current-leads in order to reduce the loss of electromagnetic energy during its transportation from the source to the instrument.

Experimental samples are metal plates of a rectangular geometry with the dents: the steel of the vehicle bodywork coating "Ford" and the special electrical steel.

Plate thickness is 0.08 m, dents diameter is  $0.02 \div 0.25$  m.

### Practical approbation, the main results

The sequence of operations for force approbation of the developed tool of magnetic-pulsed attraction and indicators of the process of eliminating dents during the experiment are the following:

- the inspection and visual study of the processing object – of the metal plate with the dent;
- the mutual mechanical fixation of the object of processing and the tool using bolted joints;
- setting the voltage on the capacitive storage  $\sim 1800 \div 2000$  V;
- switching on the tool electrical circuit and the force impact on the processing metal surface in the regime  $(5 \div 10)$ -fold repetition of the magnetic-pulsed attraction;
- the inspection and visual study of the experimental sample with the eliminated dent, the conclusion about the effectiveness of the completed production operation.

**Remark.** In case of an insufficient smooth surface, the operation of the pulsed magnetic attraction of the dent should be repeated until the desired level of quality performed manufacturing operation.

Below (fig 6,7) are the illustrations of the experiment.

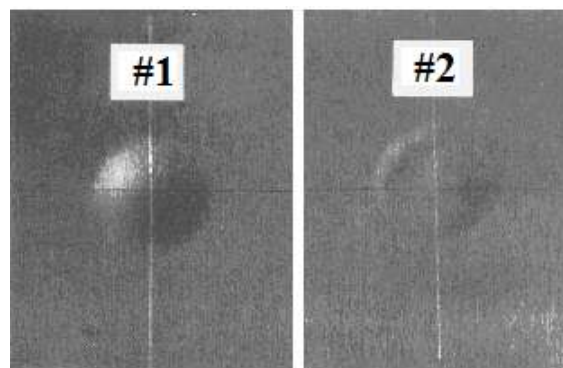


Fig. 6 – Experimental samples from the special electrical steel, #1 – the sample before the attraction; #2 – the sample after attraction (5-multiple repetition of magnetic-pulsed attraction)

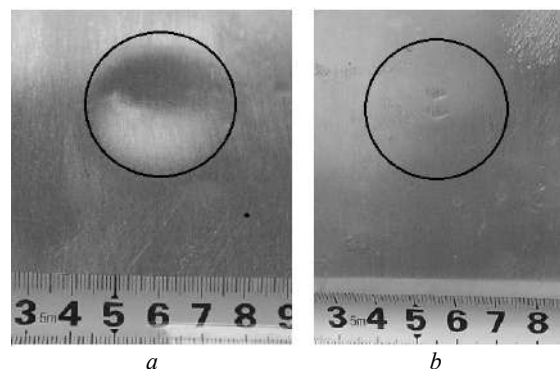


Fig. 7 – Experimental samples of car body coating "Ford", a) the sample before the attraction; b) the sample after attraction (9-multiple repetition of magnetic-pulsed attraction)

The main results of the experiments are as follows.

– The practical capabilities of the tools of the magnetic-pulsed attraction of the determined areas of the sheet metals at "direct passage of current" through them were successfully demonstrated.

– The dosed magnetic-pulsed force action, allowing the controlled deformation of sheet metal in the treatment area was practically implemented.

– The magnetic-pulsed attraction method is particularly interesting for eliminating dents in car bodies, because, unlike known analogs, it does not require disassembly into the elements for the purpose of mandatory access from the inside of the sheet metal with a dent what was confirmed experimentally.

### Conclusions

The theoretical justification of the method of magnetic-pulsed attraction of sheet metals with the “direct passage of current” through the object being processed has been carried out.

The analytical dependencies for the numerical estimates of the amplitudes and time functions of the excited currents and electrodynamic forces are got.

The experimental model of a tool for magnetic-pulsed attraction of sheet metals with “direct passage of current” through the object being processed was elaborated and created.

The successful practical approbation of the proposed method was carried out in conditions close to the reality of the corresponding production operation.

### Список літератури

- Golovaschenko S. F., Batygin Yu. V. Sheet metal blank destaker. Patent US2018105373-A1. Oakland University. Publication Date: 04/19/2018.
- Hansen K. A., Hendrickson G. I. Electromagnetic dent puller Patent US 3,998,081. The Boeing Company. Publication Date: 21/12/1976.
- Electromagnetic Dent Removal. URL: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp> (accessed 15.12.2019)
- Welcome to BETAG Innovation. URL: [http://www.betaginnovation.com\(www.beulentechnik.com\)](http://www.betaginnovation.com(www.beulentechnik.com)) (accessed 15.11.2017)
- Batygin Yu. V., Chaplygin Y. A., Gnatov A. V., Golovaschenko S. F. Pulsed electromagnetic attraction processes for sheet metal components. In *Proceedings of the 6-th International Conference on High Speed Forming, (May 26-29, 2014, Daejeon, Korea)*. Daejeon. 2014. P. 253-260.
- Psyk V., Risch D., Kinsey B. L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Electromagnetic Forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. 211. P. 787–829. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
- Batygin Yu., Barbashova, M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. 2018. 95 p.
- Borchert Donald Paul. Apparatus and method for vacuum dent repair. Patent US 6,538,250. Dent Defyer Inc. Publication Date: 03/25/2003.
- Шнеерсон Г. А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхвысокого импульсного тока. М.: Энергоиздат, 1992. 413 с.
- Бондаренко А. Ю., Финкельштейн В. Б., Степанов А. А. Экспериментальная апробация электродинамической системы с прямым пропусканіем тока для внешней рихтовки автомобильных кузовов *Електротехніка і Електромеханіка*. 2014. № 4. С. 50–52.
- Бондаренко А. Ю., Финкельштейн В. Б., Гаврилова Т. В. Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропусканіи импульсного тока. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2014. № 9 (1052). С. 66–72.
- Тамм И. Е. *Основы теории электричества*. 10-е изд., испр. Москва: Наука, 1989. 504 с.
- Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике (для научных работников и инженеров)*. Москва: Наука, 1973. 832 с.

### References (transliterated)

- Golovaschenko S. F., Batygin Yu. V. Sheet metal blank destaker. Patent US2018105373-A1. Oakland University. Publication Date: 04/19/2018.
- Hansen K. A., Hendrickson G. I. Electromagnetic dent puller Patent US 3,998,081. The Boeing Company. Publication Date: 21/12/1976.
- Electromagnetic Dent Removal. Available at: <http://www.electroimpact.com/EMAGDR/overview.asp> (accessed 15.12.2019)
- Welcome to BETAG Innovation. Available at: [http://www.betaginnovation.com\(www.beulentechnik.com\)](http://www.betaginnovation.com(www.beulentechnik.com)) (accessed 15.11.2017)
- Batygin Yu. V., Chaplygin Y. A., Gnatov A. V., Golovaschenko S.F. Pulsed electromagnetic attraction processes for sheet metal components. In *Proceedings of the 6-th International Conference on High Speed Forming, (May 26-29, 2014, Daejeon, Korea)*. Daejeon, 2014, pp. 253–260.
- Psyk V., Risch D., Kinsey B. L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Electromagnetic Forming – A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, 211, pp. 787–829, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012.
- Batygin Yu., Barbashova, M., Sabokar O. *Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. 2018. 95 p.
- Borchert Donald Paul. Apparatus and method for vacuum dent repair. Patent US 6,538,250. Dent Defyer Inc. Publication Date: 03/25/2003.
- Shneerson G. A. *Polya i perekhodnye processy v apparature sverkhvysokogo impul'snogo toka* [Fields and transient processes in apparatuses of strong currents]. Moscow, Energoizdat, 1992. 413 p.
- Bondarenko A. Yu., Finkelshtein V. B., Stepanov A. A., *Ehksperimental'naya aprobaciya ehlektrodynamichejskoj sistemy s "pryamym propuskaniem toka" dlya vneshnej rikhtovki avtomobil'nykh kuzovov* [Experimental approbation of electrical dynamical system with «direct passage of pulsed current» for external flattening body car]. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2014, no. 4, pp. 50–52.
- Bondarenko A. Yu., Finkelshtein V. B., Gavrilova T. V., Vneshnyaya rikhtovka kuzovov avtotransporta s pomoshch'yu ehlektrodynamichejskikh sistem pri "pryamom propuskaniі impul'snogo toka". [External flattening of bodies car with help of electrodynamic system with «direct passage of pulsed current»]. *Bulletin of NTU "KhPI"*, 2014, no. 9 (1052), pp. 66–72.
- Tamm I. E. *Osnovy teorii ehlektrichestva* [Fundamentals of the Theory of Electricity]. M., Nauka Publ., 1989. 504 p.
- Korn T., Korn G. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p.

### About authors (Відомості про авторів)

**Yuriy Batygin** – Doctor of Science, Professor, Head of the Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

**Батигін Юрій Вікторович** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1278-5621; e-mail: yu.v.batygin@gmail.com.

**Olena Yeryomina** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8123-1104; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

**Єрьоміна Олена Федорівна** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8123-1104; e-mail: elena.yeryomina@gmail.com.

**Svitlana Shinderuk** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

**Шиндерук Світлана Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6354-4174; e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

**Viktoria Strelnikova** – Postgraduate Student, Department of Physics, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: v.strelnikova91@gmail.com.

**Стрельникова Вікторія Анатоліївна** – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант кафедри фізики, м. Харків, Україна; e-mail: v.strelnikova91@gmail.com.

**Evgeniy Chaplygin** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Assistant Professor, Department of Physics, Kharkiv National Automobile & Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

**Чапליгін Євген Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри фізики, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1448-6091; e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com.

*Please cite this article as:*

Batygin Y., Yeryomina O., Shinderuk S., Strelnikova V., Chaplygin E. Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with “direct passage of current”. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 3–13, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Батигін Ю. В., Єрьоміна О. Ф., Шиндерук С. О., Стрельникова В. А., Чаплигін Є. О. Магнітно-імпульсне притягання листових заготовок при «прямому пропусканні струму». *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 3–13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Батыгин Ю. В., Ерёмина Е. Ф., Шиндерук С. А., Стрельникова С. А., Чаплыгин Е. А. Магнитно-импульсное притяжение листовых заготовок при «прямом пропускании тока». *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 3–13. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.01.

**АННОТАЦІЯ** Представлено теоретическое обоснование работоспособности метода магнитно-импульсного притяжения листового металла с «прямым пропусканьем тока» через обрабатываемый объект. Проведен анализ известных работ в этой области, показано, что отсутствие достаточно полных теоретических исследований не позволяет эффективно выполнять заданную производственную операцию. Путем решения краевой электродинамической задачи получены аналитические выражения для фазовых зависимостей токов в экспериментальной системе и возбужденных сил притяжения обрабатываемого объекта. Доказано численными оценками, что низкочастотный режим протекающих электромагнитных процессов предпочтителен при интенсивном проникновении полей через проводящие компоненты исследуемой системы. Установлено, что рассчитанная зависимость развиваемых сил от напряжения разряда емкостного накопителя позволяет приблизительно оценить эффективность притяжения при работе в принятом диапазоне энергетических возможностей источника питания. Показано, что степень неоднородности поперечного распределения сил притяжения в исследуемой области не превышает ~ 20%. Спроектирована и создана действующая экспериментальная модель, состоящая из инструмента магнитно-импульсного притяжения листового металла и источника питания - энергетического блока. На основе полученных соотношений рассчитаны характеристики опытной установки и режимы проведения испытаний. Практически реализовано дозированное магнитно-импульсное силовое воздействие, позволяющее контролировать деформацию листового металла в зоне обработки. Проведены эксперименты по устранению вмятин на образцах, изготовленных из различных видов стали в условиях, приближенных к соответствующей реальной производственной операции. Успешно продемонстрированы практические возможности средств магнитно-импульсного притяжения определенных участков листовых металлов при «прямом пропусканьи тока» через них. Доказана эффективность рассматриваемого метода при использовании показателей технологической операции, рассчитанных на основании теоретически полученных зависимостей.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсное притяжение; тонкостенный листовой металл; электромагнитные процессы; «прямое прохождение тока»; экспериментальная апробация; рихтовка автомобильных кузовов

Received 30.11.2020



УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.02

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ\*, М. В. БІЛИЙ

кафедра електронних пристроїв та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: verbitskiy@bigmir.net

**АНОТАЦІЯ** Завдяки утворенню ринку електроенергії у 2019 р. доступ до нього отримали незалежні виробники. Дана ініціатива сприяла вільному ціноутворенню вартості електроенергії та в перспективі повинна одночасно зменшити вартість електроенергії й забезпечити стабільність енергосистеми України. Одним з перспективних джерел енергії, що може продаватись на ринку є енергія відновлюваних джерел. При цьому власники систем електроживлення з відновлюваною електроенергетикою мають нестабільну генерацію енергії, що розбалансовує об'єднану енергетичну систему України. Вільне ціноутворення сприятиме балансуванню енергетичної системи, бо на інтервалах дефіциту енергії вона матиме більшу вартість. Тому постачальники енергії з відновлювальних джерел будуть зацікавлені у встановленні акумулюючих потужностей з метою накопичення електроенергії на інтервалах, коли вона є дешевою, і продажу, за умови високої вартості. У статті аналізуються умови прибутковості систем електроживлення з системою акумулювання енергії і без неї залежно від рівня амортизаційних нарахувань і вартості електроенергії. При цьому енергія системи електроживлення без акумулювання енергії одразу продається в мережу без балансування системи, тому доцільнішим є використання системи з акумулюванням, для чого варто забезпечити значну різницю в ціні для проміжків часу з дефіцитом енергії. Доведено, що в системі електроживлення доцільно використовувати один найдешевший тип відновлювального джерела енергії. Тоді як для здешевлення системи електроживлення з акумулюванням енергії доречніше використовувати декілька джерел енергії, потужність яких слабо корелюється. У цьому випадку система акумулювання має меншу енергоемність і меншу вартість. Оскільки статистичні дані про потужність сонячної електроенергії та швидкості вітру для певного регіону задаються у виді масиву числових даних, як правило, параметри системи з максимальним прибутком шукаються чисельними методами, найчастіше – методом градієнтного спуску. При цьому для балансування енергосистеми доцільно, щоб прибуток системи з акумулюванням енергії перевищував прибуток системи без нього, що можливе за умови збільшення різниці максимальної і мінімальної ціни електроенергії протягом дня.

**Ключові слова:** система електроживлення з відновлювальними джерелами енергії; прибуток; амортизаційні нарахування

## PECULIARITIES OF DESIGNING THE POWER SUPPLY SYSTEM WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE CONDITIONS OF THE ELECTRICITY MARKET

I. VERBYTSKYI, M. BILYI

Department of Electronic Devices and Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Due to the formation of the electricity market in 2019, independent producers gained access to the market. This initiative promotes free pricing of electricity costs and in the long run should simultaneously reduce the cost of electricity and ensure the stability of Ukraine's energy system. One of the promising sources of energy that can be sold on the market is renewable energy. At the same time, the owners of power supply systems with renewable electricity have unstable energy generation, which unbalances the unified energy system of Ukraine. Free pricing will help balance the energy system, because at intervals of energy deficit it will have a higher cost. Therefore, energy suppliers from renewable sources will be interested in installing storage capacity in order to accumulate electricity at intervals when it is cheap, and sell at a high cost. The article analyzes the conditions of profitability of power supply systems with and without energy storage system, depending on the level of depreciation and the cost of electricity. In this case, the energy of the power supply system without energy storage is immediately sold to the grid without balancing the system, so it is more appropriate to use a system with storage, which should provide a significant difference in price for periods of energy shortage. It is proved that it is expedient to use one of the cheapest types of renewable energy source in the power supply system. Whereas to reduce the cost of a power storage system with energy storage, it is more appropriate to use several energy sources whose power is weakly correlated. In this case, the storage system has less energy consumption and lower cost. Since the statistics on solar power and wind speed for a particular region are given as an array of numerical data, as a rule, the parameters of the system with the maximum profit are sought by numerical methods, most often - the gradient descent method. In this case, to balance the power system, it is advisable that the profit of the system with energy storage exceeds the profit of the system without it, which is possible provided that the difference between the maximum and minimum price of electricity during the day.

**Keywords:** power supply system with renewable energy sources; profit; depreciation charges

### Вступ

Завдяки прийнятому у 2019 році закону України «Про ринок електричної енергії» держава позбулася монополії на продаж електричної енергії і

доступ до цього ринку отримали незалежні постачальники, які можуть продавати електроенергію на трьох ринках: ринок двосторонніх договорів, ринок на добу наперед та внутрішньодобовий ринок [1].

Дана ініціатива сприяє вільному ціноутворенню вартості електроенергії і в перспективі повинна одночасно зменшити вартість електроенергії та забезпечити стабільність енергосистеми України. Одним з перспективних джерел енергії, що може продаватись на ринку є енергія відновлюваних джерел, оскільки собівартість електроенергії, виробленої з цих джерел, стрімко зменшується і в найближчій перспективі повинна стати нижчою, ніж електроенергія з традиційних джерел [2].

На даний момент електроенергія з відновлюваних джерел енергії продається за фіксованим «зеленим тарифом», який діє до 01.01.2030 року [2]. При цьому власники систем електроживлення з відновлюваною електроенергетикою мають нестабільну генерацію енергії, що розбалансовує об'єднану енергетичну систему України. З часом зелений тариф буде спочатку зменшуватись, а потім буде відмінений і енергія відновлювальних джерел енергії продаватиметься на загальних засадах. На відміну від зеленого тарифу вільне ціноутворення сприятиме балансуванню енергетичної системи, бо на інтервалах дефіциту енергії вона матиме більшу вартість. Тому постачальники енергії з відновлювальних джерел будуть зацікавлені у встановленні акумулюючих потужностей з метою накопичення електроенергії на інтервалах, коли вона є дешевою, і продажу, за умов високої вартості. Однак встановлення акумулюючих потужностей є доцільним, лише якщо співвідношення між вартістю електроенергії у години пік і у інтервали з надлишком енергії перевищують певне значення.

У статті аналізується за яких умов у системах з відновлювальними джерелами енергії доцільно використовувати системи акумулювання енергії та пропонується алгоритм проектування систем електроживлення для обраної місцевості та ринкової вартості електроенергії на ринку електроенергії, що приносить максимальний прибуток [3].

### Мета роботи

Метою статті є аналіз умови прибутковості систем електроживлення з системою акумулювання енергії і без неї, залежно від рівня амортизаційних нарахувань і вартості електроенергії.

### Режими роботи системи

Існують три механізми продажу електроенергії – двосторонні договори, ринок електроенергії на добу наперед та внутрішньодобовий ринок. Двосторонні договори, як правило, укладаються між великими постачальниками та споживачами електроенергії на великі обсяги електроенергії, тому участь у ньому при невеликих встановлених потужностях (до 10 кВт) є недоречною. Участь у ринках на добу наперед і внутрішньодобовому ринку є більш перспективною [4]. Основна задача таких ринків – покривати дефіцит

електроенергії у ранкові (6–9 год.) та вечірні (18–22 год.) години пік, протягом яких ціна на електроенергію найвища.

При роботі на таких ринках можна дотримуватись двох стратегій:

- використовувати системи електроживлення без накопичувача і згенеровану енергію одразу продавати у мережу;

- використовувати систему з накопичувачем електроенергії і продавати електроенергію у години пік з максимальною вартістю.

За умови використання обох стратегій прогнозування потужності системи електроживлення дозволяє покращити баланс між запланованою і реально згенерованою енергією, що дозволяє збільшити прибуток та уникнути штрафних санкцій

Оскільки потужність системи електроживлення з відновлювальними джерелами енергії залежить від зовнішніх умов, для їх прогнозування є доцільним використовувати доступну інформацію сервісів прогнозу погоди у мережі інтернет. Разом з моделлю системи електроживлення така інформація дозволяє:

- 1) оцінити собівартість електроенергії для заданої структури системи електроживлення та строк її окупності для даної місцевості;

- 2) обрати структуру та стратегію керування системою електроживлення для отримання найбільшого прибутку;

- 3) ефективніше укласти угоди на ринку.

Структура типової системи електроживлення, що складається з сонячної батареї, вітрогенератора та акумулятора показана на рис. 1.

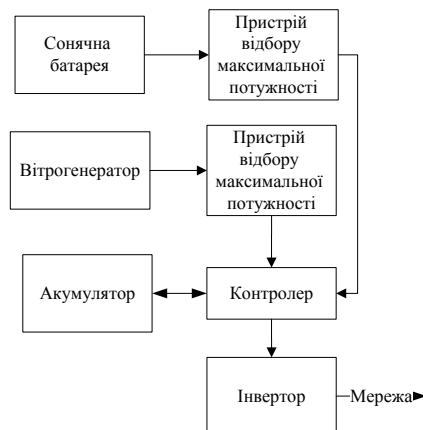


Рис. 1 – Структурна схема системи електроживлення

На етапі проектування системи, інформація про проведені торги на ринку електроенергії та метеорологічні умови в певній місцевості дозволяє обрати співвідношення між потужністю сонячної батареї, вітрогенератора та енергоємності акумулятора, що дозволить отримати найбільший прибуток для даної місцевості [5].

Для розрахунку прибутку необхідно проаналізувати:

1) вартість відновлювальних джерел енергії та акумулятора з врахуванням залежності між ціною та потужністю джерела;

2) раціональне співвідношення між встановленою потужністю акумулятора, сонячної батареї та вітрогенератора;

3) статистику щодо вартості електроенергії на ринку.

Розглянуті дані дозволяють знайти залежність між зовнішніми погодними умовами і собівартістю електроенергії, яка генерується в системі. Для цього вводиться поняття зовнішніх погодних умов та амортизації.

Можна виділити наступні погодні умови, як:  $P_C(t)$  – потужність сонячного випромінювання та  $P_B(t)$  – потужність вітру. Вони будуть враховуватись для розрахунку кількості згенерованої електроенергії з урахуванням втрат вітрогенератора та сонячної батареї [6, 7].

Собівартість визначається як сума початкових та амортизаційних, що розподілені рівномірно в часі. Початкові витрати включають в себе витрати на саму сонячну батарею, вітрогенератор та акумулятор і їх установку та підключення. Коли система встановлена, одразу, окрім прибутку вона потребує обслуговування, яке враховується як амортизаційні відрахування. В загальному випадку чистий прибуток від системи електроживлення буде розраховуватись за формулою:

$$\left( \int_0^T (P_{EH}(t) \cdot B_{EH}(t) - A(t, P_{EH})) dt \right) - PB = \Pi, \quad (1)$$

де  $P_{EH}$  – встановлена потужність системи,  $p_{EH}$  – миттєва потужність системи у момент часу  $t$ ,  $B_{EH}$  – вартість електроенергії в момент часу  $t$ ,  $A$  – амортизаційні витрати,  $\Pi$  – чистий прибуток за час експлуатації  $T$ ,  $PB$  – початкові витрати на придбання обладнання.

Сумарна миттєва потужність енергосистеми  $p_{EH}$  є сумою згенерованої енергії вітрогенератора та сонячної батареї.

$$p_{EH}(t) = p^{BG}(t) + p^{CB}(t). \quad (2)$$

У свою чергу кожен із цих параметрів залежить від зовнішніх умов  $F_C$  та  $F_B$ . Враховуючи ККД сонячної батареї та вітрогенератора, отримаємо наступні формули:

$$p^{CB}(t) = f(F_C) \cdot \eta^{CB}; \quad (3)$$

$$p^{BG}(t) = f(F_B) \cdot \eta^{BG}. \quad (4)$$

Амортизаційні витрати залежать від часу і від потужності, оскільки технічні показники пристроїв швидше деградує і потребують частішого обслуговування під більшим навантаженням [8, 9]. Тому для кожного джерела вони нараховуються по різному.

У загальному випадку формула амортизації визначається наступним чином:

$$A_{EH}(t, P_{EH}) = A^{CB}(t) + A^{BG}(t) + A^{AK}(t), \quad (5)$$

де  $A_{EH}$ ,  $P_{EH}$  – загальні амортизаційні витрати та встановлена потужність енергосистеми,  $A^{CB}$ ,  $A^{BG}$ ,  $A^{AK}$  – амортизаційні витрати на обслуговування сонячної батареї, вітрогенератора і акумулятора відповідно.

При цьому вважається, що параметри сонячної батареї зі збільшенням її миттєвої потужності деградує незначно, тоді як вплив миттєвої потужності на параметри вітрогенератора та акумулятора є суттєвим.

Коли система працює на мережу, без акумулятора, формула (1), з врахуванням структури втрат у системі згідно з рис. 1, перетворюється до виду:

$$\int_0^T ((p^{BG}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{BG} + p^{CB}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{CB}(t)) B_{EH}(t) \cdot \eta^{IHB} - (A^{CB}(t) + A^{BG}(t))) dt - PB = \Pi^{BE3-AK}, \quad (6)$$

де,  $\eta^{IHB}$  – ККД інвертора,  $\eta_{MPPT}^{CB}$  – ККД контролера сонячної батареї,  $\eta_{MPPT}^{BG}$  – ККД контролера вітрогенератора,  $\eta^{BG}$  і  $\eta^{CB}$  – ККД вітрогенератора та сонячної батареї відповідно,  $\Pi^{BE3-AK}$  – чистий прибуток від експлуатації системи електроживлення без акумулятора,  $PB^{BE3-AK}$  – початкові витрати на систему без акумулятора.

При роботі з акумулятором формула (6) зміниться, оскільки виникають додаткові втрати при транспортуванні та зберіганні енергії в акумуляторі:

$$\int_0^T (p^{BG}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{BG} + p^{CB}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{CB}(t) + p^{AK}(t)) B_{EH}(t) \cdot \eta^{IHB} \cdot \eta^{AK} - (A^{CB}(t) + A^{BG}(t) + A^{AK}(t))) dt - PB^{3-AK} = \Pi^{3-AK}, \quad (7)$$

де,  $\eta^{AK}$  – ККД акумулятора,  $\Pi^{3-AK}$  – чистий прибуток від експлуатації системи електроживлення з акумулятором,  $PB^{3-AK}$  – початкові витрати на систему з акумулятором,  $p^{AK}$  – потужність акумулятора, що може бути як від'ємною так і додатною.

Доцільність використання акумулятора визначається різницею між середньою вартістю енергії та максимальною. Чим вона більша, тим більша ефективність використання акумулятора. Якщо акумулятор має достатню ємність, він може накопичувати всю електроенергію від джерел, коли вартість на неї низька і віддавати у мережу – коли велика. Тоді рівняння (7) перетвориться до виду:

$$\int_0^T (p^{BG}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{BG} + p^{CB}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{CB}(t)) B_{\max} \eta^{IHB} \cdot \eta^{AK} - (A^{CB}(t) + A^{BG}(t) + A^{AK}(t))) dt - PB^{3-AK} = \Pi^{3-AK}. \quad (8)$$

Використання систем з акумулятором має сенс, якщо різниця між мінімальною і максимальною вартістю енергії вище певного порогового значення, тобто коли прибуток від продажу енергії по піковій вартості з акумулятором буде більшим за прибуток, отриманий при прямій роботі системи на мережу.

$$\Pi^{3-AK} - \Pi^{BE3-AK} > 0. \quad (9)$$

Розписавши та спростивши ці вирази, отримаємо наступне співвідношення:



$$\int_0^T (p^{BG}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{BG} + p^{CB} \cdot \eta_{MPPT}^{CB}(t)) \cdot \eta^{IHB} B_{EH} \left( \left( 1 + \left( \frac{B_{\max} - B_{cp}}{B_{\max}} \right) \right) \cdot \eta^{AK} - 1 \right) - A^{AK}(t) dt - PB^{AK} > 0, \quad (10)$$

де  $PB^{AK}$  – початкові витрати на придбання акумулятора,  $B_{cp}$  і  $B_{\max}$  – середньозважена і максимальна вартість електроенергії відповідно.

Виконання умови (10) буде свідчити про доцільність запасання енергії в акумулятор з подальшим її продажем в піковий момент її вартості. Але при цьому слід розуміти, що на практиці ефективність від системи з акумулятором буде нижчою, оскільки умова (10) отримана за умови необмеженої розрядної потужності акумулятора, що дозволяє продавати електроенергію лише у обмежені у часі інтервали з найвищою ціною на неї.

Амортизаційні витрати у формулах (1)-(10) у загальному випадку складаються з трьох компонент:

- початкові витрати  $A_0$ , які характеризують початковий внесок в розмірі біля  $K_0 = 20\%$  від початкової вартості, постійні витрати протягом експлуатації;

- поточні постійні витрати  $A_1$ , що лінійно зростають в часі і загалом не перевищують  $K_1 = 50\%$  від початкових витрат та характеризують обсяг витрат на амортизацію за одиницю часу;

- поточні змінні витрати  $A_2$ , що залежить від потужності і характеризують рівень зношення обладнання і загалом не перевищують  $K_2 = 50\%$  від початкових витрат.

$$A_0 = K_0 PB; \quad (11)$$

$$A_1 = K_1 \frac{PB}{T}; \quad (12)$$

$$A_2 = K_2 \frac{PB}{T} p^*, \quad (13)$$

де  $p^* = p/P$  – відносна потужність джерела енергії.

Аналіз витрат свідчить, що на обслуговування сонячної батареї потребує початкових  $A_0$  і поточних постійних витрат  $A_1$ , а при обслуговуванні вітрогенератора та акумулятора присутні всі типи амортизаційних нарахувань  $A_0$ ,  $A_1$  і  $A_2$ :

$$A^{CB} = A_0^{CB} + A_1^{CB} \cdot t; \quad (14)$$

$$A^{BG} = A_0^{BG} + A_1^{BG} \cdot t + A_2^{BG} (p_{BG}^*) \cdot t; \quad (15)$$

$$A^{AK} = A_0^{AK} + A_1^{AK} \cdot t + A_2^{AK} (p_{AK}^*) \cdot t. \quad (16)$$

Після підстановки виразів для амортизаційних відрахувань (11)-(16) у формулу (6), отримаємо вираз для розрахунку прибутку, коли система працює на мережу, без акумулятора:

$$\int_0^T ((p^{BG}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{BG} + p^{CB} \cdot \eta_{MPPT}^{CB}(t)) B_{EH}(t) \cdot \eta^{IHB} - (A_1^{CB} + A_1^{BG} + A_2^{BG})) dt - A_0^{CB} - A_0^{BG} - PB = \Pi^{BE3-AK}. \quad (17)$$

Та при роботі з акумулятором:

$$\int_0^T ((p^{BG}(t) \cdot \eta_{MPPT}^{BG} + p^{CB} \cdot \eta_{MPPT}^{CB}(t) + p^{AK}(t)) B_{EH}(t) \cdot \eta^{IHB} \cdot \eta^{AK} - (A_1^{CB} + A_1^{BG} + A_2^{BG} + A_1^{AK} + A_2^{AK})) dt - A_0^{CB} - A_0^{BG} - A_0^{AK} - PB = \Pi^{3-AK}. \quad (18)$$

При аналізі прибутку від системи електроживлення одним з факторів, що потрібно враховувати, є залежність амортизаційних нарахувань від потужності джерел енергії. Для сонячної батареї залежність амортизаційних нарахувань від потужності можна вважати лінійною, оскільки сонячна електростанція складається з набору однотипних модулів. Тоді як для вітрогенератора та акумулятора потрібно оцінити залежності їх вартостей від потужностей. Для цього було оцінено вартість лінійок акумуляторів і вітрогенераторів окремих виробників: EW та FA – для вітрогенераторів [10] і Merlion GP, RITAR DC та Luxeon LX [11] – для акумуляторів. Результуючі графіки залежності вартості від потужності акумуляторів та вітрогенераторів можна побачити на рис. 2 а) та б) відповідно.

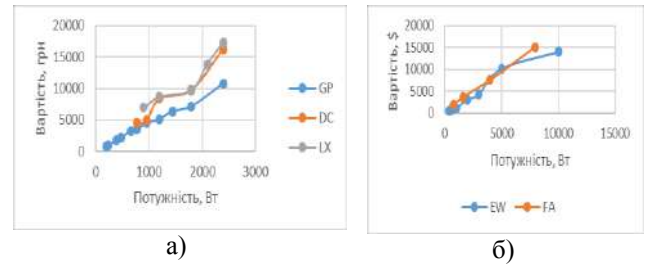


Рис. 2 – Залежність вартості від потужності: а) акумуляторних батарей; б) вітрогенераторів

Наведені залежності вартості від потужності мають лінійний тренд, тому можна вважати, що амортизаційні нарахування будуть приблизно пропорційні до їх потужності, що дозволяє аналізувати систему з нормованими потужностями сонячної батареї і вітрогенератора:  $k_{CB} + k_{BG} = 1$ . Та визначити значення  $p_{CB}^*$  і  $p_{BG}^*$  для яких отримується максимальний прибуток, а потім масштабувати систему на потрібну потужність. У цьому випадку формули (17) і (18) перетворюються до виду:

$$\int_0^T (p_{BG}^* \cdot k^{BG} \cdot \eta_{MPPT}^{BG} + p_{CB}^* \cdot k^{CB} \cdot \eta_{MPPT}^{CB}(t)) B_{EH}(t) \cdot \eta^{IHB} - (A_1^{CB} \cdot k^{CB} + k^{BG} (A_1^{BG} + A_2^{BG})) dt - A_0^{CB} \cdot k^{CB} - A_0^{BG} \cdot k^{BG} - PB_{(1)} = \Pi_{(1)}^{BE3-AK}; \quad (19)$$

$$\int_0^T ((p_{BG}^*(t) \cdot k^{BG} \cdot \eta_{MPPT}^{BG} + p_{CB}^* \cdot k^{CB} \cdot \eta_{MPPT}^{CB}(t) + p_{AK}^*(t)) B_{EH}(t) \cdot \eta^{IHB} \cdot \eta^{AK} - (A_1^{CB} k^{CB} + A_1^{BG} k^{BG} + A_2^{BG} k^{BG} + A_1^{AK} w^{AK} + A_2^{AK} w^{AK})) dt - A_0^{CB} k^{CB} - A_0^{BG} k^{BG} - A_0^{AK} w^{AK} - PB = \Pi_{(1)}^{3-AK}. \quad (20)$$

#### Принцип розрахунку співвідношень потужностей джерел енергії в системі електроживлення

За умови визначених значень нормованих амортизаційних нарахувань на використання сонячної

батарей  $A_{0,(1)}^{CB}$ ,  $A_{1,(1)}^{CB}$ , вітрогенератора  $A_{0,(1)}^{BF}$ ,  $A_{1,(1)}^{BF}$ ,  $A_{2,(1)}^{BF}$  та акумулятора  $A_{0,(1)}^{AK}$ ,  $A_{1,(1)}^{AK}$ ,  $A_{2,(1)}^{AK}$ ; кривої вартості електроенергії  $B_{EH}$ , як функції часу  $B_{EH} = f(t)$ ; нормованих початкових витрат  $ПВ_{(1)}$ ; коефіцієнтів корисної дії складових системи  $\eta_{IHB}^{CB}$ ,  $\eta_{MPPT}^{CB}$ ,  $\eta_{MPPT}^{BF}$ ,  $\eta^{AK}$ , та поточних погодних умов (потужність сонячного випромінювання та сила вітру), з рівняння (19) можливо визначити співвідношення потужностей сонячної батареї  $k^{CB}$  і вітрогенератора  $k^{BF}$ , при яких буде досягатись максимальний прибуток у системі без акумулятора  $\Pi_{(1)}^{BEZ-AK}$ , а з рівняння (20) – співвідношення  $k^{CB}$ ,  $k^{BF}$  і  $w^{AK}$  – енергоємності акумуляторної батареї, для забезпечення максимального прибутку від використання системи з акумулятором  $\Pi^3-AK$ .

Максимум прибутку від системи досягається при певному співвідношенні  $k^{CB}$  і  $k^{BF}$ , що шукається з рівняння (19) з умови:

$$\left. \frac{d\Pi_{(1)}^{BEZ-AK}}{dk^{BF}} \right|_{k^{CB}=1-k^{BF}} = 0. \quad (21)$$

Змінюючи порядок виконання операцій у формулі (19) та спочатку виконавши операцію диференціювання за змінною  $k^{CB}$ , у підінтегральному виразі буде усунуто параметр  $k^{BF}$ , що свідчить про відсутність екстремуму. Виходячи з цього можна зробити висновок, що у системі без акумулялювання енергії доцільно використовувати один тип джерела енергії, що приносить найбільший прибуток. Якщо

$$\left. \frac{d\Pi_{(1)}^{BEZ-AK}}{dk^{BF}} \right|_{k^{CB}=1-k^{BF}} < 0, \quad (22)$$

то у системі доцільно використовувати сонячні батареї, якщо ж значення похідної більше нуля – вітрогенератори.

Використання двох або більше різнотипних джерел електроенергії стає доцільним за таких умов [12,13]:

- 1) використання системи акумулялювання енергії;
- 2) обидва джерела мають нестабільну вихідну потужність;
- 3) часова залежність вихідної потужності джерел суттєво відрізняється, тобто їх коефіцієнт кореляції  $r$  не перевищує 0.5,  $r \leq 0.5$ ;
- 4) існує велика кількість інтервалів між максимумами ціни на електроенергію де потужність кожного джерела суттєво нижче максимальної.

Графічна ілюстрація роботи системи з одним джерелом енергії і двох джерел енергії, що відповідають переліченим умовам, показана на рис. 3 і 4 відповідно.

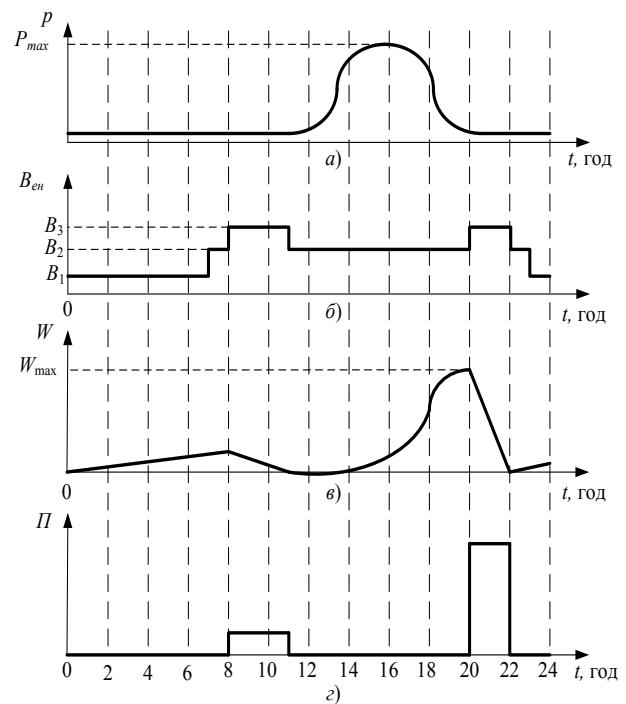


Рис. 3 – Ілюстрація роботи системи електроживлення з одним джерелом енергії: а) миттєве значення потужності джерела; б) крива вартості електроенергії за тризонним тарифом; в) обсяг енергії, накопичений в акумуляторі; г) прибуток від системи електроживлення

Згідно з рис. 3 принцип роботи системи електроживлення з системою акумулялювання енергії полягає у накопиченні енергії коли вартість електроенергії нижче максимальної  $B_1$  і  $B_2$  і продаж всієї енергії при піковому значенні вартості  $B_3$ , рис 3 б). Через нестабільну вихідну потужність відновлювального джерела  $p$ , зображену на рис. 3 а), система акумулялювання працює неефективно, оскільки в період 0..8 годин, ємність акумулятора майже не використовується, бо вихідна потужність джерела на цьому часовому інтервалі мінімальна.

Якщо ж у системі електроживлення використовуються два або більше джерела енергії, вихідна потужність яких корелюються слабо, як показано на рис. 4 а) і б), навантаження на систему акумулялювання стає рівномірнішим, що дозволяє зменшити енергоємність акумулятора і собівартість системи електроживлення в цілому.

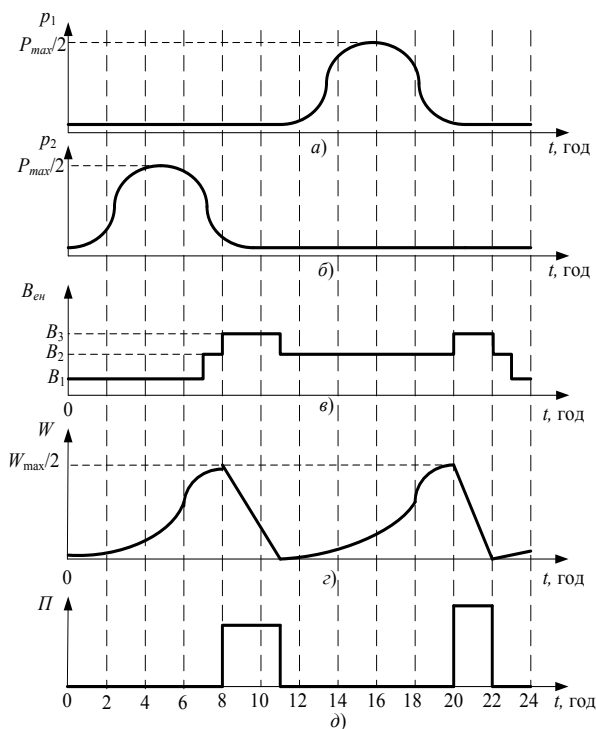


Рис. 4. Ілюстрація роботи системи електроживлення з двома джерелами енергії:

- а) миттєве значення потужності першого джерела;  
б) миттєве значення потужності другого джерела;  
в) крива вартості електроенергії за тризонним тарифом; г) обсяг енергії, накопичений в акумуляторі; д) прибуток від системи електроживлення

Знаходження максимального прибутку для системи з акумуляванням енергії передбачає корекцію кривої потужності системи, що здійснюється за допомогою заряджання-розряджання акумулятора та її подальшої оптимізації згідно з формулою:

$$\left. \frac{d\Pi_{(1)}^{3-AK}}{dk^{Br}} \right|_{k^{CB}=1-k^{Br}} + \frac{d\Pi_{(1)}^{3-AK}}{dw^{AK}} = 0. \quad (23)$$

Оскільки статистичні дані про потужність сонячної електроенергії та швидкості вітру для певного регіону задаються у виді масиву числових даних, як правило, параметри системи з максимальним прибутком шукаються чисельними методами, найчастіше – методом градієнтного спуску [14, 15]. При цьому для балансування енергосистеми доцільно, щоб прибуток системи з акумуляванням енергії перевищував прибуток системи без нього, що можливе за умови збільшення різниці максимальної і мінімальної ціни електроенергії протягом дня.

## Висновки

У статті проаналізовано проблеми використання відновлювальної енергетики і показано,

що для балансування енергосистеми доцільно залучати її продавців до ринку електроенергії. У цьому випадку виробники електроенергії з відновлювальних джерел будуть зацікавлені у модернізації систем електроживлення та встановлення систем акумулявання з метою продавати електроенергію на інтервалах пікових навантажень і тим самим балансуватимуть енергосистему.

Аналіз систем без акумулявання і з акумуляванням енергії показав, що:

- 1) систему без акумулявання енергії доцільно проектувати на основі відновлювального джерела з найменшою собівартістю;
- 2) при використанні системи акумулявання енергії доцільно використовувати декілька джерел з невеликим значенням коефіцієнта кореляції, який не перевищує 0.5, що дозволяє зменшити енергоємність акумулятора.

## Список літератури

1. Monaaf D. A. Al-falahi, Jayasinghe S.D.G., Enshaie H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 143. P. 252–274. doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.019.
2. Abba LawanBukar, Chee WeiTana. A review on stand-alone photovoltaic-wind energy system with fuel cell: System optimization and energy management strategy. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 221. P. 73–88. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.228.
3. Weiping Zhang, Akbar Maleki, Marc A. Rosen, Jingqing Liu. Sizing a stand-alone solar-wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 180. P. 609–621. doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.102.
4. Hemeida A. M., El-Ahmar M. H., El-Sayed A. M., Hasanien Hany M., Alkhalaf Salem, Esmail M. F. C., Senjyu T. Optimum design of hybrid wind/PV energy system for remote area. *Ain Shams Engineering Journal*. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 11–23. doi: 10.1016/j.asej.2019.08.005.
5. NSRDB Data Viewer. URL: <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/> (дата звернення: 15.11.2020).
6. Krajačić G., Duić N., Zmijarević Z., Mathiesen B. V., Vučinić A. A., & da Graça Carvalho M. Planning for a 100% independent energy system based on smart energy storage for integration of renewables and CO2 emissions reduction. *Applied Thermal Engineering*. 2011. 31(13). P. 2073–2083. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.03.014.
7. Kyselova A. G., Verbitskyi I. V., Kyselov G. D. Context-aware framework for energy management system. *2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv. 2016. P. 1–4. doi:10.1109/IEPS.2016.7521890.
8. Zhou W., Lou C., Li Z., Lu L., Yang H. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*. 2010. 87(2). P. 380–389. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.012.
9. Khan F. A., Pal N., Saeed S. H. Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis

- methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. 92. P. 937–947. doi:10.1016/j.rser.2018.04.107.
10. Вітрогенератори для дому та дачі по всій Україні. URL: <https://avante.com.ua/ua/catalog/1.elektrotexnika/vetrogeneratory> (дата звернення: 13.11.2020).
  11. VoltmarketUA Автомобільні акумулятори. URL: <https://voltmarket.ua/avtomobilnye-akkumulyatory> (дата звернення: 14.11.2020).
  12. Вербицький С. В., Кисельова А. Г. Контекстний підхід керування системою електроживлення. *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2016. № 18 (1190). С. 123–127. doi:10.20998/2413-4295.2016.18.18.
  13. Verbitskiy I. V., Kyselova A., Kyselov G. Power grid converter control improvement based on contextual data. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2017. P. 599–604. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100311.
  14. Yiheng Wei, Yu Kang, Weidi Yin, Yong Wang. Design of generalized fractional order gradient descent method. Department of Automation, University of Science and Technology of China, preprint. URL: <https://arxiv.org/abs/1901.05294>.
  15. Balamurali A., Feng G., Lai C., Tjong J., Kar N. C. Maximum Efficiency Control of PMSM Drives Considering System Losses using Gradient Descent Algorithm Based on DC Power Measurement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. 1–1. doi:10.1109/tec.2018.2852219.
  5. NSRDB Data Viewer. Available at: <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/> (accessed 15.11.2020).
  6. Krajačić G., Duić N., Zmijarević Z., Mathiesen B. V., Vučinić A. A., & da Graça Carvalho M. Planning for a 100% independent energy system based on smart energy storage for integration of renewables and CO2 emissions reduction. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(13), pp. 2073–2083, doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.03.014.
  7. Kyselova A. G., Verbitskiy I. V., Kyselov G. D. Context-aware framework for energy management system. *2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kyiv, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/IEPS.2016.7521890.
  8. Zhou W., Lou C., Li Z., Lu L., Yang H. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy*, 2010, 87(2), pp. 380–389, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.08.012.
  9. Khan F. A., Pal N., Saeed S. H. Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 92, pp. 937–947, doi:10.1016/j.rser.2018.04.107.
  10. Wind turbines for home and cottage throughout Ukraine. Available at: <https://avante.com.ua/ua/catalog/1.elektrotexnika/vetrogeneratory> (accessed 13.11.2020).
  11. VoltmarketUA Car batteries Available at: <https://voltmarket.ua/avtomobilnye-akkumulyatory> (accessed 14.11.2020).
  12. Verbitskiy I. V., Kyselova A. G. Context approach for electric grid control. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. 2016, 18 (1190), pp. 123–127, doi: 10.20998/2413-4295.2016.18.18.
  13. Verbitskiy I. V., Kyselova A., Kyselov G. Power grid converter control improvement based on contextual data. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017, pp. 599–604, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100311.
  14. Yiheng Wei, Yu Kang, Weidi Yin, Yong Wang. Design of generalized fractional order gradient descent method. Department of Automation, University of Science and Technology of China, preprint. Available at: <https://arxiv.org/abs/1901.05294>.
  15. Balamurali A., Feng G., Lai C., Tjong J., Kar N. C. Maximum Efficiency Control of PMSM Drives Considering System Losses using Gradient Descent Algorithm Based on DC Power Measurement. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, 1–1, doi:10.1109/tec.2018.2852219.

#### References (transliterated)

#### Відомості про авторів (About authors)

**Вербицький Євген Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: [verbitskiy@bigmir.net](mailto:verbitskiy@bigmir.net).

**Ievgen Verbitskiy** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: [verbitskiy@bigmir.net](mailto:verbitskiy@bigmir.net)

**Білий Максим В'ячеславович** – магістр, кафедра електронних пристроїв та систем, факультет електроніки Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-0893-4583; e-mail: [mxbel98@gmail.com](mailto:mxbel98@gmail.com).

**Maxym Bilyi** – Master, Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0893-4583; e-mail: mxbely98@gmail.com

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Вербицький Є. В., Білий М. В. Особливості проектування системи електроживлення з відновлювальними джерелами енергії в умовах ринку електроенергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 14-21. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.02.

*Please cite this article as:*

Verbytskyi I., Bilyi M. Peculiarities of designing the power supply system with renewable energy sources in the conditions of the electricity market. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 14-21, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.02.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Вербицкий Е. В. Белый М. В. Особенности системы электропитания из возобновляемых источников энергии в условиях рынка электроэнергетики. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 14-21. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.02.

**АННОТАЦІЯ** Благодаря образованию рынка электроэнергетики в 2019 году доступ к рынку получили независимые производители. Данная инициатива способствовала свободному ценообразованию стоимости электроэнергии и в перспективе должна одновременно уменьшить стоимость электроэнергии и обеспечить стабильность энергосистемы Украины. Одним из перспективных источников энергии, это энергия возобновляемых источников. При этом владельцы систем электропитания с возобновляемой электроэнергетикой имеют нестабильную генерацию энергии и разбалансируют объединенную энергетическую систему Украины. Свободное ценообразование будет способствовать балансировке энергетической системы, потому что на интервалах дефицита энергии она будет больше стоить. Поэтому поставщики энергии из возобновляемых источников будут заинтересованы в установленных аккумуляторах мощностей с целью накопления электроэнергии на интервалах, когда она является дешевой, и продажи, при условии высокой стоимости. В статье анализируются условия прибыльности систем электропитания с системой аккумуляции энергии и без нее в зависимости от уровня амортизационных начислений и стоимости электроэнергии. При этом энергия системы электропитания без аккумуляции энергии сразу продается в сеть без балансировки системы, поэтому целесообразным является использование системы с аккумуляцией, для чего следует обеспечить значительную разницу в цене для промежутков времени с дефицитом энергии. Доказано, что в системе электропитания целесообразно использовать один дешевый тип восстановительного источника энергии. Тогда как для удешевления системы электропитания с аккумуляцией энергии уместнее использовать несколько источников энергии, мощность которых слабо коррелируется. В этом случае система аккумуляции имеет меньшую энергоемкость и меньшую стоимость. Поскольку статистические данные о мощности солнечной электроэнергии и скорости ветра для определенного региона задаются в виде массива числовых данных, как правило, параметры системы с максимальной прибылью рассчитываются численными методами, чаще всего - методом градиентного спуска. При этом для балансировки энергосистемы целесообразно, чтобы прибыль системы с аккумуляцией энергии превышала прибыль системы без нее, что возможно при условии увеличения разницы максимальной и минимальной цены электроэнергии в течение дня.

**Ключевые слова:** система электропитания с возобновляемыми источниками энергии; прибыль; амортизационные начисления

Надійшла (received) 21.11.2020

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.03

## МОДУЛЬНИЙ ЗАРЯДНИЙ ПРИСТРІЙ АКУМУЛЯТОРА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ З ДВОСТОРОННІМ ПЕРЕДАВАННЯМ ЕНЕРГІЇ

Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ\*, А. В. ГАРНИЦЬКИЙ

Кафедра електронних пристроїв та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: verbitskiy@bigmir.net

**АНОТАЦІЯ** Описані перспективи використання акумуляторних батарей електромобілів в якості регуляторів мережі або резервних джерел живлення згідно з концепціями V2G (Vehicle to Grid) та G2V (Grid to Vehicle). Визначено вимоги, яким мають відповідати двонаправлені перетворювачі електроенергії: широкий діапазон параметрів вхідної напруги, корекція коефіцієнта потужності вхідного струму, відбирання максимальної потужності від відновлювальних джерел енергії, висока енергетична ефективність. Обрана топологія двонаправленого ізолюваного перетворювача з двома активними мостами, що підтримує м'яку комутацію транзисторів при нульовій напрузі та запропонований модульний підхід до побудови перетворювача, який має ряд переваг, серед них: забезпечення будь-яких значень напруги або струму, зниження пульсацій, підвищення коефіцієнта корисної дії схеми, висока надійність, завдяки можливості включення резервних модулів, що можуть замінити основні в разі їхньої відмови, зменшення габаритів реактивних елементів і можливість роботи кожної комірки на вищих частотах. Обрано найефективніший для поставленої задачі тип з'єднання комірок – паралельно по входу і по виходу, що дозволяє розподілити між модулями вхідний і вихідний струми. Представлено розрахунок однієї комірки перетворювача, а саме: розрахунок високочастотного трансформатора, транзисторів і згладжувального LC-фільтра та проведений порівняльний аналіз технічних показників в одно- та багатокіткових перетворювачах. Проведене моделювання в програмному середовищі Matlab Simulink, оцінено ефект від використання модульного перетворювача при роботі з джерелами постійної та змінної напруги, зокрема проведено порівняння коефіцієнтів пульсацій в перетворювачах із різною кількістю комірок при сталому значенні габаритів згладжувального фільтра, а також підібрані параметри фільтра для різної кількості комірок, при яких забезпечується однаковий коефіцієнт пульсацій. Результати моделювання підтвердили правильність розрахунків та довели ефективність використання модульної топології перетворювача.

**Ключові слова:** зарядний пристрій електромобіля; концепція Vehicle to Grid; модульний перетворювач

## MODULAR ELECTRIC VEHICLE BATTERY CHARGER WITH BIDIRECTIONAL POWER FLOW

I. VERBYTSKYI, A. HARNYTSKYI

Department of Electronic Devices and Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Prospects for the use of rechargeable battery electric vehicles as regulators of the network or backup power supplies in accordance with the concepts of V2G (Vehicle to Grid) and G2V (Grid to Vehicle) are described. The requirements for bidirectional power converters are defined: a wide range of input voltage parameters, correction of the input current power factor, maximum power take-off from renewable energy sources, high energy efficiency. The chosen topology of the bidirectional dual active bridge converter, which supports soft switching of transistors at zero voltage and the proposed modular approach to the construction of converters, has a number of advantages: provide any voltage or current, reduce ripple, high efficiency, high reliability, due to the ability to include backup modules that can be replaced by the main in case of failure, reduction of the size of reactive elements and the ability to operate each cell on other frequencies. The most effective type of cell combination for the main task is developed - input parallel and output parallel connection are allows sharing input and output current between the modules. The dependence of the ripple coefficient on each cell is defined. The calculation of one cell of converters, namely the calculation of high-frequency transformer, transistors, and smoothing LC-filter is presented and the comparative analysis of technical indicators in one-cell and multi-cell converters is carried out. Modeling in Matlab Simulink software environment, evaluation of the effect of using a modular converter when working with DC and AC sources, comparison of ripple coefficients in converters with a different number of a cell at a constant value of the parameters of the LC-filter, and selected filter parameters at which one coefficient of pulsations is applied. The simulation results showed that the coefficients of the ripple are decreasing depending on the number of cells of the transducer in accordance with the dependence obtained by analytical calculations. Thus, the results are confirming the correctness of the calculations and prove the efficiency of the use of modular transformation topology.

**Keywords:** electric car charger; concept Vehicle to Grid; modular converter

### Вступ

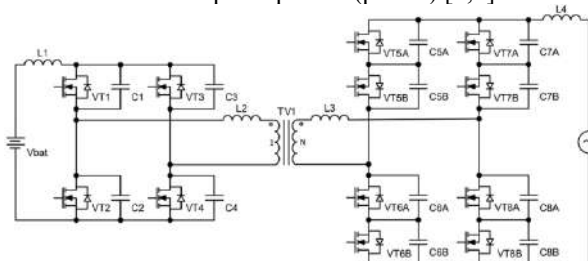
Завдяки постійному здешевленню електричних акумуляторів, дедалі більше зростає попит на

електромобілі. Інтегрування акумуляторів до централізованих або автономних джерел електроживлення під час стоянки дає можливість використовувати їхню енергію в якості регулятора

мережі або резервного джерела [1]. Принцип роботи автомобільних акумуляторів у складі систем електроживлення описано в концепціях V2G (Vehicle to Grid) та G2V (Grid to Vehicle) [2,3]. Для забезпечення ефективного функціонування автомобільних акумуляторів в мережі необхідно розробити універсальний зарядний пристрій з двостороннім передаванням енергії, який відповідає таким вимогам:

- широкий діапазон параметрів вхідної напруги;
- корекція коефіцієнта потужності вхідного струму;
- відбирання максимальної потужності від відновлювальних джерел енергії;
- висока енергетична ефективність.

Однією з найпоширеніших топологій двонаправленого перетворювача є ізовольований повномостовий перетворювач (рис. 1) [4,5].



Розглянемо модульний перетворювач, що складається з чотирьох комірок (рис. 3). Струм кожної комірки зсунутий на кут  $\frac{\pi}{4}$ . Вихідний струм перетворювача зображений на рис. 4.

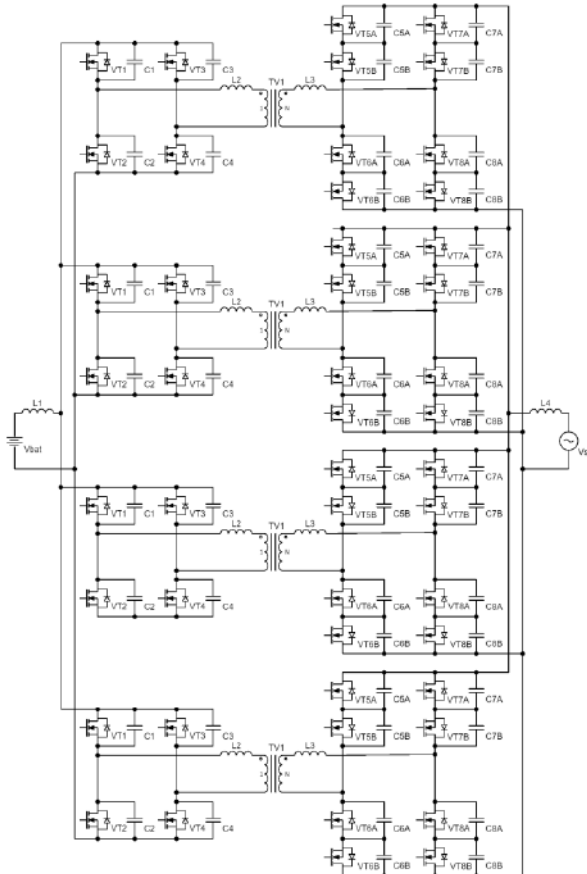


Рис. 3 – Принципова схема перетворювача виконаного на чотирьох модулях

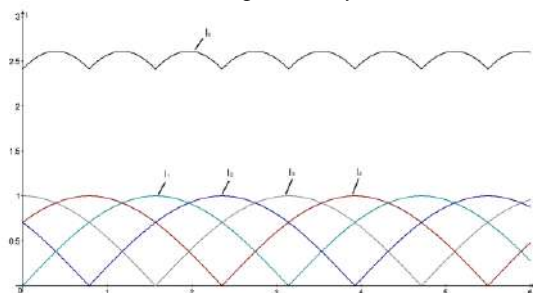


Рис. 4 – Струм на виході випрямляча чотирикміркового перетворювача

Габаритна потужність трансформатора визначається відносно ККД трансформатора, а також значень діючого струму і напруги навантаження, які є максимальними при мінімальному коефіцієнті заповнення:

$$P_2 = \frac{U_{\text{вих}} I_{\text{вих max}}}{\gamma_{\text{min}} \eta_{TV}} \quad (2)$$

Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$n = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{ex min}} \cdot \gamma_{\text{max}}} \quad (3)$$

Добуток площ фериту на площу вікна:

$$S_{\text{фер}} S_{\text{с}} = \frac{10^2 P_2}{2k_{\text{ф}} f B k_{\text{с}}}, \quad (4)$$

де  $k_{\text{ф}}$  – коефіцієнт заповнення феритом,  $f$  – робоча частота,  $j$  – щільність струму в обмотці,  $B$  – індукція в осерді,  $k_{\text{с}}$  – коефіцієнт заповнення вікна.

Згідно з отриманим значення обирається осердя і розраховується кількість витків первинної  $W_1$  і вторинної  $W_2$  обмоток і діаметри їх провідників  $d_1$  і  $d_2$  відповідно:

$$W_1 = \frac{U_{\text{ex max}} 10^4}{4k_{\text{ф}} B f S_{\text{фер}}}; W_2 = n W_1; \quad (5)$$

$$d_1 = 1.13 \sqrt{\frac{P}{\eta U_{\text{max}} \sqrt{\gamma_{\text{min}} j}}}; \quad (6)$$

$$d_2 = 1.13 \frac{1}{n} \sqrt{\frac{P}{U_{\text{max}} \sqrt{\gamma_{\text{min}} j}}}, \quad (7)$$

де  $P$  – потужність перетворювача.

Індуктивність розсіювання трансформатора:

$$L_{\text{lk}} = \frac{n^2 \cdot U_{\text{вих}}^2 \cdot \gamma_{\text{max}}}{8 \cdot P \cdot f}. \quad (8)$$

Піковий струм перемикання транзисторів на вторинній стороні:

$$I_{\text{pswitch}} = \frac{n^2 \cdot U_{\text{вих}}}{2 \cdot L_{\text{lk}} \cdot f} \cdot \gamma_{\text{max}}. \quad (9)$$

Піковий струм перемикання транзисторів на первинній стороні:

$$I_{\text{dswitch}} = \frac{n^3 \cdot U_{\text{вих}}^2}{2 \cdot L_{\text{lk}} \cdot f \cdot U_{\text{ex max}}} \cdot \gamma_{\text{max}}. \quad (10)$$

Для визначення параметрів згладжувального фільтра необхідно задатися коефіцієнтом згладжування:

$$K_3 = \frac{K_{\text{пвх}}}{K_{\text{пвих}}}, \quad (10)$$

де  $K_{\text{пвх}}$  – коефіцієнт пульсацій на вході фільтра,  $K_{\text{пвих}}$  – коефіцієнт пульсацій на його виході.

Величина індуктивності фільтра визначається з умови забезпечення безперервності струму в дроселі.

$$L \geq \frac{K_{\text{пвих max}} \cdot R_d}{\omega}. \quad (11)$$

Коефіцієнт згладжування і габарити фільтра пов'язані співвідношенням:

$$K_3 = \omega^2 \cdot L \cdot C - 1. \quad (12)$$

Водночас обирати ємність та індуктивність потрібно так, щоб хвильовий опір індуктивності був



більшим, а хвильовий опір ємності – меншим ніж опір навантаження, резонансна частота – меншою ніж робоча частота.

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (13)$$

### Моделювання перетворювача в середовищі Matlab Simulink

Для оцінки технічних показників ефективності використання модульного перетворювача в середовищі Matlab Simulink створено модель перетворювача (рис. 5). Параметри перетворювача  $E1 = 220$  В,  $E2 = 220$  В. Модель транзистора створено на основі транзистора SPW21N50C3 [15] з параметрами: опір відкритого каналу транзистора  $R_{on} = 0.19$  Ом, напруга стік-витік  $U_{DS} = 560$  В, ємність переходу стік-витік  $C_{DS} = 1.2$  нФ.

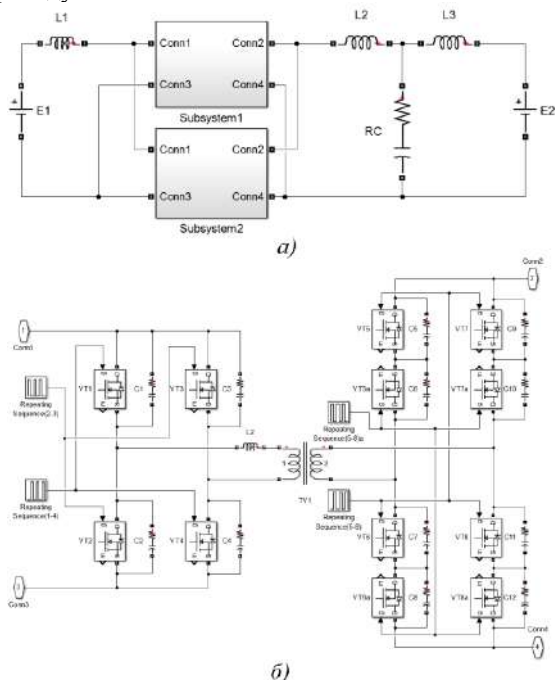


Рис. 5 – Модель перетворювача в середовищі Matlab Simulink а) схема двомодульного перетворювача, б) схема одного модуля

Залежність коефіцієнта пульсацій  $K_n$  від кількості комірок  $m$  при сталих габаритах фільтра наведена в табл. 2, а залежність габаритів фільтра від кількості комірок  $m$  при сталому значенні коефіцієнта пульсацій  $K_n = 0.072$  наведена в табл. 3.

Таблиця 2 – Залежність пульсацій від кількості комірок при сталих габаритах фільтра

| m | $K_n$  |
|---|--------|
| 1 | 0.072  |
| 2 | 0.0047 |
| 3 | 0.0008 |
| 4 | 0.0002 |

Таблиця 3 – Залежність габаритів фільтра від кількості комірок  $m$  при сталому коефіцієнті пульсацій на виході

| m | L        | C       |
|---|----------|---------|
| 1 | 7 мГн    | 3.02 нФ |
| 2 | 1.9 мГн  | 0.82 нФ |
| 3 | 696 мкГн | 0.3 нФ  |
| 4 | 0        | 5       |

На рис. 6 представлені осцилограми вхідного струму джерела змінної напруги, що встановлено замість джерела постійної напруги  $E2$ .

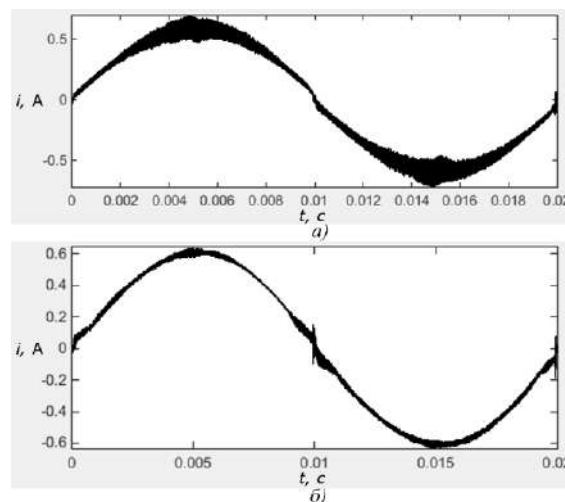


Рис. 6 – Діаграма вхідного струму джерела синусоїдальної напруги а) одномодульного перетворювача, б) двомодульного перетворювача

Коефіцієнт нелінійних спотворень струму в одномодульному перетворювачі складає  $THD = 9.48\%$ , а в двомодульному  $THD = 4.29\%$ . Отже зі збільшення кількості комірок форма струму покращується.

### Висновки

У статті запропоновано підхід до побудови двонаправленого перетворювача на основі використання кількох однотипних модулів, струми яких зсунуті за фазою один відносно одного. Обрано найефективніший для поставленої задачі тип з'єднання – паралельно по входу і по виходу, що дозволяє розподілити між модулями вхідний і вихідний струми. Представлені розрахунки однієї комірки перетворювача та шляхом моделювання в програмному середовищі Matlab Simulink порівняні коефіцієнти пульсації при різній кількості комірок. Результати моделювання показали, що зі збільшенням кількості комірок коефіцієнт пульсацій на виході перетворювача зменшується, а, отже, використання модульної топології перетворювача є ефективним.

## Подяка

Наукові дослідження, висвітлені у статті, виконані в рамках науково-дослідної теми № 0120U102131, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

## Список літератури

- White C. D., Zhang K. M. Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction. *J. Power Sources*. 2011. № 196. P. 3972–3980. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.010.
- Zhou Y., Li X. Vehicle to Grid Technology: A Review. *34th Chinese Control Conference*. 2015. P. 9031–9036. doi:10.1109/chicc.2015.7261068.
- Weise N. D., Mohapatra K. K., Mohan N. Universal utility interface for plug-in hybrid electric vehicles with vehicle-to-grid functionality. *2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. P. 1–8. doi:10.1109/PES.2010.5589710.
- Alonso A. R., Sebastian J., Lamar D. G., Hernando M. M., Vazquez A. An overall study of a dual active bridge for bidirectional dc/dc conversion. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. P. 1129–1135. doi:10.1109/ECCCE.2010.5617847.
- Xie Y., Sun J., Freudenberg J. S. Power flow characterization of a bidirectional galvanically isolated high-power DC/DC converter over a wide operating range. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010. № 25 (1). P. 54–66. doi:10.1109/TPEL.2009.2024151.
- Weise N. D., Castelino G., Basu K., Mohan N. A single-stage dual-active-bridge-based soft switched AC-DC converter with open-loop power factor correction and other advanced features. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. № 29 (8). P. 4007–4016. doi:10.1109/TPEL.2013.2293112.
- Zumel P., Ortega L., Lazaro A., Fernandez C., Barrado A., Rodriguez A. Modular dual-active bridge converter architecture. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. № 52 (3). P. 2444–2455. doi:10.1109/TIA.2016.2527723.
- Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding. *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga. 2017. P. 1–6. doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.
- Verbytskyi Ievgen, Bondarenko Oleksandr, Kaloshyn Oleksandr. Multicell-type charger for supercapacitors with power factor correction. *Young Engineers Forum (YEF-ECE)*. Costa da Caparica. Portugal. 2018. P. 91–96. doi:10.1109/YEF-ECE.2018.8368945.
- Бондаренко О. Ф., Бондаренко Ю. В., Сафронов П. С., Калошин О. О. Проблеми оцінки надійності перетворювачів з модульною топологією. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2017. Вип. 27 (1249). С. 238–243.
- Hu T., Khan M. M., Xu K., Zhou L., Rana A. Design of an input-parallel output-parallel multi-module dc-dc converter using a ring communication structure. *J. Power Electron*. 2015. № 15. P. 886–898. doi:10.6113/JPE.2015.15.4.886
- Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D., Vinnikov D., Galkin I. Modular Battery Charger for Light Electric Vehicles. *Energies*. 2020. №13 (4). P. 774. doi:10.3390/en13040774
- Wang Y., Wang F., Lin Y., Hao T. Sensorless parameter estimation and current-sharing strategy in two-phase and multiphase IPOD DAB DC–DC converters. *IET Power Electronics*. 2018. № 11 (6). P. 1135–1142. doi:10.1049/iet-pel.2017.0860.
- Tseng K.-C., Huang C.-C. High Step-Up High-Efficiency Interleaved Converter With Voltage Multiplier Module for Renewable Energy System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014. 61(3). P. 1311–1319. doi:10.1109/tie.2013.2261036.
- Infineon Technologies AG, “Cool MOS Power Transistor” SPW21N50C3 datasheet. 2008. URL: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-SPW21N50C3-DS-v02\\_05-en.pdf?fileId=db3a304412b407950112b42cf60a47dc](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-SPW21N50C3-DS-v02_05-en.pdf?fileId=db3a304412b407950112b42cf60a47dc) (дата звернення: 12.11.2020).

## References (transliterated)

- White C. D., Zhang K. M. Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction. *J. Power Sources*, 2011, no. 196, pp. 3972–3980, doi:10.1016/j.jpowsour.2010.11.010.
- Zhou Y., Li X. Vehicle to Grid Technology: A Review. *34th Chinese Control Conference*, 2015, pp. 9031–9036, doi:10.1109/chicc.2015.7261068.
- Weise N. D., Mohapatra K. K., Mohan N. Universal utility interface for plug-in hybrid electric vehicles with vehicle-to-grid functionality. *2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8, doi:10.1109/PES.2010.5589710.
- Alonso A. R., Sebastian J., Lamar D. G., Hernando M. M., Vazquez A. An overall study of a dual active bridge for bidirectional dc/dc conversion. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 1129–1135, doi:10.1109/ECCCE.2010.5617847.
- Xie Y., Sun J., Freudenberg J. S. Power flow characterization of a bidirectional galvanically isolated high-power DC/DC converter over a wide operating range. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, no. 25 (1), pp. 54–66, doi:10.1109/TPEL.2009.2024151.
- Weise N. D., Castelino G., Basu K., Mohan N. A single-stage dual-active-bridge-based soft switched AC-DC converter with open-loop power factor correction and other advanced features. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, no. 29 (8), pp. 4007–4016, doi:10.1109/TPEL.2013.2293112.
- Zumel P., Ortega L., Lazaro A., Fernandez C., Barrado A., Rodriguez A. Modular dual-active bridge converter architecture, 2015, no. 52 (3), pp. 2444–2455, doi:10.1109/TIA.2016.2527723.
- Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding. *2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, 2017, pp. 1–6, doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.
- Verbytskyi Ievgen, Bondarenko Oleksandr, Kaloshyn Oleksandr. Multicell-type charger for supercapacitors with power factor correction. *Young Engineers Forum (YEF-ECE)*, Costa da Caparica, Portugal, 2018, pp. 91–96, doi:10.1109/YEF-ECE.2018.8368945.
- Bondarenko O. F., Bondarenko Yu. V., Safronov P. S., Kaloshyn O. O. Problemy ocinky nadijnosti peretvoryuvachiv z modul'noy topologiyeyu [Problems of estimating the reliability of converters with modular

- topology]. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, no. 27 (1249), pp. 238–243.
11. Hu T., Khan M. M., Xu K., Zhou L., Rana A. Design of an input-parallel output-parallel multi-module dc-dc converter using a ring communication structure. *J. Power Electron.*, 2015, no. 15, pp. 886–898, doi:10.6113/JPE.2015.15.4.886
  12. Blinov A., Verbitskiy I., Zinchenko D., Vinnikov D., Galkin I. Modular Battery Charger for Light Electric Vehicles. *Energies*, 2020, no.13 (4), pp. 774, doi:10.3390/en13040774
  13. Wang Y., Wang F., Lin Y., Hao T. Sensorless parameter estimation and current-sharing strategy in two-phase and multiphase IPOD DAB DC–DC converters. *IET Power Electronics*, 2018, no. 11 (6), pp. 1135–1142, doi: 10.1049/iet-pel.2017.0860.
  14. Tseng, K.-C., Huang, C.-C. High Step-Up High-Efficiency Interleaved Converter With Voltage Multiplier Module for Renewable Energy System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, no. 61 (3), pp. 1311–1319, doi: 10.1109/tie.2013.2261036.
  15. Infineon Technologies AG, "Cool MOS Power Transistor" SPW21N50C3 datasheet, 2008, Available at: [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-SPW21N50C3-DS-v02\\_05-en.pdf?fileId=db3a304412b407950112b42cf60a47dc](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-SPW21N50C3-DS-v02_05-en.pdf?fileId=db3a304412b407950112b42cf60a47dc) (accessed: 12.11.2020).

#### Відомості про авторів (About authors)

**Вербицький Євген Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри електронних пристроїв та систем, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: [verbitskiy@bigmir.net](mailto:verbitskiy@bigmir.net).

**Ievgen Verbitskiy** – Candidate of Technical Sciences, associate professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", associate professor at the Department of Electronic Devices and Systems, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: [verbitskiy@bigmir.net](mailto:verbitskiy@bigmir.net).

**Гарницький Андрій Вікторович** – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра електронних пристроїв та систем, Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-0978-1694; e-mail: [andrij.garnytskiy@gmail.com](mailto:andrij.garnytskiy@gmail.com).

**Andrii Harnytskyi** – student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of Electronic Devices and Systems, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0978-1694; e-mail: [andrij.garnytskiy@gmail.com](mailto:andrij.garnytskiy@gmail.com)

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Вербицький Є. В., Гарницький А. В. Модульний зарядний пристрій акумулятора електромобіля з двостороннім передаванням енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 22–27. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.03.

*Please cite this article as:*

Verbitskiy I., Harnytskyi A. Modular electric vehicle battery charger with bidirectional power flow. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 22–27, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.03.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Вербицкий Е. В., Гарницкий А. В. Модульное зарядное устройство аккумулятора электромобиля с двусторонней передачей энергии. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 22–27. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.03.

**АННОТАЦІЯ** Описані перспективи використання акумуляторних батарей електромобілей в якості регуляторів мережі або резервних джерел живлення згідно концепцій V2G (Vehicle to Grid) і G2V (Grid to Vehicle). Визначені вимоги, яким повинні відповідати двонаправлені перетворювачі електроенергії: широкий діапазон параметрів вхідного напруги, корекція коефіцієнта потужності вхідного струму, вибір максимальної потужності від відновлюваних джерел енергії, висока енергетична ефективність. Вибрана топологія двонаправленого ізолюваного перетворювача з двома активними мостами, що підтримує м'яку комутацію транзисторів при нульовому напрузі і запропонований модульний підхід до побудови перетворювача. Даний підхід має ряд переваг, серед них: забезпечення будь-яких значень напруги або струму, зниження пульсацій, підвищення коефіцієнта корисної дії схеми, висока надійність, завдяки можливості включення резервних модулів, які можуть замінити основні в разі їх відмови, зменшені габарити реактивних елементів і можливість роботи кожної ячейки на більш високих частотах. Вибрано найефективніший для поставленої задачі тип з'єднання ячеек – паралельно по входу і по виходу, що дозволяє розподілити між модулями вхідний і вихідний струм. Представлено розрахунок однієї ячейки перетворювача, а саме: розрахунок високочастотного трансформатора, транзисторів і згладжуючого LC-фільтра і проведено порівняльний аналіз технічних показників в одній і багатьох модульних перетворювачах. Проведено моделювання в програмній середі Matlab Simulink, оцінено ефект від використання модульного перетворювача при роботі з джерелами постійного і змінного напруги, в частині проведено порівняння коефіцієнтів пульсації в перетворювачах з різною кількістю ячеек при постійному значенні габаритів згладжуючого фільтра, а також подобрано параметри фільтра для різного числа ячеек, при яких забезпечується однаковий коефіцієнт пульсацій. Результати моделювання підтвердили правильність розрахунків і довели ефективність використання модульної топології перетворювача.

**Ключові слова:** зарядне пристрій електромобіля; концепція Vehicle to Grid; модульний перетворювач

Надійшло (received) 24.11.2020

УДК 621.89: 621.762: 621.822

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.04

## ВПЛИВ ВМІСТУ МАРГАНЦЮ НА КІЛЬКІСТЬ ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНИТУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АДИ ПІСЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ІЗОТЕРМІЧНОГО ГАРТУВАННЯ

**К. О. ГОГАЄВ<sup>1</sup>, Ю. М. ПОДРЕЗОВ<sup>2</sup>, С. М. ВОЛОЩЕНКО<sup>1</sup>, М. Г. АСКЕРОВ<sup>1\*</sup>,  
М. В. МІНАКОВ<sup>2</sup>, Ю. Ф. ЛУГОВСЬКИЙ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>відділ № 10, ІПМ НАН України, Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup>відділ № 08, ІПМ НАН України, Київ, УКРАЇНА

<sup>3</sup>відділ № 59, ІПМ НАН України, Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: mukafatask@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Досліджено вплив вмісту марганцю на фазовий склад та механічні властивості АДИ матеріалів після ізотермічного загартування в діапазоні температур 310 -380 °С. Результати рентгеноструктурних досліджень показали, що за цих умов гартування вміст мартенситної фази збільшується з підвищенням температури гартування. Встановлено, що збільшення вмісту марганцю сприяє збільшенню кількості залишкового аустеніту за однакових умов гартування. Це сприяє посиленню дії TRIP ефекту на процеси зміцнення. Показано, що при однакових умовах гартування вищу границю плинності мають АДИ з малим вмістом Mn, тоді, як твердість вища у зразків з великим вмістом. Різна чутливість цих характеристик зміцнення до вмісту Mn пояснюється посиленням дії TRIP ефекту на швидкість зміцнення на початковій ділянці кривої навантаження в матеріалах з високим вмістом марганцю. Наслідком цього є підвищений рівень твердості в матеріалах з більш високим вмістом марганцю. Натомість, такі матеріали демонструють більш низькі механічні характеристики, які визначаються в момент руйнування. Деформація до руйнування та ударна в'язкість зменшуються практично вдвічі через окрихчуючу дію цього елементу. Вплив марганцю на границю втоми мени суттєвий, оскільки схильність до окрихчення компенсується фазовими перетвореннями в голові тріщини, яке сприяє виникненню стискаючих напружень біля вершини тріщини, і стримує її розповсюдження при втомі. Зважаючи на те, що марганець посилює дію TRIP ефекту але погіршує опір руйнуванню, в роботі пропонується використовувати чавун з підвищеним вмістом Mn у виробках землекороблювальної техніки, які працюють в умовах зношування але не піддаються екстремальним навантаженням.

**Ключові слова:** АДИ матеріали; легування марганцем ізотермічна гарт; TRIP ефект; залишковий аустеніт; мартенсит; механічні властивості

## INFLUENCE OF MANGANESE CONTENT ON THE AMOUNT OF RESIDUAL AUSTENITE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ADI AFTER DIFFERENT MODES OF ISOTHERMAL HARDENING

**K. GOGAEV<sup>1</sup>, Y. PODREZOV<sup>2</sup>, S. VOLOSCHENKO<sup>1</sup>, M. ASKEROV<sup>1</sup>, M. MINAKOV<sup>2</sup>,  
Yu. LUGOVSKIY<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Department № 10, IPMS NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup>Department № 08, IPMS NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

<sup>3</sup>Department № 59, IPMS NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The influence of manganese content on the phase composition and mechanical properties of ADI materials after isothermal quenching at temperatures of 310 -380 °C is investigated. The results of X-ray diffraction studies have shown that under these quenching conditions, the content of the martensitic phase increases with an increase in the quenching temperature. It was found that increasing the manganese content increases the amount of residual austenite under the same quenching conditions. This enhances the effect of TRIP on the strengthening process. The consequence is increased level of strengthening in materials with a higher manganese content. It is shown that under the same quenching conditions, ADI with a low Mn content has the highest yield strength, while the hardness is higher for samples with a high content. The different sensitivity of these hardening characteristics to the Mn content is explained by the increased influence of the TRIP effect on the hardening rate at the initial interval of loading curves in materials with higher manganese content. Instead, such materials exhibit lower mechanical properties, which are determined at failure. Deformation and impact strength are reduced by half due to the embrittlement action of this element. The effect of manganese on the fatigue is less significant, because the tendency to embrittlement is compensated by phase transformations in the crack tip, which create compressive stresses at the crack tip and inhibits its spread during fatigue. Due to the fact that

*manganese enhances the TRIP effect but impairs the resistance to fracture, it is proposed to use ADI with high Mn content in tillage products that operate in conditions of wear but are not exposed to extreme loads.*

**Keywords:** ADI materials; manganese alloying; isothermal hardening; TRIP effect; retained austenite; martensite; mechanical properties

### Вступ

Мартенситні фазові перетворення під дією деформації в останні роки привертають особливу увагу матеріалознавців. На пружній ділянці навантаження перетворення аустенітної фази в мартенситну (stress induced martensite) використовується для створення нових класів надпружних матеріалів, які мають великий попит в медичній галузі [1,2]. Перетворення під дією пластичної деформації, яке найчастіше реалізується в сталях та чавунах, отримало назву TRIP (transformation induce plasticity) ефект. Зазначені особливості структурних перебудов при деформації в сталях використовуються для покращення технології виготовлення виробів автомобільної промисловості [3-5]. В ADI (austempered ductile iron) чавунах цей ефект реалізується, безпосередньо в процесі експлуатації виробів, що піддаються деформації в умовах силових навантажень (особливо це стосується елементів конструкцій, що працюють на зношування) [6,7].

Головною умовою реалізації TRIP – ефекту є наявність залишкового аустеніту, а продуктивність його дії визначається часткою мартенситу, що утворився в наслідок перетворення. Серед факторів, які впливають на кількісні та якісні показники перетворення зазвичай виділяють: температуру ізотермічного гартування [6,7], ступень пластичної деформації [7-9], положення мартенситних точок відносно температури гартування та температури деформації [8-9], а також температуру аустенізації [10] та розмір зерна аустеніту [10]. Безумовно, запорукою успішного використання цього ефекту в великій мірі є вдалий вибір складу чавуну. Розроблені за декілька десятиріч базові принципи структуроутворення дозволили регламентувати вміст найбільш важливих елементів в ADI [6,7]. Проте, зростаюча зацікавленість в цьому матеріалі, яка сприяє розширенню спектру його використання, мотивує подальшу модернізацію складу шляхом легування.

Серед елементів, які найбільше впливають на мартенситне перетворення в сплавах заліза, окрім вуглеці, чий вплив найбільший, зазвичай виділяють Mn та Ni. Ці елементи впливають на мартенситні точки значно сильніше, ніж інші метали [11]. В TRIP-assisted сталях [4,5] залишковий аустеніт стабілізується марганцем. Існують сталі з: малим - до 2%, середнім –до 10% або великим –до 22% вмістом Mn. В чавунах за наявності великої кількості вуглецю, великий вміст стабілізатора аустеніту не потрібен. Але, зважаючи на можливість додаткового покращення властивостей, в декількох дослідженнях

[8,9] вивчали вплив додаткового легування ADI нікелем.

Стосовно марганцю серед дослідників до останнього часу існував певний песимізм [10]. Підвищення вмісту Mn сприяє його сегрегації на границях, посилює карбідоутворення та робить аустеніт нестійким. Кінцевим ефектом є погіршення механічних властивостей та погана оброблюваність. Проте, в декількох роботах київської наукової школи [11] відзначається позитивний вплив марганцю на властивості високоміцного чавуну. Враховуючи, що Mn є елементом, який має сильний вплив на загартованість, за певних умов експлуатації, зазначені вище недоліки можливо компенсувати перевагами в реалізації TRIP ефекту.

### Мета роботи

Мета досліджень: дослідження впливу вмісту марганцю на кількість залишкового аустеніту та механічні властивості ADI після різних режимів ізотермічного гартування.

### Матеріал і методика

Дослідження проводилися на зразках чавуну (3,44% C; 2,62% Si; 0,024 Cr; 0,54% Cu; 0,71% Ni) з різним вмістом Mn: 0,73% та 0,24. Куляста форма графіту була отримана за рахунок застосування модифікатора, який складався з 7,5% Mg, 35% СК25, 17% Al. Структура чавуну створювалася в результаті аустенізуючого відпалу при 900 ° C з витримкою протягом 30 хв та подальшого ізотермічного загартування в рідкому олові при температурах 310, 330, 350, 380 °C для зразків з великим вмістом марганцю та при 350, 370 °C для зразків з малим вмістом. На зразках, отриманих за різних режимів термообробки, за допомогою рентгенівського аналізу на ДРОН 3М було визначено вміст залишкового аустеніту а також проведений комплекс досліджень механічних властивостей. Випробування на розтягування виконувалися на випробувальній машині UTS - 100, вимірювання твердості, НВ, методом Брінелля за стандартною методикою, ударної в'язкості на копрі КД-300 Опір втомі,  $\sigma_{-1}$ , при консольному вигині на частоті 2 кГц проводили за методикою та на обладнанні, описаному в роботі на кількості коливань  $N = 10^7$  [13].

### Результати експериментів

Фазовий склад та механічні властивості ADI, що містять різну кількість Mn, наведені в табл. 1. Спостерігається збільшення вмісту залишкового аустеніту з підвищенням температури гартування.

Така поведінка визначається особливостями перерозподілу фериту та аустеніту під час гартування. Саме такий характер впливу умов гартування зазвичай спостерігається в експериментах [6-9]. Кількість аустеніту залежить від вмісту легуючих елементів в ADI. Зокрема, в роботі [9] показано, що збільшення вмісту Ni сприяє збільшенню вмісту залишкового аустеніту за однакових умов гартування. Така сама тенденція спостерігається в наших експериментах при зміні вмісту Mn. При цьому вплив марганцю потужніший, при перерахунку на відсоток легуючого елементу. Це і не дивно, адже цей елемент

більш сильно знижує мартенситну точку та більш сильно стабілізує аустеніт [10].

На ці особливості перерозподілу фаз слід звернути увагу при аналізі механічної поведінки досліджених матеріалів. Як зазначалось в попередніх публікаціях [14,15], температура ізотермічного гартування характерним чином впливає на комплекс механічних властивостей: границя плинності та твердість зменшуються з температурою, тоді, як пластичність ударна в'язкість – зменшуються. З табл. 1 видно, що такі закономірності зберігаються незалежно від складу, але кількісні значення цих характеристик в великій мірі залежать від вмісту Mn.

Таблиця 1 – Фазовий склад та механічні властивості ADI з різним вмістом Mn

| T <sub>із витр.</sub> , °C | Mn    | Аустеніт | $\sigma_{02}$ | $\sigma_m$ | $\delta$ | HB  | КС                 | H/ $\sigma_{02}$ | $\sigma_{-1}$ |
|----------------------------|-------|----------|---------------|------------|----------|-----|--------------------|------------------|---------------|
|                            | % ваг | % об.    | МПа           | МПа        | %        |     | Дж/см <sup>2</sup> |                  | МПа           |
| 310                        | 0,78  | 34,65    | 910           | 1237       | 3,4      | 397 | 51,5               | 0,436            | 280           |
| 330                        | 0,78  | 42,67    | 824           | 1116       | 2,8      | 345 | 45                 | 0,419            | 470           |
| 350                        | 0,78  | 43,88    | 751           | 1041       | 3,2      | 347 | 55                 | 0,462            | -             |
| 380                        | 0,78  | 46,59    | 673           | 880        | 3,8      | 323 | 90                 | 0,480            | -             |
| 350                        | 0,24  | 37,52    | 847           | 1124       | 6,8      | 327 | 85                 | 0,385            | 540           |
| 370                        | 0,24  | 38,68    | 757           | 1057       | 9,0      | 312 | 125                | 0,415            | 510           |

Аналіз результатів свідчить про те, що чутливим до вмісту марганцю виявляють, перш за все проявляють, так звані, граничні механічні характеристики, тобто ті, що визначаються в момент руйнування – це деформація до руйнування, ударна в'язкість та характеристика  $\sigma_{-1}$ , що визначає опір втомі. Перші дві характеристики зменшуються практично вдвічі при збільшенні вмісту Mn, що можна пояснити окрихчючою дією цього елементу [10]. Вплив марганцю на границю втоми менш суттєвий, оскільки негативний вплив структурних факторів, які сприяють окрихченню компенсується фазовими перетвореннями в голові тріщини, що стримує її розповсюдження при втомі. Очевидно, що ця захисна дія збільшується при посиленні TRIP ефекту.

Несподіваний і не логічний, на перший погляд, результат дає порівняльний аналіз значень границі плинності та твердості зразків, що загартовані при однаковій температурі, але мають різний вміст Mn. Отримані результати протирічать твердженню, що між твердістю та границею плинності існує не тільки якісний, але і кількісний зв'язок. З даних табл. 1 видно, що вищу границю плинності мають ADI з малим вмістом Mn тоді, як твердість вища у зразків з великим вмістом. Така невідповідність пояснюється з урахуванням сучасних уявлень про особливості пластичної деформації в області індентора, з яких випливає, що середня деформація в області відбитку твердості дорівнює 8% [16]. Тому фізично

обґрунтований кількісний зв'язок існує між твердістю та деформаційним напруженням, яке вимірюється при 8% деформації. В розглянутому вище випадку це означає, що при великому вмісті Mn швидкість деформаційного зміцнення в області деформацій від 0 до 8% значно вища, ніж при малому. При аналізі механізмів зміцнення чавунів неодноразово [7,14,15] наголошувалось на визначальну роль TRIP ефекту в підвищенні швидкості зміцнення ADI.

Таким чином збільшення вмісту залишкового аустеніту збільшує кількість утвореного при деформації мартенситу, а це, в свою чергу, значно збільшує швидкість зміцнення. Сучасні уявлення про позитивний вплив TRIP ефекту на зношування виробів з ADI базуються на уявленнях про різке зміцнення поверхневого шару за рахунок фазових перетворень в області контактів, що робить привабливим використання чавуна з великим вмістом Mn у виробках, які не піддаються екстремальним навантаженням.

### Висновки

Збільшення вмісту марганцю сприяє збільшенню вмісту залишкового аустеніту за однакових умов гартування. Цей вплив є більш потужним, ніж вплив нікелю.

Деформація до руйнування та ударна в'язкість при збільшенні вмісту Mn зменшуються практично вдвічі, що можна пояснити окрихчючою дією цього

елементу. Вплив марганцю на опір втомі менш суттєвий, оскільки негативний вплив структурних факторів, які сприяють окрихченню компенсується фазовими перетвореннями в голові тріщини, що стримує її розповсюдження при втомі.

При однакових умовах гартування вищу границю плинності мають ADI з малим вмістом Mn, тоді, як твердість вища у зразків з великим вмістом. Різна чутливість цих характеристик зміцнення до вмісту Mn пояснюється посиленням дії TRIP ефекту на швидкість зміцнення на початковій ділянці навантаження в матеріалах з високим вмістом марганцю.

#### Список літератури

1. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*. 2005. Vol. 50. P. 511–678. doi: 10.1016/j.pmatsci.2004.10.001.
2. Ramarolahy A., Castany Philippe, Prima F., Laheurte P., Péron Isabelle, et al. Microstructure and mechanical behavior of superelastic Ti-24Nb-0.5O and Ti-24Nb-0.5N biomedical alloys. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2012. 9. P. 83–90. doi: 10.1016/j.jmbbm.2012.01.017.
3. Blondé R., Jimenez-Melero E., Zhao L., Wright J. P., Brück E., Van der Zwaag S., van Dijk N. H. Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading. *Materials Science & Engineering*. 2014. A618. P. 280–287. doi: 10.1016/j.msea.2014.09.008.
4. DeMoor E., Gibbs P. J., Speer J. G., Matlock D. K. Strategies for third generation advanced high strength steel development. *AIST Trans*. 2010. 7. P. 133–144.
5. Lee K. Y. Tensile properties of different chemical compositions for TRIP-assisted multiphase steel for automobile structures. *Int. J. Automot. Technol.* 2008. 9. P. 87–93. doi: 10.1007/s12239-008-0011-z.
6. Гогаєв К. О., Подрезов Ю. М., Волощенко С. М. Новые области использования высокопрочных чугунов. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. Т.1. Редкол.: Лабанов та ін; НАН України. К.: Академпер., 2018. 652с.
7. Adel Nofal. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*. 2013. Vol. 2. Issue 1. P. 1–18
8. Saal P., Meier L., Li X. H., Hofmann M., Hoelzel M., Wagner J. N. and Volk W. In Situ Study of the Influence of Nickel on the Phase Transformation Kinetics in Austempered Ductile Iron. *Metall. Mater. Trans. A*. 2016. Vol. 47. P. 661–671. doi: 10.1007/s11661-015-3261-1.
9. Li X. H., Saal P., Gan W. M., Hoelzel M., Volk W., Petry W. and Hofmann M. Strain-Induced Martensitic Transformation Kinetic in Austempered Ductile Iron (ADI). *Metall. Mater. Trans. A*. 2017. doi:10.1007/s11661-017-4420-3.
10. Raghavan V. and Antia D. The driving force for martensitic transformations in low alloy steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1996. Vol. 27. no. 4. P. 1127–1132. doi: 10.1007/BF02649781.
11. Kowalski A., Biel-Golaska M. Shaping the Structure and Properties of ADI with High Mn Content through Changes in Chemical Composition and Heat Treatment. *Advanced*

- Materials Research*. 1997. Vol. 4-5. P. 259–268. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.4-5.259.
12. Бубликов В. Б., Ясинский А. А., Сыропоршнев Л. Н., Козак Д. С., Бачинский Ю. Д. Влияние содержания марганца и скорости охлаждения на кристаллизацию, структурообразование и механические свойства высокопрочного чугуна. *Процессы литья*. 2009. № 6. С. 28–34.
13. Луговойской Ю. Ф. Методика усталостных испытаний композиционных материалов при изгибе полученных электронно-лучевым испарением. *Проблемы спец. Электрометаллургии*. 1987. №4. С. 61–65.
14. Подрезов Ю. М., Волощенко С. М., Гогаєв К. О., Минаков М. В. Вплив температури ізоtermічного гартування на деформаційне зміцнення ADI. *Металознавство та обробка металів*. 2020. № 1. С.15–22.
15. Гогаєв К. А., Подрезов Ю. Н., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Минаков Н. В., Луговойской Ю. Ф. Анализ деформационного упрочнения ADI при температурах изотермической закалки. Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 1 (3). С. 3–8. doi:10.20998/2413-4295.2020.03.01.
16. Мильман Ю. Н., Галанов О. Н., Чугунова С. И., Гончарова И. В. Определение механических свойств малопластичных материалов методом индентирования. *Ceramics 50, Polish ceramic bulletin 12*. Краков: изд-во польской академии наук. 1996. С.95–102

#### References (transliterated)

1. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*, 2005, Vol. 50, pp. 511–678, doi: 10.1016/j.pmatsci.2004.10.001.
2. Ramarolahy A., Castany Philippe, Prima F., Laheurte P., Péron Isabelle, et al. Microstructure and mechanical behavior of superelastic Ti-24Nb-0.5O and Ti-24Nb-0.5N biomedical alloys. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2012, 9, pp. 83–90, doi: 10.1016/j.jmbbm.2012.01.017.
3. Blondé R., Jimenez-Melero E., Zhao L., Wright J. P., Brück E., Van der Zwaag S., van Dijk N. H. Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading. *Materials Science & Engineering*, 2014, A618, pp. 280–287, doi: 10.1016/j.msea.2014.09.008.
4. DeMoor E., Gibbs P. J., Speer J. G., Matlock D. K. Strategies for third generation advanced high strength steel development. *AIST Trans*, 2010, 7, pp. 133–144.
5. Lee K. Y. Tensile properties of different chemical compositions for TRIP-assisted multiphase steel for automobile structures. *Int. J. Automot. Technol.*, 2008, 9, pp. 87–93, doi: 10.1007/s12239-008-0011-z.
6. Gogaev K. O., Podrezov Yu. M., Voloshchenko S. M. Novie oblasti ispolzovaniya vysokoprochnykh chuhunov. *Nauka pro materialy: dosiagnennia ta perspektyvy*, Vol. 1. Redkol. Labanov ta in; NAN Ukrainy. K., Akademper., 2018. 652 p.
7. Adel Nofal. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*, 2013, Vol. 2, Issue 1, pp. 1–18
8. Saal P., Meier L., Li X. H., Hofmann M., Hoelzel M., Wagner J. N. and Volk W. In Situ Study of the Influence of Nickel on the Phase Transformation Kinetics in

- Austempered Ductile Iron. *Metall. Mater. Trans. A*, 2016, Vol. 47, pp. 661-671, doi: 10.1007/s11661-015-3261-1.
9. Li X. H., Saal P., Gan W. M., Hoelzel M., Volk W., Petry W. and Hofmann M. Strain-Induced Martensitic Transformation Kinetic in Austempered Ductile Iron (ADI). *Metall. Mater. Trans. A*, 2017, doi:10.1007/s11661-017-4420-3.
10. Raghavan V. and Antia D. The driving force for martensitic transformations in low alloy steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, Vol. 27, no. 4, pp. 1127–1132, doi: 10.1007/BF02649781.
11. Kowalski A., Biel-Golaska M. Shaping the Structure and Properties of ADI with High Mn Content through Changes in Chemical Composition and Heat Treatment. *Advanced Materials Research*, 1997, Vol. 4-5, pp. 259-268, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.4-5.259.
12. Bublykov V. B., Yasynskiy A. A., Syroporshnev L. N., Kozak D. S., Bachynskiy Yu. D. Vliyanye soderzhaniya margantsa i skorosti ohlazhdeniya na krystallyzatsiyu, strukturoobrazovanie y mekhanicheskie svoystva vysokoprochnogo chuhuna. *Protsessi lytia*, 2009, 6, pp. 28-34.
13. Luhovskiy Yu. F. Metodika ustalostnykh ispytaniy kompozitsyonykh materialov pri izghibe poluchenykh elektronno-luchevym ispareniem. *Problemy spets. Elektrometallurhiy*, 1987, 4, pp. 61–65.
14. Podrezov Yu. M., Voloshchenko S. M., Gogaev K. O., Minakov M. V. Vpliv temperatury izotermichnoho gartuvania na deformatsiine zmitsnenia ADI. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2020, 1, pp. 15-22.
15. Gogaev K., Podrezov Y., Voloshchenko S., Askerov M., Minakov N., Lugovskoy Y. Analysis of strain hardening of ADI at isothermal hardening temperatures. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 1 (3), pp. 3–8, doi:10.20998/2413-4295.2020.03.01.
16. Mylman Yu. N., Halanov O. N., Chuhunova S. Y., Honcharova Y. V. Opredelenie mekhanicheskikh svoystv maloplastichnykh materialov metodom indentirovaniya. *Ceramics 50, Polish ceramic bulletin 12*. Krakov. Izd-vo polskoi akademii nauk, 1996, pp. 95-102.

## Відомості про авторів (About authors)

**Гогаєв Казбек Олександрович** - доктор технічних наук, професор, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, зав. відділом № 10 ІПМ НАН України, г. Київ, Україна; e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua

**Kazbek Gogaev** - doctor of technical, professor, Institute of Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, head. Department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua

**Волощенко Сергій Михайлович** – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, провідний науковий співробітник відділу №10 ІПМ НАН України, г. Київ, Україна; e-mail: volosch@ipms.kiev.ua

**Sergey Voloshchenko** - doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Leading Researcher, Division 10 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: volosch@ipms.kiev.ua

**Аскеров Мукафат Гейбат огли** - кандидат технічних наук, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, старший науковий співробітник відділу №10 ІПМ НАН України, г. Київ, Україна; e-mail: mukafatask@gmail.com

**Askerov Mukafat Geibat ogly**-candidate of technical sciences, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the department №10 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: mukafatask@gmail.com

**Подрезов Юрій Миколайович**-доктор ф.-м. наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, зав. відділу №8 ІПМ НАН України, г. Київ, Україна; e-mail: yupodrezov@ukr.net

**Yuriy Podrezov** - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, head. Department No. 8 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: yupodrezov@ukr.net

**Мінаков Микола Веніамінович** - кандидат технічних наук, Інститут проблем матеріалознавства НАН України, старший науковий співробітник відділу №8 ІПМ НАН України, г. Київ, Україна; e-mail: vbyfrjd86@gmail.com

**Mykola Minakov** - candidate of technical sciences, Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the department №8 of IPM of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: vbyfrjd86@gmail.com

**Луговський Юрій Федорович** - доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, відділ №59 ІПМ НАН України, м. Київ, Україна; e-mail: mukafatask@gmail.com

**Yuriy Lugovskiy** - doctor of technical sciences, provincial scientific researcher, of the department No. 59 IPM of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine; e-mail: mukafatask@gmail.com

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю таким чином:*

Гогаєв К. О., Подрезов Ю. М., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Мінаков М. В., Луговський Ю. Ф. Вплив вмісту марганцю на кількість залишкового аустеніту та механічні властивості ADI після різних режимів ізотермічного гартування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 28-33. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.04.



*Please refer to this article as follows:*

Gogaev K., Podrezov Y., Voloshchenko S., Askerov M., Minakov N., Lugovskoy Y. Influence of manganese content on the amount of residual austenite and mechanical properties of ADI after different modes of isothermal hardening. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 28-33, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.04.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Гогаев К. А., Подрезов Ю. Н., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Минаков Н. В., Луговской Ю. Ф. Влияние содержания марганца на количество остаточного аустенита и механические свойства ADI после различных режимов изотермической закалки. *Вестник Национального технического университета «ХПИ».* Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 28-33. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.04.

**АННОТАЦИЯ** Исследовано влияние содержания марганца на фазовый состав и механические свойства ADI материалов после изотермической закалки в диапазоне температур 310 -380 °С. Результаты рентгеноструктурных исследований показали, что при этих условиях закалки содержание мартенситной фазы увеличивается с повышением температуры закалки. Установлено, что увеличение содержания марганца способствует увеличению количества остаточного аустенита при одинаковых условиях закалки. Это способствует усилению действия TRIP эффекта на процессы упрочнения. Показано, что при одинаковых условиях закалки выший предел текучести имеют ADI с малым содержанием Mn, тогда как твердость выше у образцов с большим содержанием. Различная чувствительность этих характеристик упрочнения к содержанию Mn объясняется усилением действия TRIP эффекта на скорость упрочнения на начальном участке кривой нагружения в материалах с высоким содержанием марганца. Следствием этого является повышенный уровень твердости в материалах с более высоким содержанием марганца. Зато такие материалы демонстрируют более низкие механические характеристики, которые определяются в момент разрушения. Деформация до разрушения и ударная вязкость уменьшаются практически вдвое из-за охрупчивающего действия этого элемента. Влияние марганца на предел усталости менее существенный, поскольку склонность к охрупчиванию компенсируется фазовыми превращениями в вершине трещины, которое способствует возникновению сжимающих напряжений у вершины трещины и сдерживает ее распространения при усталости. Поскольку марганец усиливает действие TRIP эффекта, но ухудшает сопротивление разрушению, в работе предлагается использовать чугуны с повышенным содержанием Mn в изделия для почвообрабатывающей техники, которые работают в условиях износа, но не подвергаются экстремальным нагрузкам.

**Ключевые слова:** ADI материалы; легирование марганцем; изотермическая закалка; TRIP эффект; остаточный аустенит; мартенсит; механические свойства

*Надійшла (received) 01.01.2020*

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.05

## СИСТЕМА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТРОЛЕЙБУСА З ВИСОКОВОЛЬТНИМ АКУМУЛЯТОРОМ

І. А. МАРТЮХІН\*, Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ

Кафедра електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА

\* e-mail: margigoand@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Громадському транспорту у містах за останні роки приділяється більша увага задля підвищення комфорту життя в мегаполісах. Економічні та екологічні показники міст можна покращити за рахунок ефективного підключення ресурсів у сфері громадського транспорту та підвищення мобільності транспортних засобів. За останні два десятиліття у країнах, що розвиваються, спостерігається величезний приріст населення. Зростання чисельності населення спричинило зростання попиту на мобільність. Якщо транспортна інфраструктура не здатна задовольнити вимоги, це спричиняє збільшення тривалості очікування громадського транспорту та заторів на вулицях. Громадський транспорт може бути більш привабливим, забезпечуючи мобільність «від дверей до дверей», а розвиток транспортних послуг є важливим фактором для життя у мегаполісах. Стійкість транспорту, екологічні умови місцевості, охорона здоров'я та економічний стан мешканців можна підвищити шляхом переходу до більш мобільного громадського транспорту. Простими словами, мобільність за допомогою громадського транспорту надає можливість зменшити несприятливий вплив використання автомобілів на стан навколишнього середовища та здоров'я. Рівень мобільності міста можна покращити, забезпечивши добре організовану транспортну систему. Отже, доступність зупинок громадського транспорту, сполученість видів громадського транспорту та мобільність системи повинні розглядатися для забезпечення зручної для користувачів системи громадського транспорту. Тому в статті було розглянуто режими руху троллейбуса та на основі цих даних було запропоновано систему електроживлення з використанням акумуляторної батареї. Такий вид живлення транспортного засобу підвищить мобільність троллейбуса за рахунок використання силової батареї, що в свою чергу корисно при заторах, транспортних пригодах, а також при відсутності мережі. Показано розрахунок інверторів необхідних для роботи такої системи. Контроль буде відбуватися за допомогою релейного керування, що дозволить троллейбусу автономно рухатися, а також дасть змогу накопичувати енергію до акумуляторної батареї.

**Ключові слова:** троллейбус; система живлення; силовий акумулятор; релейне керування; режими руху; перетворювач з двостороннім передаванням енергії

## TROLLEYBUS POWER SUPPLY SYSTEM WITH HIGH VOLTAGE BATTERY

I. MARTIUKHIN\*, I. VERBITSKY

Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Public transport in cities in recent years has received more attention to increase the comfort of life in megacities. The economic and environmental performance of cities can be improved by efficiently connecting public transport resources and increasing vehicle mobility. Over the last two decades, there has been a huge increase in population in developing countries. Population growth has led to an increase in demand for mobility. If the transport infrastructure is not able to meet the requirements, it leads to an increase in the waiting time for public transport and congestion on the streets. Public transport can be more attractive by providing door-to-door mobility, and the development of transport services is an important factor for life in megacities. Transport sustainability, environmental conditions, health and economic well-being can be enhanced by moving to more mobile public transport. Simply put, mobility by public transport makes it possible to reduce the adverse effects of car use on the environment and health. The level of mobility of the city can be improved by providing a well-organized transport system. Therefore, the accessibility of public transport stops, the connectivity of public transport modes and the mobility of the system should be considered to ensure a user-friendly public transport system. The purpose of this article is to create a trolleybus power supply system with a high-voltage battery, which would reduce the load on the network during vehicle acceleration, and with the help of an additional converter was able to recover energy during braking to the battery. Therefore, the article considered the modes of movement of the trolleybus and on the basis of these data proposed a power supply system using a rechargeable battery. This type of vehicle power supply will increase the mobility of the trolleybus due to the use of a power battery, which in turn is useful in traffic jams, accidents, as well as in the absence of a network. The calculation of inverters required for the operation of such a system is shown. The control will take place by means of a relay control, which will allow the trolleybus to move autonomously, as well as allow it to store energy to the battery.

**Keywords:** trolleybus; power supply system; power battery; relay control; traffic modes; converter with two-way energy transfer

## Вступ

На сьогоднішній день троллейбус є перспективним та екологічним міським транспортним засобом. Він не має викидів вуглекислого газу в порівнянні з автобусом та його експлуатація і обслуговування є більш дешевшими в порівнянні з іншими міськими громадськими наземними транспортними засобами.

Однак, незважаючи на велику кількість переваг, все ж існує один суттєвий недолік, такий як мобільність. Адже, троллейбус жорстко прив'язаний до контактної мережі від якої він живиться [1]. Тому актуальною є задача розробки системи електроживлення троллейбуса з використанням високовольтного акумулятора, що дасть змогу пересуватися деякі проміжки маршруту без

використання мережі. А також це буде доцільним у разі відсутності живлення та виникнення на дорозі непередбачуваних ситуацій, наприклад ДТП, що дасть можливість об'їхати перешкоди позбувшись прив'язки до контактної мережі.

### Мета роботи

Метою даної статті є створення системи електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором, яка б дала змогу збільшити мобільність транспортного засобу, зменшити навантаження на мережу під час розгону транспортного засобу, а також за допомогою додаткового перетворювача мала змогу рекуперувати енергію під час гальмування до батареї [2,3].

### Режими руху тролейбуса

Існують наступні режими руху тролейбуса, які зображені на рис.1: прискорення (0- $t_1$ ), рух з постійною швидкістю ( $t_1$ - $t_2$ ), гальмування та рекуперація енергії ( $t_2$ - $t_3$ ).

На першому інтервалі енергія для руху тролейбуса відбирається від мережі, а також паралельно від акумулятора. На другому електропривід живитиметься тільки від мережі, на третьому інтервалі енергія буде рекуперуватися до акумуляторної батареї [4,5].

Енергія, яка відбирається, буде накопичуватися у системі акумулявання для подальшого використання під час розгону тролейбуса за для зменшення навантаження на мережу. Споживання струму від мережі та системи акумулявання зображено на рис.1 (в, г).

Отже, за рахунок такої системи живлення тролейбуса підвищується його мобільність, а також усуваються пікові значення струму, внаслідок використання акумулятора [6,7].

Можемо відзначити, що рекуперація енергії має значний потенціал для економії енергії, тому під час гальмування енергія буде накопичуватися в акумуляторній батареї, а не розсіюватиметься на гальмівному резисторі, як у звичайних системах живлення тролейбусів [7].

На рис.2 зображено блок-схему живлення електропривода. Система працює наступним чином. Давач струму, який стоїть перед входним перетворювачем (П1), що забезпечує керування частотою і амплітудою напругою двигуна [8] і управляється системою керування СК1, зчитує значення струму, яке споживається від мережі і в разі перевищення деякого порогового значення змїсть мережі за допомогою системи керування (СК2) підключається перетворювач зарядного пристрою (П2) і живлення відбувається від акумулятора [9]. Режим рекуперації включається, якщо значення давача напруги перевищує напругу мережі, то в такому випадку перетворювач зарядного пристрою буде працювати в зворотному напрямку, накопичуючи енергію до акумулятора [10,11].

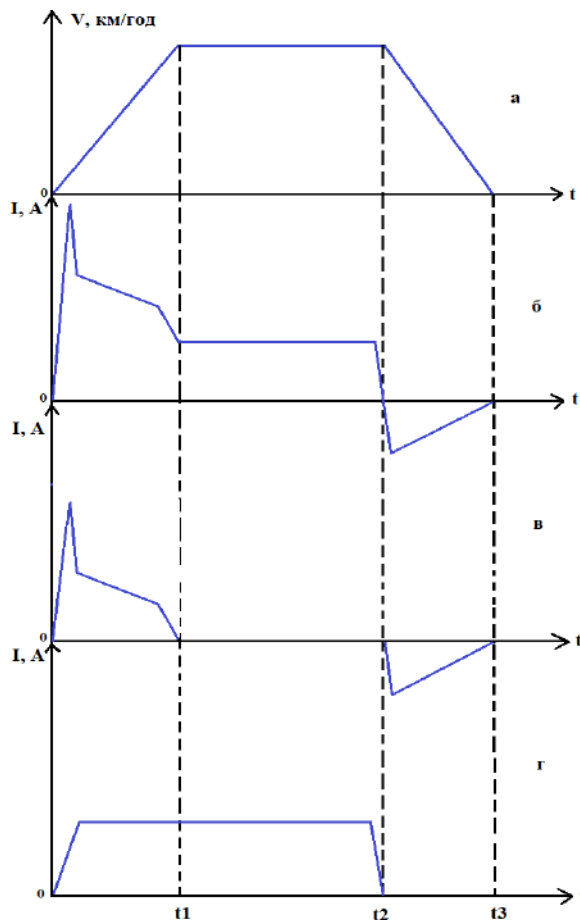


Рис. 1 – Режими руху тролейбуса: а) залежність швидкості від часу; б) споживання струму електродвигуном на різних проміжках; в) споживання струму від акумулятора; г) споживання струму від мережі

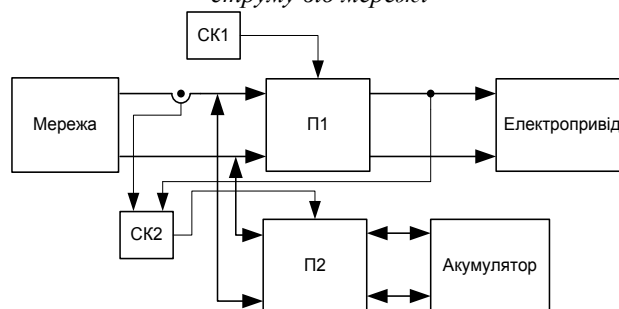


Рис. 2 – Блок-схема живлення електропривода

Задля керування та контролю перевищення граничного значення по струму та напрузі доцільно використовувати релейне керування, що дасть змогу працювати системі живлення тролейбуса коректно [12,13].

Релейне керування – це система, що здійснює зміну вихідного сигналу під впливом керуючого сигналу, що змінюється у певних межах. Тобто система призначена для подавання сигналів керування, коли контрольовані параметри виходять за задані межі [14]. В основному такі системи мають два граничні значення: максимальне та мінімальне, в яких саме і працює така система керування (рис.3).

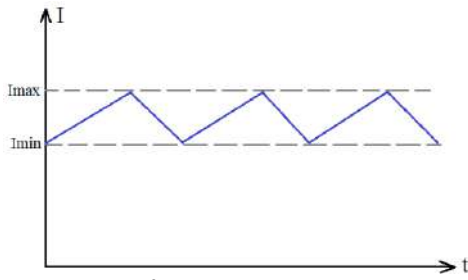


Рис. 3 – Порогові значення

В нашому випадку важливим є лише максимальне граничне значення, оскільки при перевищенні максимально допустимого струму мережі живлення електроприводу буде забезпечуватися від акумулятора. А у разі перевищення значення по напрузі перетворювач зарядного пристрою, працюватиме у зворотному напрямку, за для накопичення енергії до батареї.

#### Розрахунок перетворювача з двостороннім передаванням енергії

Розглянемо роботу другого перетворювача (П2). Для передавання енергії від акумулятора до ланки постійного струму в інвертора 1 замикаються транзистори VT1 та VT4, діоди які вбудовані в транзистори VT5 та VT8 інвертора 2 будуть виконувати функцію випрямляча (рис.4).

Для накопичення енергії в акумуляторі, яка буде надходити від ланки постійного струму в інвертора 2 замикаються транзистори VT5 та VT8, діоди які вбудовані в транзистори VT1 та VT4 інвертора 1 будуть виконувати функцію випрямляча.

В іншому режимі для передавання енергії від акумулятора до ланки постійного струму в інвертора 1 замикаються транзистори VT3 та VT2, діоди які вбудовані в транзистори VT6 та VT7 інвертора 2 будуть виконувати функцію випрямляча.

Для накопичення енергії в акумуляторі, яка буде надходити від ланки постійного струму в інвертора 2 замикаються транзистори VT6 та VT7, діоди які вбудовані в транзистори VT3 та VT2 інвертора 1 будуть виконувати функцію випрямляча.

Розрахуємо параметри перетворювача, використовуючи вхідні данні:  $U=550-600$  В;  $P=180$  кВт.

$$I = \frac{P}{U_{in}} = \frac{180 \cdot 10^3}{600} = 300 \text{ А} . \quad (1)$$

Оберемо транзистор SEMiX402GAL066HDs відповідно до розрахунків. Параметри наведені в табл.1.

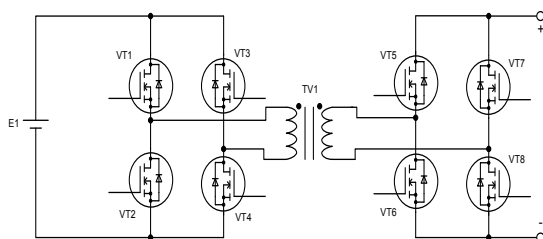


Рис. 4 – Перетворювач П2

Таблиця 1 – Параметри транзистора

|                                                      |       |
|------------------------------------------------------|-------|
| Напруга пробой стік-витік ( $U_{brdss}$ ), В         | 600   |
| Максимальний струм стік-витік при 25 °C ( $I_d$ ), А | 400   |
| Час відновлення ( $t_{rr}$ ), нс                     | 300   |
| Опір стік-витік при 4,5В ( $R_{dson}$ ), Ом          | 0,116 |

Для розрахунку трансформатора, необхідно визначити вхідну індуктивність. Вона обирається з умови необхідного забезпечення вхідного струму 300А з періодом роботи перетворювача Т та розраховується за наступною формулою:

$$L_1 = \frac{U_{in}}{I_{lm}} \gamma T = \frac{600}{300} \cdot 0.5 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} . \quad (2)$$

Коефіцієнт трансформації розраховується наступним чином:

$$n = \frac{U_{out}(1-\gamma)}{U_{in}\gamma} = \frac{600 \cdot (1-0.5)}{600 \cdot 0.5} = 1 . \quad (3)$$

Співвідношення між вхідною та вихідною напругою:

$$m = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{n\gamma}{(1-\gamma)} = \frac{1.12 \cdot 0.5}{1-0.5} = 1.12 . \quad (4)$$

Індуктивність намагнічування трансформатора ( $L_n$ ) розраховується за наступною формулою:

$$L_2 = \frac{L_1}{n \cdot m} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{1} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} . \quad (5)$$

В якості сердечника обираємо Epcos E80 (рис.5).

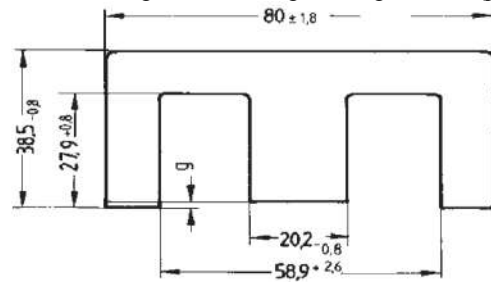


Рис. 5 – Габаритні розміри Epcos E80

Обмотки на сердечнику розрахуємо за такою формулою [15]:

$$N = \sqrt{\frac{L}{2} / A_L} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-5}}{882 \cdot 10^{-9}}} = 5 \text{ ум} , \quad (6)$$

де  $A_L$  – так званий коефіцієнт індуктивності.

Площа поперечного перерізу провідника:

$$S_{пров} = \frac{I}{j} = \frac{300}{10} = 30 \text{ мм}^2 , \quad (7)$$

де  $j$  – допустима щільність струму ( $j$  при початковому розрахунку приймають значення 10 А / мм<sup>2</sup>).

Площа вікна розрахована [20]:

$$S_{вік} = \frac{N \cdot S_{пров}}{k_{зан}} = \frac{5 \cdot 30}{0.3} = 500 \text{ мм}^2 , \quad (8)$$

де  $S_{пров}$  – площа перерізу дроту;  $k_{зан}$  – коефіцієнт заповнення вікна. Типове значення  $k_{зан}$  по міді становить 0,3.

Площа вікна складає двох сердечників E80 складає:

$$S_{\text{вік серд}} = \frac{58.9 - 20.2}{2} \cdot 27.9 = 1080 \text{ мм}^2 \quad (9)$$

Розрахуємо діаметр проводу, який необхідний:

$$d_{\text{пров}} = 2\sqrt{\frac{S_{\text{пров}}}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{30}{\pi}} = 6.2 \text{ мм} \quad (10)$$

Перевіряємо коефіцієнт заповнення вікна:

$$k = \frac{2 \cdot S_{\text{пров}}}{S_{\text{вік серд}}} = \frac{60}{1080} = 0.1 \quad (11)$$

Таким чином робимо висновок, що площі вікна вистачить для намотки такого провідника.

Однак ще слід враховувати скін ефект, оскільки трансформатор працює на високій частоті. Тому в такому випадку варто використовувати багатожильний провідник. Отже, обираємо мідний провід з діаметром  $d=1\text{мм}$  і площею поперечного перерізу  $S_{\text{перер}}=0.75\text{мм}^2$ .

Розрахуємо кількість проводів в жилі:

$$n = \frac{S_{\text{пров}}}{S_{\text{перер}}} = \frac{30}{0.75} = 40 \text{ шт} \quad (12)$$

Таким чином у жилі буде 40 провідників, площа перерізу однієї такої жили не буде перевищувати площу одного розрахованого провідника.

### Розрахунок трифазного інвертора

Проведемо розрахунки для першого перетворювача (П1). На рис. 6 зображено трьох фазний інвертор, який буде далі розрахований.

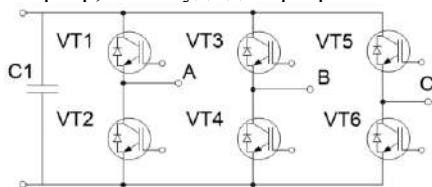


Рис. 6 – Трифазний інвертор

Вхідні данні для розрахунку: вхідна напруга  $U = 550-600\text{ В}$ ; потужність  $P = 180\text{ кВт}$ .

$$I = \frac{P}{U_{\text{in}}} = \frac{180 \cdot 10^3}{600} = 300\text{ А} \quad (13)$$

Ємність вхідного конденсатора визначаються величиною пульсацій струму через нього, яка розраховується за наступною формулою:

$$I_{C1} = I_{\text{out}} \frac{\sqrt{V_{\text{out}}(V_{\text{in}} - V_{\text{out}})}}{V_{\text{in}}} = 144,6\text{ А} \quad (14)$$

Для вибору вхідного конденсатора необхідно враховувати імпеданс джерела. Тому в такому випадку достатньо встановити вхідний конденсатор ємністю 10-22 мкФ в розрахунку на 1 А. Отже, розрахована вхідна ємність складає  $C1 = 2175\text{ мкФ}$ . Обираємо конденсатор ALC70A221DC550, параметри якого наведено в табл.2.

Таблиця 2 – Параметри транзистора

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| Ємність, мкФ           | 2200      |
| Робоча напруга, В      | 550       |
| Робоча температура, °C | -40...+85 |
| Внутрішній опір, Ом    | 1,95      |
| Сторок служби, год     | 18000     |

Згідно з попередніми розрахунками транзистор бути розрахований на напругу в 600 В і струм в 300 А. Тому відповідно до цих параметрів оберемо силовий модуль SKM450GB12E4. Головні технічні характеристики наведені в табл.3.

Таблиця 3 – Параметри силового модуля

|                                     |          |
|-------------------------------------|----------|
| Напруга колектор емітер (UCES), В   | 1200     |
| Напруга база-емітер (UGE), В        | -20...20 |
| Час наростання (ton), нс            | 246      |
| Час спаду (tof), нс                 | 529      |
| Повний заряд затвору, мкКл          | 62       |
| Номінальний струм колектора (Ic), А | 450      |
| Наявність діода                     | Так      |
| Номінальний струм діоду (IF), А     | 440      |

### Результати моделювання

На рис. 7 зображено модель релейного керування. Вона працює наступним чином, при перевищенні вхідного струму порогового значення буде вмикатися перший релейний елемент, який в свою чергу через систему розподілення імпульсів буде керувати транзисторами. Кожний канал системи розподілення буде керувати парою діагонально ввімкнених транзисторів. Тобто в один момент часу буде працювати одна пара діагонально ввімкнених транзисторів, а в інший момент – інша. Це робиться для того, щоб трансформатор не намагнічувався. При споживанні струму нижче порогового значення релейний елемент буде вимикатися.

Другий релейний елемент буде спрацьовувати при перевищенні напруги вище порогового рівня. Він також працює через систему розподілення імпульсів та керує парою діагонально ввімкнених транзисторів.

На рис. 8 зображено струм на вході та напругу на виході схеми. На цих діаграмах можна спостерігати ввімкнення першого реле на діаграмі струму та ввімкнення другого на діаграмі напруги. Порогові рівні спрацювання в даній моделі по струму 40А ( $\pm 1$ ) та по напрузі 120В ( $\pm 1$ ).

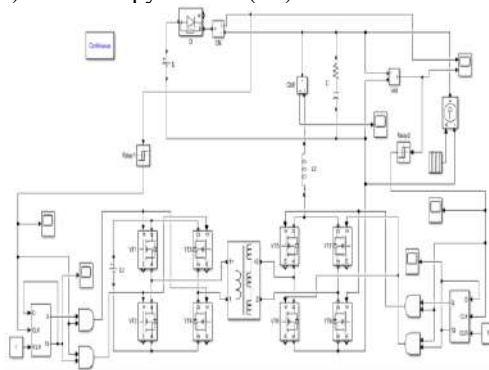


Рис. 7 – Модель релейного керування



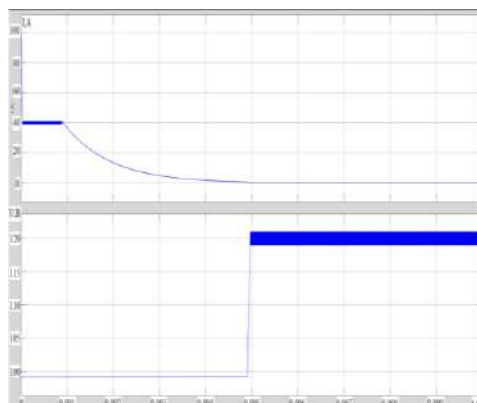


Рис. 8 – Струм та напруга при релейному керуванні

### Висновки

У статті проведено дослідження системи живлення тролейбуса з високовольтним акумулятором. На основі режимів руху тролейбуса з високовольтним акумулятором запропоновано блок-схему живлення електроприводу та проведено розрахунки для перетворювачів. Така система дасть змогу рухатися транспортному засобу автономно навіть при відсутності мережі, а також під час гальмування система здатна накопичувати енергію до акумуляторної батареї. Також за рахунок використання накопиченої енергії в акумуляторі можна зменшити навантаження на мережу під час пуску при перевищенні порогового значення споживання струму, використовуючи для живлення приводу лише батарею. Дану систему було промодельовано в програмному середовищі та представлено діаграми її роботи.

### Список літератури

1. Богодістий П. А. *Проектування та експлуатація тролейбусів ЮМЗ-Т2, ЮМЗ-Т2П, ЮМЗ-Т2 мод. 7, Богдан-Т70110, Богдан-Т70117*. АСМІ, Полтава, 2018, 436 с.
2. Bartlomiejczyk M., Hrbac R., Polom M. Trolleybus with traction batteries for autonomous running. *International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Electoenergetica*. 2013.
3. Rogge M., Wollny S. Uwe Sauer D. Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. *Energies*. 2015. 8. P. 4587-4606. doi:10.3390/en8054587.
4. Губка І. О., Вербицький Є. В. Комбінована система електроживлення тролейбуса та економічний ефект від її використання. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2019. 24(4). P. 32-39. doi: 10.20535/2523-4455.2019.24.4.183845.
5. Yang S. C., Li M., Lin Y., Tang T. Q. Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014. 402. P. 41-48. doi: 10.1016/j.physa.2014.01.062.
6. Мартюхін І. А., Білий М. В. Транспортний засіб з акумулятором зі зменшеними масогабаритними показниками. *Електронна та акустична інженерія*. 2019. 2. № 1. С. 16-20. doi:10.20535/2617-0965.2019.2.1.162155.
7. Grygar D., Kohani M., Stefun R., Drgona P. Analysis of limiting factors of battery assisted trolleybuses. *Transportation Research Procedia*. 2019. 40. pp. 229-235. doi:10.1016/j.trpro.2019.07.035.

8. Verbytskyi I. V., Zhuikov V. J. Asynchronous motor drive interharmonics calculation based on generalized Fourier series of several variables. *Technical Electrodynamics*. 2020. № 2. P. 36-42. doi: 10.15407/techne2020.02.036.
9. Куценко Ю. М., Яковлев В. Ф., Смуригін В. М., Ковальов О. В., Вужицький А. В. *Електричні машини та апарати*. Навч. Посібник. К.: Аграрна освіта, 2013.
10. Gou Yanan. Research on Electric Vehicle Regenerative Braking System and Energy Recovery. *International Journal of Hybrid Information Technology*. 2016. 9(1). P. 81-90. doi: 10.14257/ijhit.2016.9.1.08.
11. Яцина М. М. Дослідження рекуперації енергії в процесі гальмування на гібридних автомобілях з використання пневмодвигуна. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018. 2 (83). doi: 10.20535/2521-1943.2018.83.137493.
12. Ndoye A., Delpoux R., Hetel L., Kruszewski A., Tregouet J.-F., Lin-Shi X. Robust relay control for buck converters: experimental application. *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*. 2019. doi:10.1109/cdc40024.2019.9030179.
13. Polyakov A., Hetel L. Relay Control Design for Robust Stabilization in a Finite-Time. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. 62(4). P. 1985–1991. doi:10.1109/tac.2016.2591725.
14. Системи електроживлення електронної апаратури. Конспект лекцій для студентів спеціальності 171 «Електроніка», спеціалізації 8(7).050802 «Електронні системи». К.: НТУУ «КПІ», 2016. 180 с.
15. Бирюков С. *Дроссели для импульсных источников питания на ферритовых кольцах*. 2010.

### References (transliterated)

1. Bogodisty P.A. *Design and operation of trolleybuses YuMZ-T2, YuMZ-T2P, YuMZ-T2 mod. 7, Bogdan-T70110, Bogdan-T70117*. ASMI. Poltava, 2018. 436 p.
2. Bartlomiejczyk M., Hrbac R., Polom M. Trolleybus with traction batteries for autonomous running. *International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Electoenergetica*, 2013.
3. Rogge M., Wollny S. and Uwe Sauer D. Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements. *Energies*, 2015, 8, pp. 4587-4606, doi:10.3390/en8054587.
4. Hubka I. O., Verbytskyi I. V. Combined trolleybus power supply system and economic effect from its use. *Microsystems, Electronics and Acoustics*. 2019, 24(4), pp. 32-39, doi: 10.20535/2523-4455.2019.24.4.183845.
5. Yang S. C., Li M., Lin Y., Tang T. Q. Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 402, pp. 41-48, doi: 10.1016/j.physa.2014.01.062.
6. Martyukhin I. A., Bely M. V. Vehicle with a battery with reduced overall dimensions, *Electronic and acoustic engineering*, 2019, 2, no. 1, pp. 16-20, doi: 10.20535/2617-0965.2019.2.1.162155.
7. Grygar D., Kohani M., Stefun R., Drgona P. Analysis of limiting factors of battery assisted trolleybuses. *Transportation Research Procedia*, 2019, 40, pp. 229-235, doi:10.1016/j.trpro.2019.07.035.
8. Verbytskyi I. V., Zhuikov V. J. Asynchronous motor drive interharmonics calculation based on generalized Fourier series

- of several variables. *Technical Electrodynamics*, 2020, № 2, pp. 36-42, doi: 10.15407/techmed2020.02.036.
9. Kutsenko Yu. M., Yakovlev V. F., Smurigin V. M., Ковальов О. В., Vuzhitsky A. B. *Electrical Machines and Apparatus*, Textbook. Kyiv, Agricultural Education, 2013.
  10. Gou Yanan, Research on Electric Vehicle Regenerative Braking System and Energy Recovery. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2016, 9(1), pp. 81-90, doi: 10.14257/ijhit.2016.9.1.08.
  11. Yatsyna M. M. Investigation of energy recovery during braking on hybrid cars using a pneumatic engine. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2018, №2 (83), doi: 10.20535/2521-1943.2018.83.137493.
  12. Ndoye A., Delpoux R., Hetel L., Kruszewski A., Tregouet J.-F., Lin-Shi X. Robust relay control for buck converters: experimental application. *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, 2019. doi:10.1109/cdc40024.2019.9030179.
  13. Polyakov A., Hetel L. Relay Control Design for Robust Stabilization in a Finite-Time. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 62(4), pp. 1985–1991. doi:10.1109/tac.2016.2591725.
  14. *Power supply systems for electronic equipment*. Lecture notes for students majoring in 171 "Electronics", specialization 8(7).050802 "Electronic Systems". К., NTUU "KPI", 2016. 180.
  15. Biryukov C. *Chokes for switching power supplies on ferrite rings*, 2010.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Мартюхін Ігор Андрійович** – магістр, кафедра електронних пристроїв та систем, факультет електроніки Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна ; ORCID: 0000-0003-3004-0487; e-mail: margigoand@ukr.net.

**Ihor Martiukhin** – Master, Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3004-0487; e-mail: margigoand@ukr.net.

**Вербицький Євген Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних пристроїв та систем, факультет електроніки Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

**Ievgen Verbytskyi** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Ph. D., Assoc. Prof., Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7275-5152; e-mail: verbitskiy@bigmir.net

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Мартюхін І. А., Вербицький Є. В. Система електроживлення троллейбуса з високовольтним акумулятором. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 33-39. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.05.

*Please cite this article as:*

Martiukhin I., Verbytsky I. Trolleybus power supply system with high-voltage battery. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 33-39, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.05.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Мартюхин И. А., Вербицкий Е. В. Система электропитания троллейбуса с высоковольтным аккумулятором. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 33-39. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.05.

**АННОТАЦІЯ** *Общественный транспорт в городах за последние годы приобрел большее внимание за повышения комфорта жизни в мегаполисах. Экономические и экологические показатели городов можно улучшить за счет эффективного подключения ресурсов в сфере общественного транспорта и повышение мобильности транспортных средств. За последние два десятилетия в развивающихся странах, наблюдается огромный прирост населения. Рост численности населения привело к росту спроса на мобильность. Если транспортная инфраструктура не способна удовлетворить требования, это приводит к увеличению времени ожидания общественного транспорта и пробок на улицах. Общественный транспорт может быть более привлекательным, обеспечивая мобильность «от двери до двери», а развитие транспортных услуг является важным фактором для жизни в мегаполисах. Устойчивость транспорта, экологические условия местности, здравоохранение и экономическое положение жителей можно повысить путем перехода к более мобильной общественного транспорта. Простыми словами, мобильность с помощью общественного транспорта позволяет уменьшить неблагоприятное влияние использования автомобилей на состояние окружающей среды и здоровье. Уровень мобильности города можно улучшить, обеспечив хорошо организованную транспортную систему. Итак, доступность остановок общественного транспорта, сопряженность видов общественного транспорта и мобильность системы должны рассматриваться для обеспечения удобной для пользователей системы общественного транспорта. Поэтому в полу были рассмотрены режимы движения троллейбуса и на основе этих данных было предложено систему электропитания с использованием аккумуляторной батареи. Такой вид питания транспортного средства повысит мобильность троллейбуса за счет использования силовой батареи, в свою очередь полезно при заторах, транспортных происшествиях, а также при отсутствии сети. Показано расчет инверторов необходимых для работы такой системы. Контроль будет происходить с помощью релейной управления, что позволит троллейбуса автономно двигаться, а также позволит накапливать энергию к аккумуляторной батарее.*

**Ключевые слова:** троллейбус; система питания; силовой аккумулятор; релейное управления; режимы движения; преобразователь с двусторонним передачей энергии

Надійшла (received) 01.12.2020

УДК 621.914.025.7:621.914.1

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.06

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИЗНАЧАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ПЛАСТИЧНИХ СТАЛЕЙ ШЛЯХОМ ДОСЛІДЖЕННЯ НА СТИСКАННЯ****С. С. НЕКРАСОВ<sup>1</sup>, А. Ю. ДОВГОПОЛОВ<sup>1\*</sup>, Д. О. ЖИГИЛІЙ<sup>2</sup>, А. В. БАРАНЕНКО<sup>1</sup>,  
Ю. Є. СИДОРОВ<sup>1</sup>**<sup>1</sup> кафедра технології машинобудування, верстати та інструменти, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА<sup>2</sup> кафедра загальної механіки і динаміки машин, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

\*e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** У статті проаналізовано вплив коефіцієнта тертя на процес деформації циліндричного зразка з пластичних сталей при стисканні. Розглянута методика дозволяє визначити залежність дійсних напружень від дійсних деформацій з випробувань на стискання. Встановлено, що причиною бочкоподібності зразка, що стискається, з пластичної сталі є виключно тертя між поверхнями випробовуваного зразка й опор. Для зменшення впливу тертя на показники діаграми напруження-деформації, стандартна методика пропонує використати різні прийоми його зниження, це можуть бути спеціальні мастила або зміна форми опорних поверхонь зразка. Але усі ці підходи неможливо використати при визначенні діаграми напруження-деформації при температурах більше 300 °С, оскільки використання мастил стає неможливим. Для визначення впливу коефіцієнта тертя на форму зразка, що стискається, авторами запропоновано провести модельний експеримент процесу стискання пластичної сталі з різними коефіцієнтами тертя за рівних умов. Такий підхід дозволив визначити вплив коефіцієнта тертя і порівняти результати з натурним експериментом. Отримана діаграма стискання пластичної сталі з натурального експерименту дозволяє визначити залежність істинних напружень від істинних деформацій, її використання дає можливість визначити коефіцієнти визначального рівняння моделі матеріалу, необхідного для проведення модельних експериментів пластичної деформації сталей, як при кімнатних температурах так і при температурах до 900 °С з урахуванням впливу пластичних деформацій. Запропонована методика дозволяє отримувати залежність істинних напружень від істинних деформацій, а також враховує зміну коефіцієнта тертя між торцями зразка і опорами при дії підвищених температур, чого не враховують стандартні методики проведення випробувань. У роботі показано, що початковими даними для отримання залежності істинних напружень від істинних деформацій є різниця діаметрів зразка і діаграма сила-переміщення.

**Ключові слова:** деформація; метод скінчених елементів; пластичні сталі; дійсні напруження; моделювання; стискання

**DEVELOPMENT OF CONSTITUTIVE EQUATIONS IDENTIFYING METHODOLOGY FOR STEELS FOR PLASTIC MOULDING BY COMPRESSION TESTING****S. NEKRASOV<sup>1</sup>, A. DOVHOPOLOV<sup>1</sup>, D. ZHYHYLIY<sup>2</sup>, A. BARANENKO<sup>1</sup>, YU. SYDOROV<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE<sup>2</sup> Department of General Mechanics and Dynamics of Machines, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

**ABSTRACT** The influence of frictional coefficient on the cylindrical plastic steel specimen under compression is analyzed. The considered methodology allows determining effective stress dependence on effective strains by compression testing. It is found that the reason for the barrel-shaped plastic steel compressive test specimen form is only friction between contact surfaces of tested specimens and supports. The standard methodology suggests using various friction reduction technologies to reduce the friction effect on stress-strain diagram determination. These can be special lubricants or changes in the shape of the specimen bearing surfaces. But all approaches to the issue with stress-strain diagram determination are unable to be implemented under temperatures above 300°C due to not being able to use lubricants. The plastic steel compression process experiment behind the model with varying only friction coefficients is suggested in order to determine the effect of friction coefficient on the shape of a compressed specimen. This approach makes it possible to search into the effect of friction coefficient and compare the results with a full-scale experiment. The plastic steel compression diagram, having been obtained from a full-scale experiment, permits to determine effective stress-strain relationship, which, in turn, allows calculating the constitutive equation coefficients of the material model necessary for carrying out simulations of plastic steels deformation under both room indoor temperature and temperatures up to 900°C, including the plastic deformation influence. The proposed methodology also provides the possibility to obtain an effective stress-strain relationship and varying the friction coefficient between the specimen end surface and the supports being exposed to elevated temperatures, which cannot be treated by standard test methods. It is shown that the initial data for obtaining the effective stress-strain relationship are the difference in specimen diameters and the force-displacement diagram.

**Keywords:** strain state; finite element method; plastic steels; effective stress; simulation; compression

**Вступ**

Теорія визначальних рівнянь вперше з'явилася у роботах із механіки деформованого твердого тіла.

Разом з тим спроби їх формулювання робилися неодноразово та називалися по-різному: фізичні рівняння або рівняння стану. Так, у теорії пружності використовується визначальні рівняння пружних



лінійних та нелінійних матеріалів, а у механіці суцільних середовищ – рівняння стискальної та нестискальної рідини, в'язкої лінійної та нелінійної рідин. Теорія пластичності оперує рівняннями пластичних матеріалів, і теплопровідності – відповідно. Разом, застосування комбінованої системи таких рівнянь на базі спільної їхньої основи й обґрунтування меж і докладності застосування для прикладних технічних задач важкого машинобудування є актуальним викликом сьогодення. У роботі викладається єдина теорія визначальних рівнянь у складі методики ідентифікації визначальних рівнянь ливарних сталей із дослідів на стискання.

Визначальні параметри вибираються за загальною схемою робіт [1–3] на основі механіки «термомеханічного процесу» в околі матеріальної точки. Він ґрунтується на історії зміни всіх визначальних параметрів за часом у кожній типовій матеріальній точці. Вважається, що поведінка деформованого тіла визначається усім термомеханічним процесом. Така залежність задається визначальними рівняннями матеріалу. Наближене розв'язання полягає в апріорному формулюванні системи визначальних рівнянь і в подальшій експериментальній і чисельно-експериментальній перевірці їхньої відповідності одержаних експериментальним результатам.

Так, конвенційні методи дослідження металічних матеріалів на стискання [4] вимушено доповнювалися обмеженнями на швидкість деформацій та температуру. Тоді як специфічні вимагають нагрівання зразка до постійної температури і утримання її рівномірною, докладання осрової сили за ретельно контрольованою швидкістю деформації.

Для прийнятних випробувань на стискання обов'язково потрібно, щоб зразки не згиналися до досягнення руйнування. З цієї причини обладнання та методика випробувань, повинні ретельно забезпечувати рівномірне навантаження та осьове центрування [5]. Через цей ефект, деякі методи тестування включають обмеження за дозволим відхиленням. Вводяться інтервали перевірки вирівнювання, зазначені в методах, що цього вимагають. Деякі типи випробувань можуть вказувати на поточний стан вирівнювання випробувальної рамки з кожним випробуваним зразком. Якщо метод випробування вимагає перевірки вирівнювань, частота їх перевірки повинна враховувати всі дані, тобто часовий інтервал, зміні рамки випробувань та, за можливості, поточні показники стану вирівнювання за результатами випробувань.

Найбільш критичною є вимога до мащення поверхонь зразків, що контактують [5]. Їх змащують за допомогою опорного пристрою з метою зменшення тертя. Інакше одновісний напружено-деформований стан стискання буде спотворено дотичними напруженнями на поверхнях дотикання, що призведе

до систематичної похибки у результатах експерименту. Ще мастило повинно мати незначну реакцію з поверхнею зразка для вибраної температури й особливо часу випробування, тобто повинно зберігати свої змащувальні властивості протягом усього експерименту. Найбільш розповсюджені дисульфід молібдену та графітні мастила. Проте обмеження за максимальною температурою для заданих мастил є істотним: до +450°C для дисульфиду молібдену [6] та до +400°C для промислових графітних мастил [7], тоді як різання відбувається за значно вищих температур.

Тому набуває актуальності пошук альтернативних методів визначення діаграми стискання [8], основаних на дослідженні контактної взаємодії оброблюваного та обробляючого тіл за умов дії високих температур.

### Мета роботи

Розробка методики ідентифікації визначального рівняння пластичних сталей із дослідів на стискання, шляхом моделювання методом скінчених елементів у програмному пакеті LS-DYNA.

### Викладення основного матеріалу

При стисканні у випробовуваному зразку виникає складний напружено-деформований стан в результаті того, що коефіцієнт тертя між торцями зразка і опорами не дорівнює нулю. Якщо припустити, що коефіцієнт тертя на поверхнях контакту зразка з опорами дорівнює нулю, то у такому разі, циліндричний зразок при стискуванні так і залишався б циліндричним. Насправді ж при осіданні циліндричного зразка він стає бочкоподібним, що пояснюється наявністю тертя на торцях зразка.

Така форма дослідного зразка, призводить до нерівномірного розподілу напружень уздовж його осі при стисканні. Оскільки за цією методикою неможливо безпосередньо отримати залежність істинних напружень від істинних деформацій випробовуваного матеріалу, то для отримання цієї залежності по діаграмі стискання розроблена і прийнята наступна методика.

Ідея запропонованої методики полягає в тому, що результати натурного експерименту зіставляються із результатами моделювання виконаного методом скінчених елементів. Випробування зразків проводяться в аналогічних умовах з різними коефіцієнтами тертя, а за формою зразка судять про коефіцієнт тертя, який мав місце на торцях зразка. Для опису процесів, що відбуваються при стисканні зразка, проводиться моделювання процесу стискання стандартного циліндричного зразка типу III що відповідає ГОСТ 25.503-97 методом скінчених елементів. Цей тип зразка застосовується для визначення фізичної межі текучості, умовної межі

текучості і побудови кривої зміцнення до значень логарифмічних деформацій. Завдання вирішувалося в 2d-осесиметричній постановці (рис. 1) в програмному пакеті LS - DYNA.

Математичне формулювання моделі буде наступним: система, яка моделюється, в роботі прийнята у вигляді двох об'єктів (заготовки або її частини та інструменту або його частини), певним чином орієнтованих у просторі один відносно іншого і такими що взаємодіють один з одним. Ці об'єкти здійснюють відносні рухи з відповідними швидкостями руху. Об'єкти взаємодіють між собою по контактних поверхнях, створюючи один в одному деформації за рахунок дії контактних сил, обумовлених заданою моделлю тертя на відповідних ділянках контактних поверхонь. Кожен об'єкт чинить опір деформації, внаслідок чого виникають внутрішні сили (напруження), що відповідають заданій моделі матеріалу об'єкту. Разом із цим, якщо міцність об'єкту недостатня, то відбувається його руйнування. Критерій і схема руйнування задаються моделлю цього процесу. Вплив температури на деформації відбувається шляхом зміни механічних властивостей оброблюваного матеріалу і трибологічних властивостей на контактній поверхні інструменту. Виходячи з того, що пружні деформації заготовки, що виникають внаслідок лінійного температурного розширення малі, то в моделі вони не враховуються.

1. Диференційовані рівняння руху:

$$\rho \ddot{u}_i = f_i + \sigma_{ij,j}, \quad i=1,2,3, \quad j=1,2,3. \quad (1)$$

2. Результуюча сила:  $f = f_{load} + f_{contact} - I$ .

3. Зв'язок прискорень зі швидкостями переміщень і переміщеннями:

$$\dot{u}_i = \int \ddot{u}_i d\tau; \quad u_i = \int \dot{u}_i d\tau. \quad (2)$$

4. Зв'язок швидкостей деформацій із швидкостями переміщень:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

5. Рівняння нерозривності:

$$\rho = \rho_0 \det(F). \quad (4)$$

6. Зв'язок приросту повних деформацій зі швидкостями деформацій:

$$d\varepsilon_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} d\tau \quad (5)$$

7. Зв'язок приросту повних деформацій з приростами пластичних пружних деформацій:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p. \quad (6)$$

8. Рівняння зв'язку напружень з деформаціями:

$$p = K(1/\det(F)-1); \quad s_{ij} = C^e(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p). \quad (7)$$

9. Умова пластичності з урахуванням визначального рівняння:

$$\Phi = \bar{\sigma} - \sigma_s(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T) = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_s(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T) = \left( A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n \right) \left( 1 + C \ln(\dot{\bar{\varepsilon}}^p / \dot{\varepsilon}_0^p) \right) (1 - T^{*m}) \quad (9)$$

10. Умова навантаження-розвантаження Куна-Такера:

$$\dot{\lambda} \geq 0, \Phi \leq 0, \dot{\lambda}\Phi = 0, \dot{\lambda}_{ij} = \frac{\dot{\varepsilon}_{ij}^p}{\dot{\bar{\varepsilon}}^p} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (10)$$

11. Зв'язок компонентів напружень і деформацій:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}; \quad \sigma_{ij} = s_{ij} - \frac{1}{3} tr(p); \quad \dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p}, \quad (11)$$

$$\bar{\varepsilon}^p = \int \dot{\bar{\varepsilon}}^p d\tau.$$

12. Умова руйнування: (фізичний критерій),

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_f^p(p/\sigma_s, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T)} \geq 1$$

$$\bar{\varepsilon}_f^p = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \dot{\bar{\varepsilon}}^p) (1 + D_5 T^*),$$

$$\sigma^* = p/\sigma_s, T^* = (T - T_0)/(T_{\infty} - T_0). \quad (12)$$

13. Рівняння теплопровідності:

$$\rho C_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \eta \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \quad (13)$$

або рівняння адиабатичного розриву:

$$\dot{T} = \eta \frac{\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p}{\rho C_m}, \quad \text{якщо} \quad (14)$$

$$\frac{\lambda_T}{\rho C_m} \frac{h K_L}{V} (1 - \alpha) \leq 0.5 L_c^2 - \int_0^L r \operatorname{erf} \left( \frac{r}{2\sqrt{\omega \tau}} \right) dr$$

В наведених рівняннях прийняти такі умовні позначення:  $\tau$  - час;  $T$  - температура;  $F$  - градієнт руху;  $u_i$  - вектор переміщення;  $x_i$  - вектор координат;  $\sigma_{ij}$  - тензор напружень;  $s_{ij}$  - девіатор напружень;  $\rho$  - густина;  $p$  - гідростатичний тиск (позитивне при стисканні);  $C^e$  - тензор пружних коефіцієнтів;  $\varepsilon_{ij}$  - тензор деформацій;  $f_{load}$  - інтенсивність зовнішніх сил;  $f_{contact}$  - інтенсивність сил на контактній межі тіла;  $f_i$  - інтенсивність об'ємних сил;  $I$  - інтенсивність внутрішніх сил;  $h$  - розмір зони первинних деформацій;  $K_L$  - коефіцієнт скорочення стружки;  $V$  - швидкість різання;  $\eta$  - доля механічної роботи, яка перетворюється в теплоту; параметри матеріалів:  $\rho_0$  - початкова густина;  $\lambda_T$  - теплопровідність;  $C_m$  - масова теплоємність.

Початкові умови задаються наступним чином:

$$\tau = 0; \quad \forall M \in I \cup 3 \quad x_i^0 = x_i^0(M); \quad \sigma_{ij}^0(M) = 0;$$

$$\rho_0 = \rho_0(M); \quad \varepsilon_{ij}^0(M) = 0; \quad \bar{\varepsilon}^p = 0, T_0(M) = T_c.$$

Граничні умови: на внутрішніх границях заготовки  $\Sigma_{3\infty} \forall M \in \Sigma_{3\infty} u_i(M) = 0, T(M) = T_c$  та інструменту  $\Sigma_{I\infty} \forall M \in \Sigma_{I\infty} \dot{u}_i(M) = V_i$

$u_i(M) = V_i, T(M) = T_c$ , на вільних границях заготовки  $\Sigma_{3\_віль}$  та інструмента  $\Sigma_{I\_віль}$ :

$$\forall M \in \Sigma_{3\_вил} \cup \Sigma_{I\_вил} \quad \sigma_{ij}|_M \cdot n_i = 0,$$

$$-\lambda_T \left( \frac{dT}{dn} \right)_M = \alpha_T (T - T_c), \quad \text{де } \alpha_T - \text{коефіцієнт тепловіддачі.}$$

На контактній поверхні  $\Sigma_{3I}$ , яка є геометрично загальною частиною поверхні заготовки  $\Sigma_3$  та інструменту  $\Sigma_I$ , т.е.  $\Sigma_{3I} \in \Sigma_I \cap \Sigma_3$ :  $\forall M \in \Sigma_{3I}$

$$\dot{g} = (\dot{u}_i)_{\Sigma_3} n_i - (\dot{u}_i)_{\Sigma_I} n_i; \quad \sigma_n \leq 0; \quad \dot{g} \geq 0; \quad \sigma_n \cdot \dot{g} = 0;$$

$$\frac{q_{\Sigma_3}}{q_{\Sigma_I}} = \frac{\sqrt{\lambda_3 c_3 \rho_3}}{\sqrt{\lambda_I c_I \rho_I}}; \quad q_M R^* = T_{\Sigma_3} - T_{\Sigma_I}; \quad q_M = \tau_n V_c - (q_{\Sigma_3} + q_{\Sigma_I}),$$

де  $\sigma_n$  – контактні нормальні напруження,  
 $V_c = \left| \dot{u}_i|_{\Sigma_I} - \dot{u}_i|_{\Sigma_3} \right|$  дотичні напруження  
 $\tau_n$  – відповідно моделі М. S. Shaw [7]:

$$\tau_i = \tau_a + \tau_d, \quad \tau_d = \mu_d \sigma_n,$$

$$\tau_a = \tau_0 + (\beta_0 - k_b \cdot \max(0; T - T_k)) \cdot \sigma_{nr}, \quad (15)$$

умова охопчування:

$$\begin{cases} V_c = 0, \text{ якщо } |\tau_n| < \tau_{\max} - \text{охопчування на контактній границі - внутрішнє тертя,} \\ V_c > 0, \text{ якщо } |\tau_n| = \tau_{\max} - \text{ковзання на контактній границі - зовнішнє тертя,} \end{cases}$$

де  $\tau_{\max}$  – максимальні дотичні напруження опору ковзанню в заданій точці різальної кромки на контактній поверхні, на границі між зонами  $\Sigma_v \in M$  і ковзання  $\Sigma_r \in M$   $\sigma_{ij}|_{\Sigma_v} = \sigma_{ij}|_{\Sigma_r}$ ;  $\dot{u}_i|_{\Sigma_v} = \dot{u}_i|_{\Sigma_r}$  в зоні схоплювання  $\forall G \in \Sigma_v, \dot{u}_i|_{\Sigma_r} = \dot{u}_i|_{\Sigma_v}$ .

Для моделювання стискання зразка створювалися геометричні образи циліндричних опор і циліндричного зразка. Одна з опор жорстко закріплена, а інша переміщається з постійною швидкістю у напрямку закріпленої опори. Зразок і опори розбивалися на 4 вузлові елементи. На поверхнях контакту задавався середній коефіцієнт тертя. Граничні умови реалізовані умовою осьової симетрії, шляхом обмеження переміщень і обертань на осі  $X=0$  [9].

Опори розглядалися як абсолютно жорсткі тіла. Для вирішення контактної задачі мають бути додатково задані їх модуль пружності  $E$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu$  і густина  $\rho$ . Оскільки застосовувалися твердосплавні опори, то вказані властивості прийняті рівними:  $E = 560 \text{ МПа}$ ,  $\mu = 0.3$ ,  $\rho = 14600 \text{ кг/м}^3$ . Модель матеріалу зразка задавалася у формі Джонса-Кука з тими коефіцієнтами, які необхідно було визначити.

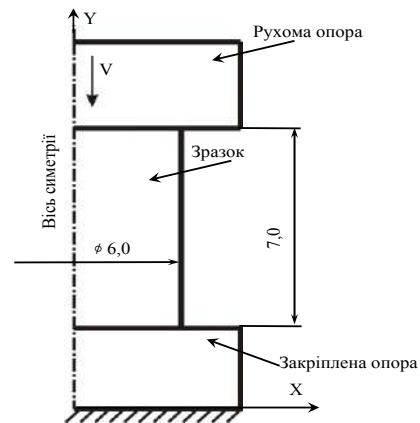


Рис. 1 – Розрахункова схема дослідження на стискання

Завдання формулювалося таким чином: з віртуального експерименту на стискання зразка за методикою, що відповідає ГОСТ 25.503-97, необхідно отримати залежність істинних напружень  $\sigma_{ii}$  від істинних деформацій  $\varepsilon$  для умов, близьких до умов, в яких знаходиться матеріал при різанні. Оскільки деформації залежать від висоти зразка після стискання, то при дослідженні визначалися залежності:

$$\varepsilon = f(d_\phi) \quad (16)$$

$$\sigma = f(d_\phi) \quad (17)$$

де  $d_\phi$  – максимальний (фактичний) діаметр зразка уздовж його осі після стискання (див. рис. 2, б).

У свою чергу фактичний діаметр зразка залежить від номінального діаметру зразка  $d_n$ , як якості якого прийнятий діаметр зразка після стискання при середньому коефіцієнті тертя на торцях зразка  $\mu_{cp} = 0$ .

Номінальний діаметр зразка що визначається з умови постійності об'єму з рівняння:

$$d_n = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h_i}} \quad (18)$$

де  $h_0$  – початкова висота зразка;  $h_i$  – висота зразку в даний момент часу;  $d_0$  – початковий діаметр зразка.

Для отримання залежності фактичного діаметру від номінального, виконано моделювання процесу стискання стандартних зразків з різними середніми коефіцієнтами тертя на торцях зразка, для чого при проведенні віртуальних випробувань вимірюється максимальний діаметр зразка  $d_\phi$  через певні проміжки часу.

З віртуального експерименту на стискання було встановлено, що середній коефіцієнт тертя на торцях зразка, що стискається, робить вплив на максимальний діаметр бочки, який у свою чергу залежить від міри пластичної деформації зразка (рис. 2).

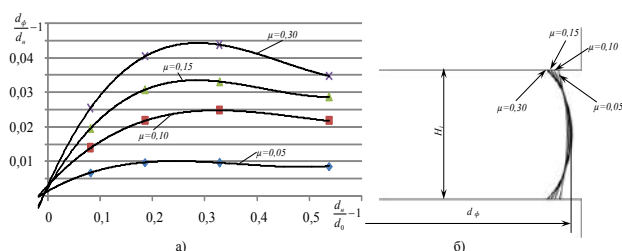


Рис. 2 – Вплив номінального діаметру  $d_n$  зразка, що стискається, на його фактичний діаметру  $d_f$  при різних коефіцієнтах тертя  $\mu$  (а)

і вплив коефіцієнта тертя на форму бічної поверхні стиснутого зразка (б)

По визначеннях, за прийнятою методикою даним, методом найменших квадратів отримана залежність:

$$\frac{\Delta R_i}{h_i} = 0,0683 \varepsilon_p^{0,83} \left(1 - e^{-26,7 \mu^{1,53}}\right) \quad (19)$$

$$\text{де } \Delta R_i = \left( \frac{d_f - d_{ном}}{2} \right);$$

$$\varepsilon_p = -\ln \frac{h_i}{h_0} - \text{ступінь пластичної деформації}$$

зразку в даний момент часу.

Із співвідношень (18) можна отримати значення середнього коефіцієнту тертя на торцях зразка:

$$\mu = \left( \frac{\ln \left( 1 - \frac{\Delta R_i}{h_i} \varepsilon_p^{-0,83} \right)}{-26,7} \right)^{\frac{1}{1,53}} \quad (20)$$

## Висновки

Отримана залежність впливу коефіцієнта тертя між опорами і випробовуваним зразком у експериментах на стискання з проведених віртуальних експериментів, що дозволило визначити залежність істинних напружень від істинних деформацій як при кімнатних температурах так і при температурах до 900 °C.

## Список літератури

1. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. Москва: Изд-во Мир, 1975. 592 с.
2. Пальмов В. А. Колебания упруго-пластических тел. Москва: Изд-во Наука, 1976. 328 с.
3. Пальмов В. А. Теория определяющих уравнений в нелинейной термомеханике деформируемых тел. Учебное пособие. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008. 113 с.
4. ASTM E9-19, Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
5. ASTM E209-18, Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with

Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

6. Song, I., Park C., Choi H. C. Synthesis and properties of molybdenum disulphide: from bulk to atomic layers. *RSC Adv.* 2015. № 5. P. 7495 – 7514. doi: 10.1039/C4RA11852A.
7. Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke, C. Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants.* 2014. № 2. P 44 – 65. doi:10.3390/lubricants2020044.
8. Romero V., Black A., Orient G., Antoun B. Propagating Stress-Strain Curve Variability in Multi-Material Problems: Temperature-Dependent Material Tests to Plasticity Models to Structural Failure Predictions. *In Engineering Failure Analysis.* 2019. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.90357.
9. Довгополов А. Ю., Некрасов С. С., Жигилий Д. О. Моделювання напружено-деформованого стану роз'ємного з'єднання в деталях з армованих композиційних матеріалів методом СЕА. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. Харків : НТУ «ХПІ». 2019. № 5 (1330). С. 10-17. doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.*

## References (transliterated)

1. Trusdell K. *Pervonachal'nyj kurs racional'noj mekhaniki sploshnyh sred [An initial course in rational continuum mechanics]*. Moscow, Edition Mir, 1975. 592 p.
2. Pal'mov V. A. *Kolebaniya uprugoplasticheskikh tel [Vibrations of elastic-plastic bodies]*. Moscow, Edition Nauka, 1976. 328 p.
3. Pal'mov V. A. *Teoriya opredelyayushchih uravnenij v nelinejnoj termomekhanike deformiruemym tel [The theory of constitutive equations in nonlinear thermomechanics of deformable bodies]*. SPb: Edition SPbGPU, 2008. 113 p.
4. ASTM E9-19, Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
5. ASTM E209-18, Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
6. Song I., Park C., Choi H. C. Synthesis and properties of molybdenum disulphide: from bulk to atomic layers. *RSC Adv.* 2015, Vol. 5, pp. 7495 – 7514, doi: 10.1039/C4RA11852A.
7. Zhang Z. J., Simionesie D., Schaschke, C. Graphite and Hybrid Nanomaterials as Lubricant Additives. *Lubricants.* 2014, Vol. 2, pp. 44 – 65, doi: 10.3390/lubricants2020044.
8. Romero V., Black A., Orient G., Antoun B. Propagating Stress-Strain Curve Variability in Multi-Material Problems: Temperature-Dependent Material Tests to Plasticity Models to Structural Failure Predictions. *In Engineering Failure Analysis.* IntechOpen, 2019, doi: 10.5772/intechopen.90357.
9. Dovgoplov A., Nekrasov S., Zhyhylii D. Strain-stress states simulation of detachable joint for reinforced composites by FEM. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, 5 (1330), pp. 10–16, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.02.

### Відомості про авторів (About authors)

**Некрасов Сергій Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри технологія машинобудування, верстати та інструменти, м. Суми, Україна; e-mail: nekrasovss@gmail.com

**Sergii Nekrasov** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Sumy State University, associate professor at the Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy, Ukraine; e-mail: nekrasovss@gmail.com

**Довгополов Андрій Юрійович** – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, викладач кафедри технологія машинобудування, верстати та інструменти, м. Суми, Україна; e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net

**Andrii Dovhopolov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Sumy State University, lecturer at the Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy, Ukraine; e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net

**Жигилій Дмитро Олексійович** – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, старший викладач кафедри загальної механіки та динаміки машин, м. Суми, Україна, e-mail: zhigiliy.d@gmail.com

**Dmytro Zhyhylii** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer at the Department of General Mechanics and Dynamics of Machines, Sumy, Ukraine; e-mail: zhigiliy.d@gmail.com

**Бараненко Андрій Володимирович** – Сумський державний університет, магістрант кафедри технологія машинобудування верстати та інструменти, м. Суми, Україна.

**Andrii Baranenko** – Sumy State University, undergraduate at the Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy, Ukraine.

**Сидоров Юрій Євгенійович** – Сумський державний університет, магістрант кафедри технологія машинобудування верстати та інструменти, м. Суми, Україна;

**Yurii Sydorov** – Sumy State University, undergraduate at the Department of Mechanical engineering technology, Machines and Tools, Sumy, Ukraine.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Некрасов С. С., Довгополов А. Ю., Жигилій Д. О., Бараненко А. В., Сидоров Ю. Є. Розробка методики ідентифікації визначального рівняння пластичних сталей шляхом дослідження на стискання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 40-45. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.06.

*Please cite this article as:*

Nekrasov S., Dovhopolov A., Zhyhylii D., Baranenko A., Sydorov Yu. Development of constitutive equations identifying methodology for steels for plastic moulding by compression testing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 40-45, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.06.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Некрасов С. С., Довгополов А. Ю., Жигилій Д. А., Бараненко А. В., Сидоров Ю. Є. Разработка методики идентификации определяющего уравнения пластичных сталей путем исследования на сжатие. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 40-45. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.06.

**АННОТАЦІЯ** В статті виконан аналіз впливу коефіцієнта тертя на процес деформування циліндричного зразка із пластичних сталей при сжатті. Розглянута методика дозволяє визначити залежність істинних напружень від істинних деформацій із випробувань на сжаття. Встановлено, що причиною бочкообразності сжимаемого зразка із пластичної сталі являється виключно тертя між поверхностями випробуемого зразка і опору. Для зменшення впливу тертя на визначення діаграми напруження-деформації, стандартна методика пропонує використовувати різні прийоми зниження тертя, це можуть бути спеціальні смазки або зміна форми опорних поверхностей зразка. Але всі ці підходи неможливо використовувати при визначенні діаграми напруження-деформації при температурах вище 300 °С, оскільки використання смазок стає неможливим. Для визначення впливу коефіцієнта тертя на форму сжимаемого зразка, авторами запропоновано провести модельний експеримент процесу сжаття пластичної сталі з різними коефіцієнтами тертя при інших рівних умовах. Такий підхід дозволяє визначити вплив коефіцієнта тертя і порівняти результати з натурним експериментом. Отримана діаграма сжаття пластичної сталі із натурального експерименту дозволяє визначити залежність істинних напружень від істинних деформацій, використовуючи яку стає можливим розрахувати коефіцієнти визначального рівняння моделі матеріала, необхідного для проведення модельних експериментів пластичного деформування сталей як при кімнатних температурах так і при температурах до 900 °С з урахуванням впливу пластичних деформацій. Запропонована методика так же дозволяє отримувати залежність істинних напружень від істинних деформацій і зміну коефіцієнта тертя між торцями зразка і опорами при впливі підвищених температур, чого не дозволяють використовувати стандартні методики проведення випробувань. Показано, що вихідними даними для визначення залежності істинних напружень від істинних деформацій є різниця діаметрів зразка і діаграма сила-переміщення.

**Ключові слова:** деформація; метод кінцевих елементів; пластичні сталі; істинні напруження; моделювання; сжаття

Надійшла (received) 01.12.2020

УДК 621

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.07

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ЦИЛІНДРА ВИСОКОГО ТИСКУ ТУРБИНИ K-1000-60/1500-2 БЛ. №4 БАЛАКОВСЬКОЇ АЕС

І. А. ПАЛЬКОВ<sup>1</sup>, С. А. ПАЛЬКОВ<sup>1</sup>, О. І. ІЩЕНКО<sup>1</sup>, О. П. АВДЄЄВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АТ «Турбоатом», м. Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup>кафедра турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: igorpalkov@i.ua

**АНОТАЦІЯ** Підвищення потужності енергоблоків атомних станцій є світовою тенденцією та широко реалізується в країнах Європи та Сполучених шатах Америки. Зазвичай роботи з підвищення потужності блоків атомних станцій проводяться під час планових реконструкцій. Особливостями такої реконструкції є часткова заміна обладнання, що у порівнянні з повною дає значну економію ресурсів. Використання такого підходу дозволяє частково замінити елементи проточної частини, що в свою чергу виконується з метою для забезпечення необхідних параметрів течії в проточній частині турбомашини, а також дозволяє повторно використовувати не модифіковані елементи конструкції. Ця стаття містить узагальнення досвіду АТ «Турбоатом» з проведення вдосконалення циліндру високого тиску, а також розглядаються конструктивні особливості проекту модернізації турбоустановки K-1000-60/1500-2 блоку 4 Балаковської АЕС виробництва ПАТ «Турбоатом». В рамках проекту модернізації АТ «Турбоатом» виконав комплекс теплових і міцнісних розрахунків ЦВТ турбіни K-1000-60/1500-2 з урахуванням підвищення теплової потужності реактора до 3210 МВт з використанням існуючих деталей і вузлів. Прийняті конструкторські і схемні рішення в проекті модернізації турбоустановки K-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС і високий ступінь уніфікації її елементів, відпрацьованих і освоєних у виготовленні і експлуатації на станціях, сприяють підвищенню якості її технічного обслуговування і ремонтів, дозволяють вважати, що ця турбоустановка матиме високі техніко-економічні показники, а також забезпечують її високу конкурентоспроможність на зовнішньому ринку. Удосконалена проточна частина ЦВТ оснащена розвиненою системою видалення вологи. Відведення вологи з міжвінцевих зазорів здійснюється системою дренажних отворів в надбандажних козирках діафрагм. Волога з межступеневих зазорів відводиться в камери видалення вологи за робочими лопатками. Ефективність видалення вологи за робочими лопатками забезпечується конічним меридіональним обводом робочих лопаток і вологосборними канавками на бандажах робочих лопаток. Розрахункова величина збільшення електричної потужності турбоустановки K-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС при підвищенні теплової потужності реактора до 3210 МВт становить 52,56 МВт.

**Ключові слова:** атомна енергетика; реакторна установка; турбоустановки; модернізація; підвищення потужності

## IMPROVEMENT OF THE HIGH PRESSURE CYLINDER OF THE TURBINE K-1000-60/1500-2 OF THE BALAKOVO NPP 4-th BLOCK

I. PALKOV<sup>1\*</sup>, S. PALKOV<sup>1</sup>, O. ISHCHEENKO<sup>1</sup>, O. AVDIEIEVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC "Turboatom", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of turbine construction, National technical university "Kharkiv technical institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Increasing the capacity of nuclear power plants is a global trend and is widely implemented in Europe and the United States. Usually, work to increase the capacity of nuclear power units is carried out during planned reconstructions. Features of such reconstruction are partial replacement of the equipment that in comparison with full gives considerable economy of resources. The use of this approach allows partially replacing the elements of the flow part, which in turn is performed in order to provide the necessary flow parameters in the flow part of the turbomachine, and also allows reusing unmodified structural elements. This article summarizes the experience of JSC "Turboatom" in improving the high pressure cylinder, as well as the design features of the project to modernize the turbine K-1000-60 / 1500-2 unit 4 Balakovo NPP produced by JSC "Turboatom". As part of the modernization project, JSC "Turboatom" performed a set of thermal and strength calculations of the HPC of the turbine K-1000-60 / 1500-2, taking into account the increase in thermal capacity of the reactor to 3210 MW using existing parts and assemblies. The design and circuit decisions in the project of modernization of the turbine K-1000-60 / 1500-2 4-th block Balakovo NPP and a high degree of unification of its elements, worked out and mastered in the manufacture and operation of stations, improve the quality of its maintenance and repairs, allow us to believe that this turbine will have high technical and economic performance, as well as ensure its high competitiveness on the outside market. The advanced flowing part of HPC is equipped with the developed system of removal of moisture. Moisture removal from the intercrown gaps is carried out by a system of drainage holes in the diaphragm visors. Moisture from the interstage gaps is discharged into the moisture removal chamber behind the blades. The efficiency of moisture removal behind the blades is provided by a conical meridional circumference of the blades and moisture-collecting grooves on the bandages of the blades. The estimated value of the increase in electric power of the turbine K-1000-60 / 1500-2 4-th block Balakovo NPP with increasing the thermal capacity of the reactor to 3210 MW is 52.56 MW.

**Keywords:** nuclear power; reactor plant; turbine plants; modernization; power increase

### Вступ

Підвищення потужності енергоблоків вже стало загальносвітовою тенденцією, а «піонерами» в

реалізації програми були атомні станції США. У 1997 році Комітетом ядерного регулювання була збільшена потужність 110 реакторів на 4700 МВт, при цьому на



декількох АЕС потужність збільшена на 20%. Перший дозвіл на реалізацію програми було отримано в 1998 році. Вже до 2006 року в США за рахунок приросту потужності на діючих енергоблоках було досягнуте додаткове вироблення, у порівнянні з роботою чотирьох додаткових енергоблоків.

АТ «Турбоатом» за роки свого існування виробило багато турбін для різних країн світу. Тому коли постало питання підвищення їх ефективності завод разом з провідними науковцями у галузі турбінобудування реалізувало проект удосконалення циліндра високого тиску турбіни К-220-44-2М АЕС «Ловііса» [1-3] в Фінляндії, де експлуатується ВВЕР-440.

Там практично відразу приступили до їх модернізації і довели теплову потужність до рівня 109,1%. Аналогічні програми реалізовані на АЕС «Пакш» в Угорщині, з підвищенням теплової потужності до 108%, на АЕС «Богуніце» в Словаччині – до рівня 104%, на АЕС «Моховце» в Словаччині – до рівня 107%. Дуже багато робіт у світі присвячено дослідженням вчених з підвищення ефективності турбін [4-9].

Програмою розвитку атомної енергетики більшості країн до 2030 року передбачено введення потужностей до 60 ГВт зі збільшенням частки атомної енергетики у виробленні електроенергії приблизно до 33%.

В даний час атомна енергетика залишається важливим фактором розвитку світової економіки і є надійним і економічно вигідним способом забезпечення електроенергією. Збереження і нарощування виробництва електроенергії атомно-енергетичною галуззю забезпечується будівництвом нових енергоблоків АЕС і підвищенням віддачі і продовженням терміну експлуатації діючих енергоблоків.

Другий напрямок, забезпечує модернізацією діючих енергоблоків, рівносильно будівництву нових, але обходиться істотно дешевше. Тому в сучасних складних економічних умовах воно є важливою складовою подальшого розвитку атомно-енергетичного комплексу та стало загальносвітовою практикою.

Сьогодні, розроблена і реалізується програма ступеневого підвищення потужності реакторів типу ВВЕР в початковому періоді до 104, 107, 110, 112% за рахунок зміни функціонування обладнання без його глибокої модернізації.

Останнім часом на АЕС впроваджувалися роботи по підвищенню теплової потужності серійних реакторів ВВЕР-1000 до 3120 МВт (104%) на існуючих енергоблоках (Балаковська АЕС, Калінінська АЕС, Ростовська АЕС), а також на АЕС «Козлодуй», Болгарія.

Підвищення електричної потужності блоків АЕС при форсуванні теплової потужності реакторної установки (РУ) можливо при відповідній оптимізації роботи неядерних складових АЕС, зокрема

турбоустановок. Це пов'язано з необхідністю модернізації турбоустановок для узгодження з підвищенням паропроductивності РУ при забезпеченні її ККД і надійності на сучасному рівні, так як збільшення цих показників прямо веде до збільшення електричної потужності і річного виробітку електроенергії і, відповідно, до зниження питомих капіталовкладень.

Відповідно до технічних умов ТУ 108.1055-82 «Турбіна парова К-1000-60/1500-2» номінальна потужність турбіни складає 1114 МВт при витраті свіжої пари 6430 т/год, і відповідна теплова потужність реактора – 3200 МВт [10].

При цьому 1 ступінь ЦВТ турбіни має довжини напрямних і робочих лопаток відповідно 98 мм і 104 мм, а їх площі прохідних перетинів становлять 1342 см<sup>2</sup> і 2220 см<sup>2</sup>.

У зв'язку з наявним обмеженням теплової потужності величиною 3000 МВт, АТ «Турбоатом» в турбінах К-1000-60/1500-2 виконав заміну 1-го ступеня ЦВТ для приведення у відповідність пропускної здатності турбіни до фактичної паропроductивності парогенераторів, збільшення спрацьованого теплоперепаду і підвищення електричної потужності. При цьому довжини напрямних і робочих лопаток були зменшені відповідно до 75 мм і 82 мм, а їх площі прохідних перетинів становить 1068 см<sup>2</sup> і 1595 см<sup>2</sup>.

По випробуваннях «Южтехенерго» на енергоблоці ст.№4 Запорізької АЕС при незмінній теплової потужності реактора 3000 МВт за рахунок зазначеної модернізації 1 ступеня ЦВТ підвищення електричної потужності склало 21 МВт. При цьому запас по пропускній здатності проточної частини вийшов мінімальним, і практично не дозволяв реалізувати роботу енергоблоку при підвищенні теплової потужності реактора понад 3000 МВт [11].

При підвищенні теплової потужності реактора до 3120 МВт збільшується витрата свіжої пари і необхідно було збільшення пропускної здатності проточної частини турбіни.

Це забезпечувалося за рахунок заміни соплових апаратів і робочих лопаток 1 ступеня ЦВТ (збоку регулятора і сторони генератора) на нові, зі збільшеними площами прохідних перетинів.

Модернізовані соплові апарати і робочі лопатки 1 ступеня ЦВТ встановлювалися в існуючий ЦВТ без змін корпусів і роторів. При цьому довжини нових напрямних і робочих лопаток виконані з їх попередньою довжиною (98 мм і 104 мм), а їх площі прохідних перетинів (1136 см<sup>2</sup> і 1889 см<sup>2</sup>) прийняті з забезпеченням мінімальних втрат в СРК турбіни (~3%) при збереженні номінальних параметрів свіжого пару (60 кгс/см<sup>2</sup> абс. і вологість 0,5%).

Розрахункова величина збільшення електричної потужності турбоустановки К-1000-60/1500-2 при підвищенні теплової потужності реактора до 3120 МВт становить 38,7 МВт.



Зазначена модернізація була виконана на всіх працюючих блоках АЕС з турбінами К-1000-60/1500-2 виробництва АТ «Турбоатом».

Для блоків 3 і 4 Ростовської АЕС була поставлена задача доведення номінальної електричної потужності блоків до 1100 МВт при збереженні досягнутої теплової потужності реактора  $Q_r = 3120$  МВт (104%). Це було досягнуто за рахунок перепрофілювання проточної частини ЦВТ, з заміною робочих лопаток 1-7 ступенів, направляючого апарату і діафрагм 2-7 ступенів обох потоків, при збереженні корпусу ЦВТ і ротора. Розрахункова величина збільшення електричної потужності турбоустановки К-1100-60/1500-2М при підвищенні теплової потужності реактора до 3120 МВт і при новій проточній частині ЦВТ становить  $\sim 10$  МВт, при цьому фактичне значення склало  $\sim 13$  МВт.

Роботи з підвищення теплової потужності РУ ВВЕР-1000 до 104% від номінальної стали основою для проведення подальших досліджень.

В даний час розглянута принципова можливість і економічна доцільність поетапного підвищення потужності блоків АЕС з ВВЕР-1000 до рівня 107% (3210 МВт) від номінальної. Обрано референтний блок №4 Балаковської АЕС, з подальшим поширенням накопиченого досвіду на інші діючі блоки АЕС.

Атомна електростанція Балаковская АЕС укомплектована чотирма турбінами другої модифікації К-1000-60/1500-2, зданими в експлуатацію в період між 1985-1993г.г. Від турбін першої модифікації турбіни другої модифікації відрізняються відсутністю циліндру середнього тиску, збільшеною кількістю ступенів з 5-ти до 7-ми в циліндрі низького тиску та підвальним розташуванням конденсаторів.

З урахуванням досягнутого рівня підвищення теплової потужності РУ Балаковської АЕС АТ «Турбоатом» розробив проект модернізації ЦВТ.

Модернізація проточної частини ЦВТ, аналогічна запропонованій, виконана в 2011-2012 рр. на раніше виготовленій турбіні з переоблопаченням ЦВТ на блоці №3 Ростовської АЕС, яка була введена в експлуатацію в грудні 2014 р., а також в 2014 р. при виготовленні нового ЦВТ турбіни для блоку №4 Ростовської АЕС, що знаходилась на монтажі та була заплановано введення в експлуатацію в грудні 2017р.

### Мета роботи

Метою роботи є узагальнення досвіду з проектування та модернізації турбін для підвищення ефективності роботи станцій та збільшення видобутку електричної енергії.

### Основні положення модернізації

В рамках проекту модернізації АТ «Турбоатом» виконав комплекс теплових розрахунків та розрахунків на міцність ЦВТ турбіни К-1100-60/1500-2 з урахуванням підвищення теплової потужності реактора до 3210 МВт з використанням існуючих деталей та вузлів.

В якості вихідних даних при модернізації ЦВТ турбіни К-1000-60 / 1500-2 блок №4 Балаковської АЕС, приймалися такі положення:

- збереження початкових параметрів пари;
- збереження конструктивної схеми турбіни і її допоміжного устаткування, фундаменту;
- збереження структурної схеми турбоустановки і теплообмінного обладнання;
- збереження існуючого зовнішнього корпусу і ротора ЦВТ.

Для забезпечення пропуску збільшеного витрати пара була виконана модернізація проточної частини 1-7 ступенів ЦВТ зі збереженням внутрішнього корпусу і обойм діафрагм, а також з використанням резервного ротора високого тиску, що знаходиться на Балаковській АЕС, попередньо облопаченого, проточеного і відбалансованого на АТ «Турбоатом». Передбачається, що демонтований ротор після переоблопачування з остаточної механообробкою і балансуванням може бути використаний при модернізації на черговому енергоблоці №2 Балаковської АЕС.

Роботи з демонтажу існуючих робочих лопаток і облопачування ротора з остаточної механообробкою і балансуванням виконувалися в умовах АТ «Турбоатом», що дозволило забезпечити високу точність зборки, міцність і вібраційну надійність при експлуатації.

При модернізації були замінені тільки робочі лопатки і діафрагми 1-7 ступенів (боку регулятора і сторони генератора).

Основними факторами, що забезпечують ефективність і експлуатаційну надійність зазначеної модернізації, є [12]:

- відповідність пропускну здатності проточної частини витраті пару при тепловій потужності реактора 107% (3210 МВт);
- оптимальний розподіл теплоперепаду між ступенями за умови забезпечення необхідних тисків І і ІІ відборів зі зміною довжин направляючих і робочих лопаток 1, 3, 4 ступеней;
- оптимізація меридіональних обводів проточної частини;
- застосування вдосконалених профілів перетинів напрямних і робочих лопаток;
- застосування у всіх ступенях цільнофрезерованих бандажів робочих лопаток з кільцевою перев'язкою бандажними вставками типу «ластівчин хвіст»;
- виконання ступеня реактивності ступенів із забезпеченням «відсмоктування» пару з кореневої

зони через міжвінцевий зазор в паророзвантажувальні отвори;

– в конструкції проточної частини особливу увагу приділено питанням видалення вологи.

На підставі цих змін в модернізованому ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2 на всіх ступенях, в порівнянні з існуючими турбінами, встановлені нові робочі лопатки 1-го ... 7-го ступенів, сопловий апарат 1-го ступеня і діафрагми 2-го ... 7-го ступенів.

За рахунок впровадження перерахованих вище заходів модернізована проточна частина ЦВТ забезпечує підвищення ККД циліндра на 2,9%.

Все обладнання, що поставляються, відповідає існуючому корпусу ЦВТ, ротору, муфтам і іншим сполучальним вузлам модернізованої турбіни.

### Особливості конструкції модернізованих вузлів турбіни

Турбіна була розрахована для роботи за умов і значеннях основних параметрів, наведених у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні параметри

| Найменування                                                                        | Величина |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Теплова потужність реактора, МВт                                                    | 3210     |
| Номінальні параметри свіжої пари перед клапанами ЦВТ:                               |          |
| витрата, т/год                                                                      | 6323.15  |
| тиск, кг/см <sup>2</sup>                                                            | 60.35    |
| температура, °С                                                                     | 274.6    |
| ступінь сухості                                                                     | 0.995    |
| Температура проміжного перегріву пари (після СПП), °С                               | 257.8    |
| Втрата тиску пара в тракці проміжного перегріву (Від вихлопу ЦВТ до входу в ЦНТ), % | 9        |
| Розрахункова тиск пара в конденсаторі, кг/см <sup>2</sup>                           | 0.0314   |
| Номінальний тиск пара в деаераторі, кг/см <sup>2</sup>                              | 6.85     |
| Номінальний масовий витрата живильної води, т/год                                   | 6323.15  |
| Температура живильної води, °С                                                      | 220.6    |

### Удосконалення проточної частини ЦВТ

Поздовжній розріз існуючого циліндру високого тиску турбіни К-1000-60/1500-2 бл. №4 Балаковської АЕС з урахуванням проведених етапів модернізації представлено на рисунку 1 [13,14].

Модернізований ЦВТ (рис. 2) має той же корпус. Нові вузли встановлюються без доробок корпусу.

Нові робочі лопатки високого тиску мають різний (як постійний, так і змінний) профіль по висоті, що забезпечує високі аеродинамічні характеристики проточної частини при оптимальному розподілі параметрів пару. Кожна лопатка піддається ретельному контролю.

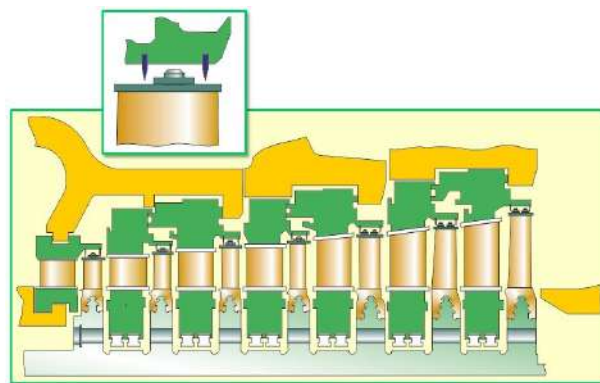


Рис. 1 – Поздовжній переріз існуючого ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2

Хвостовики робочих лопаток високого тиску мають двох і трьохопорну грибовидну конструкцію, що має високу технологічність та надійність. Точність виготовлення і обробки хвостовиків лопаток і грибків дисків, на які насаджуються лопатки, досягається застосуванням верстатів з ЧПУ і спеціальних пристосувань з подальшим ретельним контролем якості збірки.

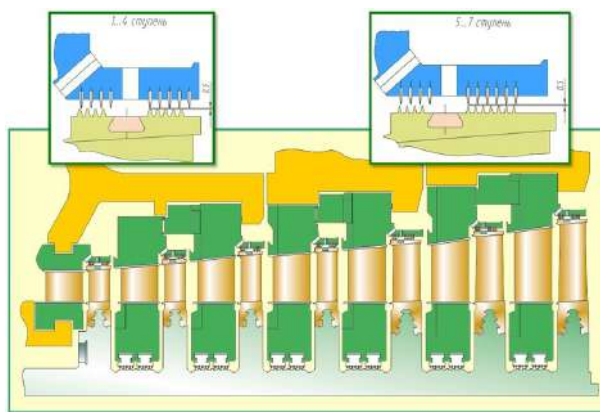


Рис. 2 – Поздовжній переріз модернізованого ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2

Замкові лопатки високого тиску кріпляться на диску за дві сусідні предзамкові лопатки двома штифтами.

Всі робочі лопатки високого тиску обандажені. Лопатки з першої по сьому ступінь високого тиску виконані з цільнофрезерованою бандажною полицею.

Застосування цільнофрезерованих бандажів робочих лопаток з кільцевої перев'язкою бандажними вставками типу «ластівчин хвіст» забезпечує надійні вібраційні характеристики облопачування. Бандажі, будучи системами конструкційного демпфірування, різко знижують амплітуди коливань лопаток від збуджуючих змінних аеродинамічних сил, забезпечуючи високу вібраційну надійність системи облопачування.

Застосування цільнофрезерованих бандажів робочих лопаток дозволяє виконати у всіх ступенях турбіни багаторядні осерадіальні надбандажне ущільнення, відмінною рисою яких є збільшена кількість дроселів, перехід від прямооточного течії в ущільненнях до зигзагоподібного і відповідне зниження коефіцієнтів витрати. Різні за своєю величиною кроки ущільнювачів гребенів в надбандажних козирках і бандажах робочих лопаток забезпечують малі еквівалентні зазори. Розрахунки свідчать про те, що застосування осерадіального ущільнення знижує надбандажну протічку в 4...5 разів у порівнянні з прямооточним ущільненням. Аналіз показує, що навіть при випадковому руйнуванні одного або двох рядів ущільнювальних вусів в осерадіальному ущільненні еквівалентний зазор цього ущільнення залишається меншим, ніж в прямооточному ущільненні.

Оскільки в осерадіальному ущільненні визначальним є витік робочого тіла через осьовий зазор між ущільнювальними вусами, на відміну від радіального зазору в прямооточному ущільненні, осерадіальне ущільнення виключає можливість виникнення низькочастотної вібрації ротора, що має особливо важливе значення для ЦВТ парових турбін великої потужності.

Звисають з боку паровпуску частини бандажа робочих лопаток і вусики в корені робочих лопаток підвищують економічність ступенів як за рахунок оптимізації міжвінцевого осьового зазору і зменшення надбандажного витоку, так і за рахунок обтікання активної частини робочих лопаток потоком з вирівняними слідами крайок напрямних лопаток.

Модернізація проточної частини крім заміни робочих лопаток також включала заміну діафрагм на нові зварні, з матеріалів, відповідних температурі, тиску і вологості пара модернізованого циліндра.

Направляючі лопатки в кореневій і периферійній частинах зварені в бандажну стрічку, і отримана направляюча решітка приварена до тіла і ободу діафрагми.

У всіх ступенях ЦВТ використовуються профілі направляючих лопаток зі збільшеним моментом опору за рахунок подовження вхідної частини профілю. Виконані розрахункові дослідження показали, що таке подовження профілю дозволило стабілізувати обтікання профілю при відхиленні кута натікання на нерозрахованих режимах. Також в профілях напрямних лопаток оптимізована вхідна та стоншена вихідна кромка забезпечили зниження

профільних і кромкових втрат в ступенях. Геометрія профілів і кількість напрямних і робочих лопаток забезпечують мінімальні значення профільних і кінцевих втрат. Оптимізація відносних кроків напрямних лопаток і співвідношення кількості напрямних і робочих лопаток забезпечує мінімальні значення змінних аеродинамічних сил, що діють на робочі лопатки.

Використані профілі напрямних і робочих лопаток дозволяють забезпечити високу економічність ступенів в широкому діапазоні режимних параметрів.

З метою мінімізації протікання в ступенях, між валом і діафрагмою в корпусі високого тиску застосовувалися ущільнення лабіринтового типу зі ступінчастим валом. Підпружинені сегменти ущільнень встановлювалися в Т-подібний паз тіла діафрагм.

Діафрагмові ущільнення виконані ступінчастими. Відмінною особливістю цих ущільнень є те, що кількість сегментів в кожному ущільнювальному кільці вибирається з умови неприпустимості їх перекосів і забезпечення гідростатичного притиснення сегментів кілець ущільнювачів до кільцевих посадочних поверхонь. У діафрагменних ущільненнях використовуються кручені пружини, що мають менший рівень напружень в порівнянні з плоскими.

Удосконалена проточна частина ЦВТ оснащена розвиненою системою видалення вологи. Відведення вологи з міжвінцевих зазорів здійснюється системою дренажних отворів в надбандажних козирках діафрагм. Волога з міжступеневих зазорів відводиться в камери видалення вологи за робочими лопатками. Ефективність видалення вологи за робочими лопатками забезпечується конічним меридіональним обводом робочих лопаток і вологосборними канавками на бандажах робочих лопаток.

Ступінь реактивності ступенів, кількість і діаметри пароразгрузочних отворів в дисках забезпечують «відсмоктування» 0,5...1% загальмованого потоку з кореневої зони ступенів в паророзвантажувальні отвори, що, як показують дослідження, помітно покращує економічність проточної частини.

Меридіональні обводи діафрагм і робочих лопаток вибиралися з міркувань забезпечення позитивних міжвінцевих і міжступеневих перекришу і зменшення перепадів на периферійних ущільненнях ступенів.

З метою усунення небалансу і забезпечення мінімальної вібрації в експлуатації і в усьому діапазоні частоти обертання при пуску і зупинці турбіни виконане динамічне балансування в декількох площинах по довжині ротора і проведені вибігові випробування з перевищенням частоти обертання на 12% понад номінальну. На рис. 3 представлений ротор ВТ в складальному цеху АТ "Турбоатом".



Рис. 3 – Модернізований ротор високого тиску турбіни К-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС

### Висновки

Модернізація проточної частини ЦВТ є логічним продовженням робіт з підвищення техніко-економічних показників і продовження паркового ресурсу турбін типу К-1000-60/1500. Дана робота аналогічна виконаній в 2011-2012 рр. на раніше виготовленої турбіні з переоблопачуванням ЦВТ на блоці №3 Ростовської АЕС, пущеної в експлуатацію в грудні 2014 р., а також в 2014 р. при виготовленні нового ЦВТ турбіни для блоку №4 Ростовської АЕС, що знаходиться в монтажі і планованої до введення в експлуатацію в грудні 2017 р.

В рамках проекту модернізації АТ «Турбоатом» виконав комплекс теплових і міцнісних розрахунків ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2 з урахуванням підвищення теплової потужності реактора до 3210 МВт з використанням існуючих деталей і вузлів.

Прийняті конструкторські і схемні рішення в проекті модернізації турбоустановки К-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС і високий ступінь уніфікації її елементів, відпрацьованих і освоєних у виготовленні і експлуатації на станціях, сприяють підвищенню якості її технічного обслуговування і ремонтів, дозволяють вважати, що ця турбоустановка матиме високі техніко-економічні показники, а також забезпечують її високу конкурентоспроможність на зовнішньому ринку.

Розрахункова величина збільшення електричної потужності турбоустановки К-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС при підвищенні теплової потужності реактора до 3210 МВт становить 52,56 МВт.

За підсумками аналізу результатів гарантійних теплових випробувань модернізованого ЦВТ турбіни К-1000-60/1500-2 бл. 4 Балаковської АЕС буде прийнято рішення про доцільність впровадження даних заходів на аналогічних блоках АЕС.

### Список літератури

1. Швецов В. Л., Кожешкурт И. И., Бойко А. В., Усатый А. П., Солодов В. Г., Хандримайлов А. А. Совершенствование цилиндра высокого давления турбины К-220-44-2М АЭС "Ловииса". *Теплоэнергетика*. 2013. № 2. С. 22–29.
2. Бойко А. В., Усатый А. П., Руденко А. С. Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации: моногр. Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. 220 с.
3. Усатый А. П. Всережимная многопараметрическая многокритериальная оптимизация проточной части турбин в интегрированном информационном пространстве : дис. ... д-р техн. наук : 05.05.16 / Усатый Александр Павлович. Харьков, 2012. 418 с.
4. Usatyi O., Avdieieva O., Maksuta D., Tuan P. Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2047. P. 020025. doi: 10.1063/1.5081658.
5. Avdieieva O., Usatyi O., Vodka O. Development of the Typical Design of the High-Pressure Stage of a Steam Turbine. *Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer*, 2020. С. 271–281.
6. Tanuma T. Development of last-stage long blades for steam turbines. *Adv. Steam Turbines Mod. Power Plants*. 2017. P. 279–305.
7. Jang H. J., Kang S. Y., Lee J. J., Kim T. S., Park S. J. Performance analysis of a multistage ultrasupercritical steam turbine using computational fluid dynamics. *Appl. Therm. Eng.* 2015. 87. P. 352–361.
8. Weidtmann K., Bühler P., Braining E., Haj Ayed A., Lin G. High efficient steam turbine design based on automated design space exploration and optimization techniques. URL: [www.euroturbo.eu](http://www.euroturbo.eu) (accessed 2019/09/25).
9. Manassaldi J. I., Arias A. M., Scenna N. J., Mussati M. C., Mussati S. F. A discrete and continuous mathematical model for the optimal synthesis and design of dual pressure heat recovery steam generators coupled to two steam turbines. *Energy*. 2016. 103. P. 807–823.
10. *Паротурбинные установки атомных электростанций*. под ред. Ю.Ф.Косяка. – М.: Энергия, 1978. 312 с.
11. Бузлуков В. А., Теплицкий М. Г., Максименко А. А., Поручинский Т. В. Натурные испытания турбоустановки К-1000-60/1500-2 ПОАТ ХТЗ на Запорожской АЭС. *Теплоэнергетика*. 1989. №2. С. 9-15.
12. Швецов В. Л., Галацан В. Н. Работы ОАО «Турбоатом» по модернизации и совершенствованию турбин АЭС. *Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование: Сб. науч. трудов*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2007. №2. С. 6-10.
13. Левченко В. Е. Опыт ОАО «Турбоатом» в разработке и модернизации турбин для АЭС. *Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование: Сб. науч. трудов*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2010. №2. С. 5-11.
14. Гарбузов И. П., Ойberman Л. Б., Теплицкий М. Г., Флак Ю. В. Экспериментально-расчетное определение эффективности модернизации проточных частей ЦВД турбин К-1000-60/1500 ПОАТ ХТЗ. *Теплоэнергетика*. 1991. №2. С. 2-6.

## References (transliterated)

1. Shvecov V. L., Kozheshkurt I. I., Bojko A. V., Usatyj A. P., Solodov V. G., Handrimajlov A. A. Sovershenstvovanie cilindra vysokogo davlenija turbiny K-220-44-2M AJeS "Loviisa". *Teplojenergetika*, 2013, 2, pp. 22–29.
2. Bojko A. V., Usatyj A. P., Rudenko A. S. Mnogokriterial'naja mnogoparametricheskaja optimizacija protochnoj chasti osevyh turbin s uchetom rezhimov jekspluatatsii: monogr. Har'kov: NTU «KHPI», 2014. 220 p.
3. Usatyj A. P. Vserezhimnaja mnogoparametricheskaja mnogokriterial'naja optimizacija protochnoj chasti turbin v integririvannom informacionnom prostranstve : dis. ... d-r tehn. nauk : 05.05.16. Usatyj Aleksandr Pavlovich. Har'kov, 2012. 418 p.
4. Usatyi O., Avdieieva O., Maksjuta D., Tuan P. Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. *AIP Conference Proceedings*, 2018, Vol. 2047, pp. 020025, doi:10.1063/1.5081658.
5. Avdieieva O., Usatyi O., Vodka O. Development of the Typical Design of the High-Pressure Stage of a Steam Turbine. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, 2020, pp. 271–281.
6. Tanuma T. Development of last-stage long blades for steam turbines. *Adv. Steam Turbines Mod. Power Plants*, 2017, pp. 279–305.
7. Jang H. J., Kang S. Y., Lee J. J., Kim T. S., Park S. J. Performance analysis of a multistage ultrasupercritical steam turbine using computational fluid dynamics. *Appl. Therm. Eng.*, 2015, 87, pp. 352–361.
8. Weidtmann K., Bühler P., Braining E., Haj Ayed A., Lin G. High efficient steam turbine design based on automated design space exploration and optimization techniques. Available at: [www.euroturbo.eu](http://www.euroturbo.eu) (accessed 2019/09/25).
9. Manassaldi J. I., Arias A. M., Scenna N. J., Mussati M. C., Mussati S. F. A discrete and continuous mathematical model for the optimal synthesis and design of dual pressure heat recovery steam generators coupled to two steam turbines. *Energy*, 2016, 103, pp. 807–823.
10. *Paroturbinnje ustanovki atomnyh jelektrostantsij*. Pod red. Ju.F.Kosjaka. M., Jenergiya, 1978. 312 p.
11. Buzlukov V. A., Teplickij M. G., Maksimenko A. A., Poruchinskij T. V. Naturnye ispytaniya turbostanovki K-1000-60/1500-2 POAT HTZ na Zaporozhskoj AJeS. *Teplojenergetika*, 1989, 2, pp. 9–15.
12. Shvecov V. L., Galacan V. N. Raboty OAO «Turboatom» po modernizatsii i sovershenstvovaniju turbin AJeS. *Vestnik NTU «HPI». Jenergeticheskie i teplotekhnicheskie processy i oborudovanie: Sb. nauch. Trudov*, Har'kov: NTU «HPI», 2007, 2, 6–10.
13. Levchenko V. E. Opyt OAO «Turboatom» v razrabotke i modernizatsii turbin dlja AJeS. *Vestnik NTU «HPI». Jenergeticheskie i teplotekhnicheskie processy i oborudovanie: Sb. nauch. trudov*. Har'kov: NTU «HPI», 2010, 2, pp. 5–11.
14. Garbuzov I. P., Ojberman L. B., Teplickij M. G., Flak Ju. V. Jeksperimental'no-raschetnoe opredelenie jeffektivnosti modernizatsii protochnyh chastej CVD turbin K-1000-60/1500 POAT HTZ. *Teplojenergetika*, 1991, 2, pp. 2–6.

## Відомості про авторів (About authors)

**Пальков Ігор Андрійович** – заступник головного конструктора парових турбін АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4639-6595; e-mail: [igor.palkov@i.ua](mailto:igor.palkov@i.ua).

**Ihor Palkov** – Deputy Chief Designer of Steam Turbines, Turboatom JSC, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4639-6595; e-mail: [igor.palkov@i.ua](mailto:igor.palkov@i.ua).

**Пальков Сергій Андрійович** – начальник сектору конструкторського відділу АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2215-0689; e-mail: [sergpalkov@gmail.com](mailto:sergpalkov@gmail.com).

**Sergii Palkov** – head of the design department, Turboatom JSC, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2215-0689; [sergpalkov@gmail.com](mailto:sergpalkov@gmail.com).

**Іщенко Олег Ігоревич** – провідний конструктор конструкторського відділу АТ «Турбоатом»; м. Харків, Україна; e-mail: [oleg\\_ishchenko@i.ua](mailto:oleg_ishchenko@i.ua).

**Oleh Ishchenko** – leading designer of the design department, Company, City, Ukraine; e-mail: [oleg\\_ishchenko@i.ua](mailto:oleg_ishchenko@i.ua).

**Авдєєва Олена Петрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри турбінобудування; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9358-4265; e-mail: [Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua](mailto:Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua).

**Olena Avdieieva** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of turbine construction, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9358-4265; e-mail: [Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua](mailto:Olena.Avdieieva@khpi.edu.ua).

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Пальков І. А., Пальков С. А., Іщенко О. І., Авдєєва О. П. Вдосконалення циліндра високого тиску турбіни K-1000-60/1500-2 бл. №4 Балаковської АЕС. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 46–53. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.07.

*Please cite this article as:*

Palkov I., Palkov S., Ishchenko O., Avdieieva O. Improvement of the high pressure cylinder of the turbine K-1000-60/1500-2 of the Balakovo NPP 4-th block. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 46–53, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.07.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Пальков И. А., Пальков С. А., Ищенко О. И., Авдеева Е. П. Усовершенствование цилиндра высокого давления турбины К-1000-60/1500-2 бл. №4 Балаковской АЭС. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 46-53. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.07.

**АННОТАЦИЯ** Повышение мощности энергоблоков атомных станций является мировой тенденцией и широко реализуется в странах Европы и Соединенных Штатах Америки. Обычно работы по повышению мощности блоков атомных станций проводятся во время плановых реконструкций. Особенностями такой реконструкции является частичная замена оборудования, что, по сравнению с полной, дает значительную экономию ресурсов. Использование такого подхода позволяет частично заменить элементы проточной части, что в свою очередь выполняется с целью для обеспечения необходимых параметров течения в проточной части турбомшины, а также позволяет повторно использовать модифицированные элементы конструкции. Эта статья содержит обобщение опыта АО «Турбоатом» по проведению совершенствования цилиндра высокого давления, а также рассматриваются конструктивные особенности проекта модернизации турбоустановки К-1000-60 / 1500-2 блока 4 Балаковской АЭС производства ОАО «Турбоатом». В рамках проекта модернизации АО «Турбоатом» выполнил комплекс тепловых и прочностных расчетов ЦВД турбины К-1000-60/1500-2 с учетом повышения тепловой мощности реактора до 3210 МВт с использованием существующих деталей и узлов. Принятые конструкторские и схемные решения в проекте модернизации турбоустановки К-1000-60 / 1500-2 бл. 4 Балаковской АЭС и высокая степень унификации ее элементов, отработанных и освоенных в производстве и эксплуатации на станциях, способствуют повышению качества ее технического обслуживания и ремонтов, позволяют считать, что эта турбоустановка обладает высокими технико-экономическими показателями, а также обеспечивает ее высокую конкурентоспособность на внешнем рынке. Усовершенствованная проточная часть ЦВД оснащена развитой системой удаления влаги. Отвод воды из межвенцовых зазоров осуществляется системой дренажных отверстий в надбандажных козырьках диафрагм. Влага из межступеньчатых зазоров отводится в камеры удаления влаги с рабочими лопатками. Эффективность удаления влаги с рабочими лопатками обеспечивается конической меридиональной окружностью рабочих лопаток и влагосборными канавками на бандажных рабочих лопатках. Расчетная величина увеличения электрической мощности турбоустановки К-1000-60 / 1500-2 бл. 4 Балаковской АЭС при повышении тепловой мощности реактора до 3210 МВт составляет 52,56 МВт.

**Ключевые слова:** атомная энергетика; реакторная установка; турбоустановки; модернизация; повышение мощности

Надійшла (received) 30.11.2020



УДК 621.311

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.08

## ШЛЯХИ ОБМЕЖЕННЯ РІВНІВ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

I. В. ПАНТЄЛЄЄВА<sup>1</sup>, А. В. ГЛУШКО<sup>2\*</sup>

кафедра фізики, електротехніки і електроенергетики, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, УКРАЇНА  
кафедра зварювання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна  
\*e-mail: Alyona.Glushko@khp.edu.ua

**АНОТАЦІЯ** На сьогоднішній день перед Україною та світом постають важливі питання стосовно вирішення проблем енергетичної галузі, в тому числі електроенергетики. У мережах різної напруги енергосистем рівень струмів к.з. безперервно зростає, при цьому вимоги до електричних апаратів, струмоведучих частин, силових трансформаторів і конструкцій розподільчих пристроїв стають більш жорсткими. Виникає проблема оптимальної координації у динаміці параметрів електрообладнання та вимог енергосистеми або координації параметрів електрообладнання з існуючими рівнями струмів к.з. Зростання струмів к.з. в електричних мережах усіх класів напруги робить актуальною розробку нових ефективних методів і пристроїв, призначених для їх зниження. У статті розглянуті питання порівняння струму однофазних і трифазних к.з. усередненої регіональної енергосистеми, наведені інтегральні параметри електричних мереж такої системи. Детально проаналізовані обмеження струмів однофазних к.з. в проблемних вузлах, де встановлені автотрансформатори. Проведені дослідження дозволили рекомендувати вдосконалені методики розрахунків електричних апаратів та струмоведучих частин на електродинамічну і термічну стійкість при к.з., в тому числі і при однофазних. Приведені рекомендації до створення математичної моделі розрахунку нелінійної системи при наявності гнучких провідників, тому що, більшість пошкоджень (у вигляді к.з.) на високовольтних повітряних лініях електропередачі та у розподільчих пристроях супроводжується електричною дугою із параметрами, які змінюються у часі. Крім того, значні струми к.з. викликають механічні зміщення гнучких проводів у просторі, що призводить до зміни міжфазних відстаней та індуктивних опорів повітряних ліній прямої і зворотної послідовностей. Всі ці перелічені фактори надають взаємний вплив під час к.з. Крім того, при експлуатації електроустановок важливим фактором є комутаційний ресурс вимикачів, який впливає на надійність роботи установки та її техніко-економічні показники. Критерієм виводу вимикача з експлуатації може бути залишковий ресурс вимикача на рівні одного відключення повного струму відмикання вимикача. Проведений аналіз показав, що необхідно враховувати при розрахунках струмів к.з. додаткову термічну дію різних джерел енергії і енергосистеми в цілому, синхронних генераторів і компенсаторів, синхронних і асинхронних двигунів.

**Ключові слова:** коротке замикання; електрична мережа; енергосистема; високовольтний вимикач; повітряна лінія електропередачі; струмообмеження; надійність

## WAYS TO LIMIT THE LEVELS OF SHORT CIRCUIT CURRENTS IN ELECTRICAL GRIDS

I. PANTIELIEIEVA, A. GLUSHKO

Department of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, UEPA, Kharkiv, UKRAINE  
Department of Welding, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Today, Ukraine and the world face important issues related to solving the problems of the energy sector, including electricity. In networks of different voltages of power systems the level of short-circuit currents is constantly growing, while the requirements for electrical devices, live parts, power transformers and switchgear designs are becoming more stringent. There is a problem of optimal coordination in the dynamics of electrical equipment parameters and power system requirements or coordination of electrical equipment parameters with existing short-circuits current levels. The growth of short-circuit currents in electrical networks of all voltage classes makes it important to develop new effective methods and devices designed to reduce them. The article considers the issues of comparing the current of single-phase and three-phase short-circuit, average regional power system, the integrated parameters of electrical networks of such a system. Limitations of currents of single-phase short-circuits are analyzed in detail in problem nodes where autotransformers are installed. The conducted researches allowed to recommend the improved methods of calculations of electric devices and current-carrying parts on electrodynamic and thermal stability at short-circuit, including at single-phase. Recommendations for creating a mathematical model for calculating a nonlinear system in the presence of flexible conductors are given, because most of the damage (in the form of short-circuit) on high-voltage overhead power lines and switchgear is accompanied by an electric arc with parameters that change over time. In addition, significant short-circuit currents cause mechanical displacements of flexible wires in space, which leads to changes in the phase distances and inductive resistances of overhead lines of forward and reverse sequences. All these listed factors have a mutual influence during s.c. In addition, when operating electrical installations, an important factor is the switching life of switches, which affects the reliability of the installation and its technical and economic performance. The criterion for decommissioning the circuit breaker may be the residual life of the circuit breaker at the level of one tripping of the full tripping current of the circuit breaker. The analysis showed that it is necessary



*to take into account when calculating the short-circuit currents additional thermal action of various energy sources and the power system as a whole, synchronous generators and compensators, synchronous and asynchronous motors.*

**Keywords:** short circuit; electric network; power system; high - voltage switch; overhead power line; current limitation; reliability

## Вступ

Значна увага у сучасному світі та зокрема в Україні приділяється питанням розвитку енергетики. Важливими є питання стосовно енергетичного комплексу та перспектив його розвитку, енергозбереження, надійності, часу напрацювання та економічної ефективності [1–6].

Зміна соціально-економічних умов в країні викликає необхідність аналізу нових навантажувальних комплексів, визначення відносного складу споживачів та розробки методів їхнього обліку при розрахунку струмів коротких замикань (к.з.) у сучасних умовах. Актуальність цих методів значно підвищується для особливих умов коротких замикань, не облік яких може привести до значних похибок при визначенні цих струмів. А це в свою чергу, призводить до не спрацювання пристроїв релейного захисту та до відмов у роботі електрообладнання.

Питання координації струмів к.з. повинно вирішуватися з урахуванням параметрів електрообладнання, розробок їх нових видів, а також вимог до надійності та економічності режимів роботи енергосистем. Зростання струмів к.з. в електричних мережах усіх класів напруги робить актуальною розробку нових ефективних методів і пристроїв, призначених для їх зниження. Особливо це стосується мереж напругою 110 кВ і вище, коли необхідно заземлювати нейтралі блокових трансформаторів і автотрансформаторів зв'язку, що призводить до створення умов, коли струм однофазного к.з. більше струму трифазного. Ця обставина вимагає перевіряти комутаційну здатність високовольтних вимикачів по струму однофазного к.з., що робить важкими умови їх роботи, тому що однофазні к.з. виникають значно частіше (в 40 і більше раз), ніж трифазні.

При виникненні короткого замикання (к.з.) в електричній системі опір ланцюга зменшується, що веде до різкого збільшення струмів в окремих гілках системи порівняно зі струмами нормального режиму. У свою чергу це викликає зниження напруги, особливо поблизу місця к.з. У залежності від місця виникнення та тривалості пошкодження наслідки к.з. можуть мати місцевий характер, або можуть впливати на всю енергосистему. У сучасних умовах роботи необхідно враховувати велику кількість різних факторів і явищ, які впливають на зростання рівнів струмів к.з., вміти їх вірно розраховувати і обирати відповідні пристрої для обмеження цих струмів [7–9].

Проблема координації параметрів електрообладнання з існуючими рівнями струмів к.з. не нова. Вона пов'язана зі зростаннями одиничних потужностей агрегатів, електростанцій, підстанцій, енергосистем та мережі середньої і високої напруги [8]. Цю проблему можна вирішити тільки на основі

системного підходу з урахуванням динаміки зміни струмів к.з. і параметрів електрообладнання.

На даному етапі розвитку великих електроенергетичних систем задача обмеження струмів к.з. залишається невирішеною [10,11], хоча і застосовуються різні струмообмежувальні пристрої. Особлива увага приділяється методам обмеження струмів к.з. на землю.

## Мета роботи

Дослідити ефективність обмеження струмів к.з. на землю у високовольтних мережах та проаналізувати засоби обмеження цих струмів.

## Виклад основного матеріалу

Тенденція видачі потужностей електростанцій у мережі 110 кВ і, коли необхідно заземлювати нейтралі блокових трансформаторів, а також використання автотрансформаторів, що працюють із заземленими нейтралі, приводять до того, що у мережах енергосистем іноді створюються умови, коли струм однофазного к.з. більше струму трифазного. Ця обставина вимагає перевіряти комутаційну здатність вимикачів по струму однофазного к.з., що робить важкими умови їх роботи, тому що однофазні к.з. виникають значно частіше (в 40 і більше раз), ніж трифазні.

Для мереж із заземленням, коли не враховуються активні опори елементів, та при умові, що  $x_2 = x_1$ , справедливо співвідношення:

$$\frac{I_{\kappa}^{(1)}}{I_{\kappa}^{(3)}} = \frac{3}{2+a}; a = \frac{x_0}{x_1}, \quad (1)$$

де  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_0$  – еквівалентний опір схеми відповідно прямої, зворотної і нульової послідовностей відносно точки к.з. Якщо  $a < 1$ , то  $I_{\kappa}^{(1)} > I_{\kappa}^{(3)}$  і при  $a \rightarrow 0$  відповідно  $I_{\kappa}^{(1)} \rightarrow 1,5 I_{\kappa}^{(3)}$ . При формуванні електричної мережі бажано, щоб  $I_{\kappa}^{(1)} / I_{\kappa}^{(3)} \leq 1$  ( $a \geq 1$ ).

Параметр  $a$  залежить від режиму заземлення нейтралі і пов'язаний з коефіцієнтом заземлення.

$$K_z = \frac{U_{\phi.з.}}{U_{м.ном.}} = \sqrt{a^2 + a + 1} / (a + 2), \quad (2)$$

де  $U_{м.ном.}$  – номінальна напруга мережі;  $U_{\phi.з.}$  – напруга на непошкодженій фазі при однофазному к.з.

По умовам роботи ізоляції електроустановок мережі 110 кВ і вище повинні бути ефективно-заземленими, тобто в них напруга на непошкоджених фазах при к.з. на землю в будь-якій точці не повинна перевищувати 80% лінійної (1,4 фазної) номінальної.

Існуючі трансформатори напругою 110 кВ і вище та автотрансформатори 220 кВ і вище, як правило, мають ізоляцію нейтралі класу 35 кВ при одно хвилинній випробувальній напрузі 85 кВ. При цьому режим часткового розземлення нейтралей допустимий тільки для трансформаторів 110 кВ.

Для обмеження струмів однофазних к.з. у проблемних вузлах у нейтралі автотрансформаторів (АТ) 500/110 і 500/220 кВ регіональної енергосистеми були встановлені 12 струмообмежувальних реакторів з індуктивними опорами  $X_p$  [12,13]. Розрахунки показали, що дійсно, для кожної окремо взятої гілки АТ ефект струмообмеження при цьому досягав приблизно 40, 30, 15% при напрузі 110, 220, 500 кВ відповідно.

Але, насправді, частка обмеження у сумарному струмі к.з. (з врахуванням реальних параметрів зовнішньої мережі) по якому і виконується вибір і перевірка електрообладнання, є не дуже великою. Як видно з результатів аналізу роботи регіональної системи, необхідне обмеження струмів  $I_{k(1)}$  склало 5÷15, 0÷7 та 0% по вузлам мережі напругою відповідно 110, 220 та 500 кВ. Відносно невисока ефективність такого струмообмежувального заходу у розвинутій мережі викликала сумнівів у практичній доцільності введення у нейтралі автотрансформаторів, розміщених поблизу вузлів мережі, опорів та примусила ввести на шинах 110÷220 кВ стаціонарне розділення мережі.

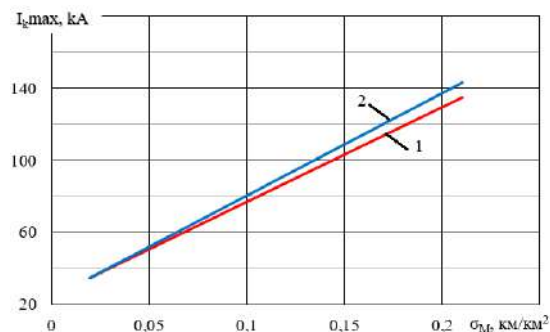
Таким чином, методи обмеження струмів однофазних к.з., що використовуються, є локальними заходами і не дуже впливають на структуру і параметри мереж так, як це відбувається при їх стаціонарному розділенні.

Максимальний струм к.з. пов'язаний з інтегральними параметрами електричних мереж, приведений в таблиці 1.

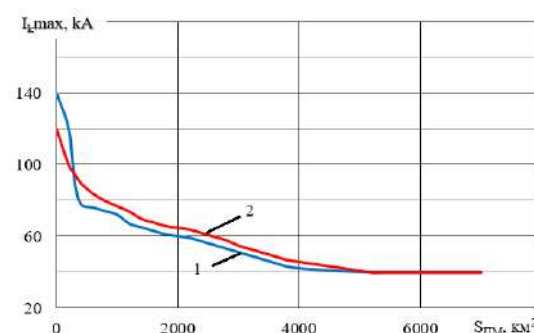
Таблиця 1 – Інтегральні параметри електричних мереж регіональної енергосистеми

| Напруга мережі, кВ | $\sigma_m$ км/км <sup>2</sup> | $S_{пм}$ , км <sup>2</sup> | $I_{сер}$ , км |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------|
| 110                | 0,2177                        | 111,1                      | 12,2           |
| 220                | 0,1029                        | 839,3                      | 28,3           |
| 500                | 0,017                         | 7833,3                     | 61,5           |

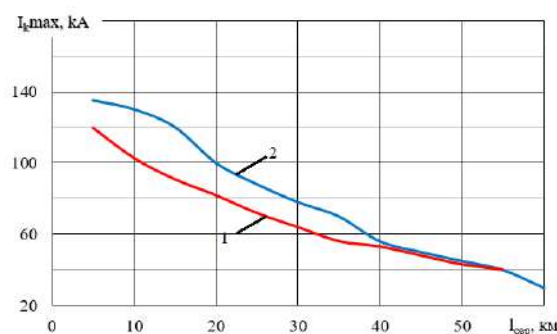
На рис. 1 побудовані залежності  $I_{k \max}$  у системі з примусово замкнутими точками стаціонарного розділення мереж від їх інтегральних параметрів.



а)



б)



в)

Рис.1 – Залежність максимального струму к.з. в електричній мережі: а) від щільності мережі, б) від площі електропостачання (на одну підстанцію), в) від середньої довжини лінії; 1 –  $I_{k(1)}$ ; 2 –  $I_{k(3)}$

Проведені дослідження дозволили розробити вдосконалені методики розрахунків провідників та електричних апаратів на електродинамічну та термічну стійкість при к.з. [13,14].

### Обговорення результатів

Зміна соціально-економічних умов в країні викликає необхідність аналізу нових навантажувальних структур, визначення відносного складу споживачів, та розробки методів їх обліку при розрахунку струмів к.з. в сучасних умовах. Актуальність цих методів значно підвищується для особливих умов к.з., не облік яких призводить до

значних похибок при визначенні струмів к.з. До особливих умов слід віднести:

- визначення струмів к.з. у вузлах з комплексними навантаженнями і автономних системах електропостачання;
- збільшення активного опору провідників внаслідок нагріву струмів к.з.
- виникнення відкритої електричної дуги на повітряних лініях (ПВЛ) електропередачі, яка може бути стійкою (або, яка сама гасне) у електроустановках з кабельними лініями 6÷10 кВ, а також у електроустановках змінного та постійного струму напругою 1 кВ;
- зміщення проводів при к.з. на ПЛ;
- к.з. в електроустановках постійного струму, які живляться від різних джерел (акумуляторних батарей, перетворювачів, генераторів).

Проведений аналіз аварійності в електроустановках напругою до і вище 1 кВ показав, що однією з основних причин не спрацювання пристроїв релейного захисту та відмов у роботі електрообладнання є не врахування сукупного впливу на струм к.з. факторів, що виникають при особливих умовах к.з. Для цього необхідно виявити та обґрунтувати склад основних факторів, необхідних для комплексного обліку нелінійності короткозамкнутих ланцюгів при розрахунках струмів к.з. [11,15].

Більшість пошкоджень у вигляді к.з. на ПЛ та у розподільних пристроях (РП) супроводжується електричною дугою із параметрами, які змінюються у часі. Значні струми к.з. викликають зміщення гнучких проводів у просторі, що призводить до зміни міжфазних відстаней та індуктивних опорів ПЛ прямої і зворотної послідовностей. Перелічені явища надають взаємний вплив під час к.з., тому виникла необхідність розробки комплексної математичної моделі розрахунку нелінійності у системах з гнучкими провідниками.

Математична модель повинна мати систему диференційних та алгебраїчних рівнянь, які описують зміни параметрів режиму к.з. у нелінійній системі під впливом наступних факторів і процесу розвитку відкритої електричної дуги в місці к.з.; руху проводів розщепленої фази; збільшення активного опору провідників при нагріванні їх струмом к.з.; зміни індуктивного опору прямої, зворотної і нульової послідовностей ПЛ; збільшення довжини проводів ПЛ внаслідок їх нагрівання (температурне подовження). Крім того, необхідно визначити характер зміни параметрів відкритої електричної дуги, наприклад, погонного індуктивного опору прямої (зворотної) і нульової послідовностей, активного і хвильового опорів при к.з. на ПЛ з різною конструкцією.

Облік сумісного впливу основних факторів нелінійності при к.з. дозволяє більш ретельно аналізувати причини і наслідки к.з., уточнювати розрахункові умови к.з., вибирати вимикачі і параметри релейного захисту, а також оцінювати

електродинамічну стійкість ПЛ і РП з гнучкою ошиновкою.

Надійність і пожежна безпека електроустановок напругою до 1 кВ залежать від достовірності розрахунків к.з. на стадії проектування, а також при налаштуванні захисту і виборі апаратів. Досвід розрахунків експлуатації [6,12,16,17] показали, що на струм к.з. суттєво впливає активний опір дуги. Відсутність методики обліку опору дуги при розрахунку струмів к.з., як у нашій країні, так і в країнах світу, призвело до необхідності проведення промислових випробувань у системі власних потреб 0,4 кВ низки електростанцій.

Відомо, що системи постійного струму складаються з комплексу різних джерел, які працюють паралельно: акумуляторних батарей, генераторів постійного струму, статичних перетворювачів. У зв'язку з цим виникають особливі умови, які потребують обліку взаємного впливу на струм к.з. вищезазначених факторів.

При експлуатації електроустановок важливим фактором є комутаційний ресурс вимикачів. Для відповіді на питання про допустимість спрацювання ресурсу вимикачів необхідно проаналізувати та узагальнити заводські відомості по комутаційному ресурсу для різних типів вимикачів. У якості критерію виведення вимикача у ремонт необхідно приймати залишковий ресурс вимикача на рівні одного відключення повного струму відмикання вимикача. При відсутності статистичних даних по конкретному вимикачу можна використовувати імовірні характеристики к.з. і струмів к.з. Для розробки імовірних характеристик к.з. треба провести аналіз системи інформації про к.з. в енергосистемі, визначити джерела інформації про к.з., зібрати й обробити статистичні матеріали. Необхідно розробити імовірні характеристики к.з., такі як: питома кількість к.з. для електроустановок різного типу і рівня напруги; розподіл к.з. по видам; розподіл к.з. по довжині лінії електропередачі; оцінена ймовірність спрацювання комутаційного ресурсу вимикача для приєднань різного типу (на РП).

## Висновки

Методи обмеження струмів однофазних к.з., які використовуються, є локальними і не впливають на структуру і параметри мереж у той мірі, як це відбувається при їх стаціонарному розділенні. Проведений аналіз показав, що можна враховувати термічну дію різних джерел енергії; енергосистеми в цілому, синхронних генераторів і компенсаторів, синхронних і асинхронних двигунів. Розроблені теоретичні положення щодо визначення струмів к.з. та їх електродинамічної і термічної дії в особливих умовах, що в сукупності дозволяє вирішувати важливі науково-технічні задачі електроенергетичної галузі.

## Список літератури

1. Концепція формування енергетичного балансу. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/99242859> (дата звернення: 01.10.2020).
2. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantielieieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 5/5(95). P. 20–28. doi: 10.15587/1729-4061.2018.144925.
3. Glushko A. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6. Iss. 1 (84). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85852.
4. Пантелєєва І. В., Шматко Н. М., Глушко А. В. Шляхи обмеження рівнів струмів короткого замикання в електричних мережах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2. С. 38–44. doi: 10.20998/2413-4295.2020.02.05.
5. Glushko A., Pantielieieva I., Shmatko N. Prospects for the development of modern energy complexes. "Progressive directions of technological complexes development". *Collection of scientific reports of IV-th international scientific and technical conference devoted to problems of higher education and science TK-2020* (June 2–4, 2020, Lutsk). Lutsk: LNTU, 2020. P. 57–58.
6. Dmytryk V.V., Glushko A.V., Iglis S.P. Structural changes in the metal of welded joints of long-term operating steam pipelines. *The Paton Welding Journal*. 2020. №2. P. 22–25. doi: 10.37434/tpwj2020.02.04.
7. Мозгалев К. В., Неклепаев Б. Н., Шунтов А. В. Токи короткого замыкания и эффективность стационарного деления электрической сети. *Электричество*. 2014. № 10. С. 32–38.
8. Роденберг Р. Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. *Энергия*, 2001. С. 2–5.
9. Ковалко М. П., Денисюк С. П. *Енергозбереження – пріоритетний напрям державної політики України*. Київ, 1998. 512 с.
10. Крючков Ц. П. *Переходные процессы в электроэнергетических системах*. Издательский дом МЭИ, 2008. 416 с.
11. Пантелєєва І. В. Проблема координації рівнів струмів короткого замикання в енергосистемах. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*. 2020. Том 31 (70). №1. С. 34–39.
12. Пантелєєва І. В. Особливості захисту від неповнофазних режимів у розподільчих мережах 6–110 кВ. *Prospects for the Development of Technical Science in EU Countries and Ukraine*. Poland. 2018. P. 125–128.
13. Popov O., Shmatko N., Budanov P., Pantielieieva I., Brovko K. Cost-effectiveness in mathematical modelling of the power unit control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol 6, № 3 (102). P. 39–48. doi: 10.15587/1729-4061.2019.183422
14. Шматко Н. М. Рекомендації щодо оцінки складників фінансового потенціалу гнучкості машинобудівного підприємництва. *Вісник НТУ «ХПІ»*, 2011. № 25. С. 79–85.
15. Шматко Н. М. Підходи до формування синергетичного ефекту в економіці. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. УкрДАЗТ, 2013. № 43. С. 103–106.
16. Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 01.11.2020).
17. Енергобаланс. URL: <http://energobalans.com/> (дата звернення: 01.11.2020).

## References (transliterated)

1. Koncepcia formuvannya energetichnogo balansu [The concept of energy balance formation]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/npas/99242859> (accessed: 01.10.2020).
2. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantielieieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2018. 5/5(95), pp. 20–28, doi: 10.15587/1729-4061.2018.144925.
3. Glushko A. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 6, Iss. 1(84), pp. 14–20, doi: 10.15587/1729-4061.2016.85852.
4. Pantielieieva I., Shmatko N., Glushko A. Ways to limit the levels of short circuit currents in electrical grids. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2, pp. 38–44, doi: 10.20998/2413-4295.2020.02.05.
5. Glushko A., Pantielieieva I., Shmatko N. Prospects for the development of modern energy complexes. "Progressive directions of technological complexes development". *Collection of scientific reports of IV-th international scientific and technical conference devoted to problems of higher education and science TK-2020* (June 2–4, 2020, Lutsk). Lutsk: LNTU, 2020, pp. 57–58.
6. Dmytryk V. V., Glushko A. V., Iglis S. P. Structural changes in the metal of welded joints of long-term operating steam pipelines. *The Paton Welding Journal*, 2020, no 2, pp. 22–25, doi: 10.37434/tpwj2020.02.04.
7. Mozgalev K. V., Neklepaev B. N., Shuntov A. V. Toky' korotkogo zamukany'ya y' efekty'vnost' stacy'onarnogo deleny'ya elektry'cheskoj sety' [Short-circuit currents and efficiency of stationary division of an electric network]. *Elektrychestvo [Electricity]*, 2014, no. 10, pp. 32–38.
8. Rodenberg R. Ekspluatatsionnye rezhymy elektroenergeticheskikh sy'stem i ustanovok [Operating modes of electric power systems and installations]. *Energia [Energy]*, 2001, pp. 2–5.
9. Kovalko M. P., Denysyuk S.P. *Energozbereshennya – priory'tetny'j napryam derzhavnoyi polityky Ukrayiny* [Energy saving is a priority of Ukraine's state policy]. Kyiv, 1998, 512 p.
10. Kryuchkov Cz. P. *Perexodnye processy v yelektroyenergeticheskyykh systemax* [Transient processes in electric power systems]. PH MYeY', 2008, 416 p.
11. Pantelyeyeva I. V. Problema koordynatsiyi rivniv strumiv korotkogo zamykannya v energosy'stemax. *Vcheni zapysky Tavriys'kogo nacional'nogo universy'tetu im. V.I. Vernads'kogo* [Scientific notes of V.I. Vernadsky Tavriya National University], 2020, Vol. 31(70), no1, pp. 34–39.
12. Pantelyeyeva I. V. Osoblyvosti zaxystu vid nepovnofaznykh rezhymiv u rozpodilchyyi merezhax 6–110 Kv [Features of protection against incomplete phase modes in distribution networks 6–110 kV]. *Prospects for the Development of Technical Science in EU Countries and Ukraine*. Poland, 2018, pp. 125–128.

13. Popov O., Shmatko N., Budanov P., Pantelieva I., Brovko K. Cost-effectiveness in mathematical modelling of the power unit control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, Vol 6, no. 3 (102), pp. 39–48, doi: 10.15587/1729-4061.2019.183422.
14. Shmatko N. M. Rekomendaciyi shhodo ocinky skladnykiv finansovogo potencialu gnuchkosti mashynobudivnogo pidpryemnytstva [Recommendations for assessing the components of the financial potential of the flexibility of machine-building entrepreneurship]. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2011, no. 25, pp. 79–85.
15. Shmatko N. M. Pidkody do formuvannya sy'nergety'chnogo efektu v ekonomici [Approaches to the formation of a synergetic effect in the economy.]. *Visnyk ekonomiky transportu i promy'slovosti. [Bulletin of Transport Economics and Industry]*. UkrDAZT, 2013, no 43, pp. 103–106.
16. Derzhavna sluzhba staty'sty'ky' Ukrayiny' [State Statistics Service of Ukraine]. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (accessed: 01.11.2020).
17. Energobalans [Energy balance]. Available at: <http://energobalans.com/> (accessed: 01.11.2020).

#### Відомості про авторів (About authors)

**Пантелєєва Ірина Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2960-2358; e-mail: [pantelieva.iura@gmail.com](mailto:pantelieva.iura@gmail.com).

**Ірина Пантелєєва** – Ph. D., Docent, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, associate professor at the Department of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2960-2358; e-mail: [pantelieva.iura@gmail.com](mailto:pantelieva.iura@gmail.com).

**Глушко Альона Валеріївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри зварювання, м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-6245-9971; e-mail: [alynaglushko@gmail.com](mailto:alynaglushko@gmail.com).

**Alyona Glushko** – Ph. D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Department of Welding, Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-6245-9971; e-mail: [alynaglushko@gmail.com](mailto:alynaglushko@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Пантелєєва І. В., Глушко А. В. Шляхи обмеження рівнів струмів короткого замикання в електричних мережах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 54-59. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.08.

*Please cite this article as:*

Pantelieva I., Glushko A. Ways to limit the levels of short circuit currents in electrical grids. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 54-59, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.08.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Пантелєєва И.В., Глушко А.В. Пути ограничения уровней токов короткого замыкания в электрических сетях. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 54-59. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.08.

**АННОТАЦІЯ** На сьогоднішній день перед Україною і миром виникають важливі питання по вирішенню проблем енергетическої отрасли, в том числі електроенергетики. В сетях различного напряжения энергосистем уровень токов к.з. непрерывно растет, при этом требования к электрическим аппаратам, токоведущих частей, силовых трансформаторов и конструкций распределительных устройств становятся более жесткими. Возникает проблема оптимальной координации в динамике параметров электрооборудования и требований энергосистемы или координации параметров электрооборудования с существующими уровнями токов к.з. Рост токов к.з. в электрических сетях всех классов напряжения делает актуальной разработку новых эффективных методов и устройств, предназначенных для их снижения. Рассмотрено сравнения тока однофазных и трехфазных к.з. усредненной региональной энергосистемы, приведенные интегральные параметры электрических сетей такой системы. Проанализированы ограничения токов однофазных к.з. в проблемных узлах, где установлены автотрансформаторы. Проведенные исследования позволили рекомендовать усовершенствованные методики расчетов электрических аппаратов и токоведущих частей на электродинамическую и термическую стойкость при к.з. (в т.ч. и при однофазных). Приведены рекомендации к созданию математической модели расчета нелинейной системы при наличии гибких проводников, потому что, большинство повреждений (в виде к.з.) на высоковольтных воздушных линиях электропередачи и в распределительных устройствах сопровождается электрической дугой с параметрами, которые изменяются во времени. Значительные токи к.з. вызывают механические смещения гибких проводов в пространстве, что приводит к изменению межфазных расстояний и индуктивных сопротивлений воздушных линий прямой и обратной последовательностей. Все эти факторы оказывают взаимное влияние при к.з. Проведенный анализ показал, что необходимо учитывать при расчетах токов к.з. дополнительную термическую действие различных источников энергии и энергосистемы в целом, синхронных генераторов и компенсаторов, синхронных и асинхронных двигателей.

**Ключевые слова:** короткое замыкание; электрическая сеть; энергосистема; высоковольтный выключатель; надежность

Надійшла (received) 09.11.2020

УДК 004. 4'275

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.09

## РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ АНІМАЦІЇ У WEB

І. М. ЄГОРОВА, М. М. КОМІНА\*

кафедра медіасистем і технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: maryna.komina@nure.ua

**АНОТАЦІЯ** У роботі запропонована методика ефективного використання анімації у веб-продуктах. Проведено дослідження сучасних технологій і методик створення анімацій для веб-сайтів, а саме розглянуті технології CSS, Javascript, Motion UI, проаналізовані плюси і мінуси їхнього використання. На основі отриманої інформації сформульовано гіпотезу та створено лінійну методику, засновану на використанні універсальної технології Motion UI. Методика передбачає послідовне виконання ряду етапів. Так, на першому етапі користувачеві рекомендується підключити бібліотеку Motion UI. На наступному етапі необхідно визначити ступінь складності анімації. У разі, коли має бути розроблено нескладну анімацію, доцільно використовувати інструменти CSS, інакше, для більш складних випадків, ефективніше використовувати можливості Javascript. В обох випадках доцільно на заключному етапі розробки анімації застосувати інструменти Sass. Завершальним етапом методики є тестування, що дозволяє оцінити якість створеної анімації. Розроблена методика застосована в роботі при створенні анімації обраного об'єкта. Проведено тестування за допомогою методу експертних оцінок з попереднім анкетуванням запрошеної фокус-групи. Експертові, в якості якого виступав професійний розробник, було запропоновано створити 20 анімацій за допомогою технологій CSS, Javascript і Motion UI для задалегідь розробленого об'єкта. Час розробки фіксувався програмним способом. Далі розроблені анімації були розглянуті фокус-групою і проведено оцінку часу завантаження ефектів на веб-сторінці за п'ятибальною шкалою. Проведений за допомогою методів математичної статистики аналіз результатів експерименту свідчить про те, що запропонована методика, яка передбачає використання технології Motion UI, дозволяє скоротити не тільки час розробки анімації, але й час її завантаження. Таким чином, можна зробити висновок, що розроблена методика відрізняється від існуючих методик високою ефективністю, в цілому відповідає очікуванням експертів і доцільна для застосування.

**Ключові слова:** методика; анімація; WEB; Motion UI; математична статистика

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR EFFECTIVE APPLICATION OF ANIMATION IN THE WEB

I. IEGOROVA, M. KOMINA

Department of Media systems and Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** This paper proposes a technique for the effective use of animation in web products. A study of modern technologies and techniques for creating animations for websites was carried out, namely, the technologies CSS, Javascript, Motion UI were considered and analyzed their pros and cons. Grounding on information obtained, a hypothesis was formulated and a linear technique was created, based on the use of the universal Motion UI technology, providing sequential execution of a number of stages. At the first stage, the user is recommended to connect the Motion UI library. The next step is to determine animation complexity. In case when you have to develop a simple animation, it is advisable to use CSS tools, otherwise, for more complex cases, it is more efficient to use the capabilities of Javascript. In both cases, it is advisable to use Sass tools at the final stage of animation development. The final stage of the methodology is testing, which allows assessing the quality of created animation. The developed technique was applied in the work when creating the animation of the selected object. Testing was carried out using the method of expert assessments with a preliminary survey of the invited focus group. The expert, who was a professional developer, was asked to create 20 animations using CSS, Javascript and Motion UI technologies for a pre-designed object. The development time was recorded with software. Further, the developed animations were given to a focus group for review and the web page effects loading time was estimated on a five-point scale. The experiment results analysis carried out using the methods of mathematical statistics indicates that the proposed method, which involves the use of the Motion UI technology, can reduce not only the animation development but loading time as well. Thus, we can conclude that the developed methodology differs from the existing methods in high efficiency. In general, the technique meets expectations of experts and is appropriate for use.

**Keywords:** technique; animation; WEB; Motion UI; math statistics

## Вступ

Розвиток нових технологій та високотехнологічного обладнання, зокрема різноманітної комп'ютерної техніки, призвів до створення нового інформаційно-комунікаційного середовища – глобальної мережі Інтернет, яка на даному етапі розвитку суспільства є найважливішою

частиною його життя, ефективним середовищем для здійснення масової комунікації. На сьогоднішній день чисельність користувачів мережі Інтернет досягло 5 млрд, і з кожним днем це число стає більше. Сучасний Інтернет наповнений величезною кількістю веб-сайтів на різноманітну тематику.

Стрімкий розвиток Інтернету та веб-ресурсів тягне за собою аналогічний розвиток різних сфер

пов'язаних із оформленням і розробкою веб-продуктів. На цей час на зміну традиційним методам розробки, приходять все нові, найчастіше більш ефективні методи. Всі інновації спрямовані в основному на головну мету кожного веб-видання – надати інформацію користувачам у зручному і привабливому вигляді. Одним із розділів веб-розробки, який дозволяє досягти описаної мети, є використання анімації у WEB. З кожним днем веб-анімація стає все більш популярною. Анімація стала одним з головних інструментів покращення юзабіліті [1].

Жоден веб-ресурс не може обійтися без анімації, і пояснюється це не тільки бажанням користувача працювати з комфортом, але і необхідністю візуально відстежувати всі дії, що користувачі можуть здійснювати на даному веб-ресурсі [2]. Створення якісної анімації потребує від розробника чимало зусиль та часу [3]. Незважаючи на стрімкий розвиток галузі веб-розробок, створення веб-ресурсів все ще залишається досить дорогою роботою для замовників. Виходячи із цього існує необхідність у створенні методики ефективного застосування анімації у веб, що б дозволила скоротити час розробки анімації та її завантаження.

### Мета роботи

Метою роботи є дослідження сучасних методик та інструментів розробки анімації веб-ресурсів, а також створення на основі проведеного дослідження методики, що дозволить підвищити ефективність розробки веб-анімації, в тому числі за рахунок скорочення часу, який буде потрібен розробнику веб-видань для роботи з анімацією. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування розробленої методики під час розробки анімації для веб-ресурсів.

### Дослідження інструментів та методик створення веб-анімацій

З кожним днем веб-анімація стає все більш популярною. Жодне електронне видання не може обійтися без анімації, і пояснюється це не тільки бажанням користувача працювати з комфортом, але і необхідністю візуально відстежувати всі події [4].

Аналітичний огляд інструментів і методик створення веб-анімації здійснюється у роботі з метою виявлення нюансів, з якими стикається веб-розробник під час роботи з анімацією. Слід послідовно проаналізувати основні технології, якими користується веб-розробник під час створення анімацій веб-інтерфейсу. Широке поширення анімації тягне за собою і розвиток технологій, кожна з яких має свої сильні і слабкі сторони [5]. У зв'язку з цим вибір ефективної технології для створення анімації в веб-додатках представляється завданням актуальним.

Першим із розглянутих способів створення анімації є native animation. Анімаційні ефекти в цьому випадку реалізуються за допомогою ряду технологій, і зокрема, CSS – каскадних таблиць стилів [6]. CSS створений в першу чергу для того, щоб відокремити дизайн веб-сторінок від їх верстки. Анімація CSS дозволяє переходити між різними станами за допомогою ключових кадрів. За допомогою CSS веб-розробник може передавати значення ключових кадрів та властивостей синхронізації, а не створювати для них об'єкти. Високопродуктивна анімація CSS допоможе виключити необхідність використовувати різні зовнішні бібліотеки.

Елементи веб-сайту можна анімувати за допомогою об'єктної моделі документу (DOM). CSS надає багато можливостей для адаптивного розвитку веб-продукту, оскільки анімацію можна змінювати за допомогою медіа-запитів [7].

Таким чином, серед незаперечних переваг каскадних таблиць стилів можна зазначити наступні: простоту зміни дизайну безлічі сторінок, можливість зміни анімації і реалізації адаптивного дизайну за допомогою медіа-запитів, відсутність необхідності використання зовнішніх бібліотек.

Що стосується недоліків використання CSS задля створення анімації, то к основним можна віднести: різне відображення веб-документів різними браузерами, що особливо характерно для застарілих браузерів; складність створення складних ефектів та копіювання реалістичних рухів; складність дотримання реалістичності в анімації під час розробки великої кількості веб-анімацій для продукту.

Анімація JavaScript пропонує більше потужності та гнучкості, ніж переходи або анімація на основі CSS, а також може використовуватися для переміщення елементів DOM на сторінці [8].

Базовий JavaScript має власну функцію анімації, але більшість анімацій виконуються за допомогою додаткових бібліотек, які суттєво впливають на продуктивність [9]. Анімація JavaScript широко використовується для анімації підстрибування, призупинення, зупинки та уповільнення. Ефективність JavaScript залежить від обраної бібліотеки.

Motion UI – бібліотека Sass для створення власних CSS переходів і анімацій, яка дозволяє миттєво анімувати призначений для користувача інтерфейс програми. Володіючи базовими знаннями в області CSS і JavaScript, легко навчитися користуватися Motion UI, а також анімувати практично будь-який елемент програми та задавати йому потрібну поведінку.

Можна помітити, що Motion UI вбирає в себе всі переваги CSS та JavaScript.

Таким чином, існує великий вибір технологій для створення анімацій, у кожній з яких є свої переваги і недоліки, а веб-розробник, в свою чергу, повинен власноруч обрати оптимальну [10]. Варто відзначити, що не існує єдиної методики для розробки



веб-анімації, а присутні безліч різноманітних технологій і загальне керівництво по роботі з ними [11]. Таким чином, розробка методики ефективного застосування анімації, яка буде включати в себе всі потрібні і корисні для веб-розробника рекомендації, є актуальною.

### Розробка методики ефективного застосування анімації у Web

Створення анімації для кожного веб-продукту являє собою тривалий і копіткий процес. Задля підвищення його ефективності необхідно ретельно вибрати технологію та визначити етапи роботи з нею.

Оскільки для розробки якісного веб-сайту найчастіше необхідно використовувати різні типи анімації одночасно в одному проекті, то веб-розробник може застосовувати кілька технологій для роботи, що збільшує як вагу файлів проекту, так і час роботи над веб-сайтом.

Такий підхід не є ефективним внаслідок того, що він вимагає набагато більше часу для виконання роботи. Результатом такого процесу може бути веб-продукт з розрізненою структурою анімації. На відміну від використання різних технологій, пропонується інший підхід, який передбачає використання єдиної технології. Такий підхід дозволить не тільки скоротити час розробки, але і підвищити ефективність праці, спростити роботу і зробити її простіше для розробника. Слід враховувати, що одним з найважливіших показників, що впливають на якість веб-систем в цілому, є швидкість завантаження анімації, оскільки користувачі не готові до тривалого очікування завантаження анімаційних ефектів. Отже цей показник також необхідно враховувати при створенні методики.

Аналізуючи надану вище інформацію, було вирішено в основі методики розробки анімації використовувати технологію Motion UI, так як дана технологія включає в себе плюси використання одночасно CSS animation та Javascript.

Оптимальний процес роботи з веб-анімаціями повинен бути заснований на універсальній технології, яка буде підходити будь-якому розробнику та мати лінійну структуру. Такий підхід дозволяє значно скоротити час створення анімації, зберігаючи при цьому цілісність розробки проекту.

Запропонована методика є лінійною, полягає в використанні універсальної технології Motion UI, і передбачає послідовне виконання певного ряду кроків. На першому етапі необхідно підключити бібліотеку Motion UI до проекту, що розробляється. Наступним етапом є визначення складності анімації, і від цього залежить, що необхідно в подальшій роботі використовувати: CSS або Javascript. CSS використовується для роботи з більш легкими анімаціями. Для роботи зі складнішими анімаціями необхідно використовувати JavaScript. Наступним етапом є додаткове опрацювання за допомогою Sass.

Завершальним етапом є тестування створеної анімації, що представляє собою один з важливих етапів будь-якої розробки.

Таким чином, розроблена методика створення анімацій веб-продуктів дозволяє скоротити час, відведений на розробку веб-анімації. Дану методику можна надати у вигляді діаграми активностей, зображеної на рисунку 1.

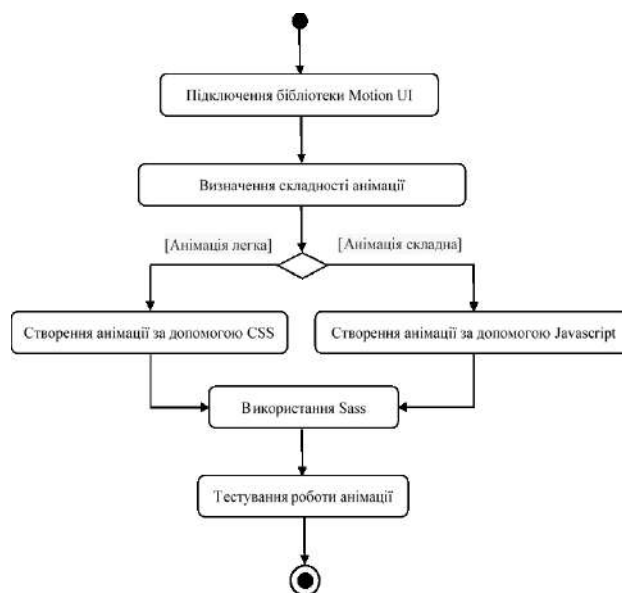


Рис. 1 – Діаграма активностей методики ефективного застосування анімації у Web

### Проведення тестування розробленої методики

Для проведення тестування був складений наступний список учасників: перше тестування проводилося за допомогою професійного веб-розробника, друге тестування проводилося на базі загальноосвітньої школи. Експерту в особі веб-розробника було запропоновано виконати 20 нескладних анімацій елементу у вигляді морозива. Дизайн елементу було вирішено зробити в сучасній стилістиці, використовуючи яскраві кольори з додаванням світла та тіні, орієнтуючись на мистецтво XXI століття [12]. Далі було запропоновано групі школярів завантажити на 20 різних пристроях раніше розроблені анімації і зазначити час їх завантаження. У подальшому результати двох груп були зіставлені. Метою дослідження було визначення двох основних параметрів, таких як час розробки анімації і час її завантаження. Дослідження першого параметру здійснено за результатами роботи веб-розробника. Другий параметр було оцінено в роботі із залученням розробленого опитувальника. Після виконання усіх завдань і отримання відповідей на запитання, вся інформація збирається для аналізу і подальшої обробки. Весь процес проілюстровано на рисунку 2.

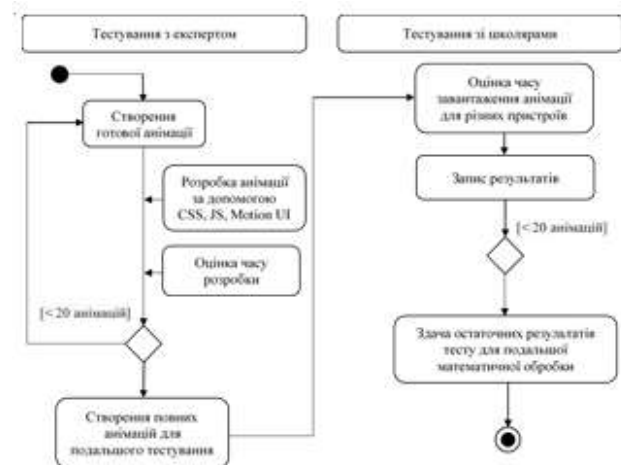


Рис. 2 – Activity-діаграма процедури тестування

Для отриманих під час експерименту даних були використані формули розрахунку математичного очікування і дисперсії випадкової величини:

$$M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i, \quad (1)$$

де  $x_i$  – значення випадкової величини;  $p_i$  – вага випадкової величини  $X$ .

$$D[X] = \sum_{i=1}^n x_i^2 p_i - M[X]^2. \quad (2)$$

Отримані дані з розрахунків визначені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Отримані результати тестування

| Тестування з експертом    |      |      |
|---------------------------|------|------|
|                           | M[X] | D[X] |
| CSS                       | 19,1 | 48,8 |
| Javascript                | 15,8 | 9,2  |
| Motion UI                 | 13,4 | 4,64 |
| Тестування з фокус-групою |      |      |
|                           | M[X] | D[X] |
| CSS                       | 3,67 | 0,46 |
| Javascript                | 4,1  | 0,39 |
| Motion UI                 | 4,25 | 0,39 |

## Висновки

У роботі було проведено дослідження технологій створення анімацій, виявлені їхні переваги, недоліки та галузі використання. Сформульовано гіпотезу щодо мети роботи. На основі проведеного дослідження розроблено методику ефективного застосування анімації у WEB, що дозволяє скоротити як час розробки веб-анімації, так і час її завантаження. Розроблену методику використано задля створення прикладів анімацій, які у свою чергу взяли участь у тестуванні. Результати тестування досліджені методами математичної

статистики та свідчать про те, що використання запропонованої методики зменшує час, необхідний для розробки анімації та прискорює час її завантаження. Проведене дослідження довело ефективність розробленої методики.

## Список літератури

- McLeod Ryan. *Animation Handbook*. Design Better by InVision. 2019. P. 6.
- Tuur Stuyck. Cloth Simulation for Computer Graphics. *Synthesis Lectures on Visual Computing*. 2018. Vol. 10. Iss. 3. P. 1–121. doi: 10.2200/S00867ED1V01Y201807VCP032.
- Ken Anjyo, Hirooyuki Ochiai. Mathematical Basics of Motion and Deformation in Computer Graphics. *Synthesis Lectures on Computer Graphics and Animation*. 2014. Vol. 6. No. 3. P. 1–83. doi: 10.2200/S00599ED1V01Y201409CGR017.
- Kirupa Chinnathambi. *Animation in HTML, CSS, and Javascript*. Create Space Independent Publishing Platform; 3rd ed. 2014. 514 p.
- Rowell Eric. *HTML5 Canvas Cookbook*. Packt Publishing. 2011. 348 p.
- Bradley Steven. *CSS Animations and Transitions for the Modern Web*. 1st Edition. Adobe Pr. 2014. 304 p.
- Lea Verou. *CSS Secrets: Better Solutions to Everyday Web Design Problems*. 1st Edition. O'Reilly Media. 2015. 390.
- Raffaele Cecco. *Supercharged JavaScript Graphics: with HTML5 canvas, jQuery, and More*. 1st Edition. O'Reilly Media. 2011. 282 p.
- Shapiro Julian. *Web Animation using JavaScript: Develop & Design (Develop and Design)*. 1st Edition. Peachpit Press. 2015. 178 p.
- Val Head. *Designing Interface Animation*. Rosenfeld Media. 2016. 240 p.
- Егорова И. Н., Комина М. М. О выборе эффективной технологии создания анимации для веб-приложений. *Матеріали XXIV Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (19–21 жовтня 2020, м. Харків)*. Харків, 2020. С. 353–354.
- Егорова И. Н., Комина М. М. Стили изобразительного искусства в современном веб-дизайне. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології (PMW-2019): матеріали молодіжної школи-семінару IV Міжнародної науково-технічної конференції (14–17 травня 2019, м. Харків)*. Харків, 2019. С. 140–145.

## References (transliterated)

- McLeod Ryan. *Animation Handbook*. Design Better by InVision, 2019. С 6.
- Tuur Stuyck. Cloth Simulation for Computer Graphics. *Synthesis Lectures on Visual Computing*, 2018, Vol. 10, no. 3, pp. 1–121, doi: 10.2200/S00867ED1V01Y201807VCP032.
- Ken Anjyo, Hirooyuki Ochiai. Mathematical Basics of Motion and Deformation in Computer Graphics. *Synthesis Lectures on Computer Graphics and Animation*, 2014, Vol. 6, no. 3, pp. 1–83, doi: 10.2200/S00599ED1V01Y201409CGR017.
- Kirupa Chinnathambi. *Animation in HTML, CSS, and Javascript*. Create Space Independent Publishing Platform, 3rd ed., 2014. 514 p.

5. Rowell Eric. *HTML5 Canvas Cookbook*. Packt Publishing, 2011. 348 p.
6. Steven Bradley. *CSS Animations and Transitions for the Modern Web*. 1st Edition. Adobe Pr., 2014. 304 p.
7. Lea Verou. *CSS Secrets: Better Solutions to Everyday Web Design Problems*. 1st Edition. O'Reilly Media, 2015. 390 p.
8. Raffaele Cecco. *Supercharged JavaScript Graphics: with HTML5 canvas, jQuery, and More*. 1st Edition. O'Reilly Media, 2011. 282 p.
9. Julian Shapiro. *Web Animation using JavaScript: Develop & Design (Develop and Design)*. 1st Edition. Peachpit Press, 2015. 178 p.
10. Val Head. *Designing Interface Animation*. Rosenfeld Media, 2016. 240 p.
11. Iegorova I., Komina M. About the choice of an effective technology for creating animation for web applications. *Materials of the XXIV International Youth Forum "Radioelectronics and Young People in the XXI Centuries" (19–21 June 2020, Kharkiv)*. Kharkiv, 2020, pp. 353–354.
12. Iegorova I., Komina M. Styles of fine art in modern web design. *Polygraphic, multimedia and web technologies (PMW-2019): materials of the youth school-seminar of the IV International Science and Technology Conference (14–17 May 2019, Kharkiv)*. Kharkiv, 2019, pp. 140–145.

### Відомості про авторів (About authors)

**Єгорова Ірина Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри медіасистем і технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5242-0096; e-mail: iryna.iegorova@nure.ua.

**Irina Iegorova** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of Department of Media systems and Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5242-0096; e-mail: iryna.iegorova@nure.ua.

**Коміна Марина Максимівна** – магістр, Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра медіасистем і технологій; м. Харків, Україна; e-mail: maryna.komina@nure.ua.

**Maryna Komina** – Master, Kharkiv National University of Radio Electronics, Department of Media systems and Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: maryna.komina@nure.ua.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Єгорова І. М., Коміна М. М. Розробка методики ефективного застосування анімації у WEB. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 60-64. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.09.

*Please cite this article as:*

Iegorova I., Komina M. Development of methods for effective application of animation in the WEB. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 60-64, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.09.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Егорова И. Н., Комина М. М. Разработка методики эффективного применения анимации в WEB. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 60-64. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.09.

**АННОТАЦІЯ** В роботі пропонується методика ефективного використання анімації в веб-продуктах. Проведено дослідження сучасних технологій і методик створення анімацій для веб-сайтів, а саме розглянуті технології CSS, Javascript, Motion UI, проаналізовані плюси і мінуси їх використання. На основі отриманої інформації сформульована гіпотеза і створена лінійна методика, заснована на використанні універсальної технології Motion UI, і передбачаюча послідовне виконання ряду етапів. Так, на першому етапі користувачу рекомендується підключити бібліотеку Motion UI. На наступному етапі необхідно визначити ступінь складності анімації. В разі, коли потрібно розробити нескладну анімацію, цілком природно використовувати інструменти CSS, інакше, для більш складних випадків, ефективніше використовувати можливості Javascript. В обох випадках цілком природно на заключному етапі розробки анімації застосувати інструменти Sass. Завершальним етапом методики є тестування, що дозволяє оцінити якість створеної анімації. Розроблена методика застосована в роботі при створенні анімації вибраного об'єкта. Проведено тестування з допомогою методу експертних оцінок, з попереднім анкетуванням запрошеної фокус-групи. Експерту, в якості якого виступав професійний розробник, було запропоновано створити 20 анімацій з допомогою технологій CSS, Javascript і Motion UI для заздалегідь розробленого об'єкта. Час розробки фіксувався програмним способом. Далі розроблені анімації розглянуті фокус-групою і проведена оцінка часу завантаження ефектів на веб-сторінці за п'ятибальною шкалою. Проведений з допомогою методів математичної статистики аналіз результатів експерименту свідчить про те, що запропонована методика, яка передбачає використання технології Motion UI, дозволяє скоротити не тільки час розробки анімації, але й час її завантаження. Таким чином, можна зробити висновок, що розроблена методика відрізняється від існуючих методик високою ефективністю, в цілому відповідає очікуванням експертів і цілком природна для застосування.

**Ключові слова:** методика; анімація; WEB; Motion UI; математична статистика

Надійшла (received) 29.11.2020

УДК 621.3: 62-791.2

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.10

## ВИЗНАЧЕННЯ КУТА НАХИЛУ ПРИЛАДУ ДО ГОРИЗОНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО СЕНСОРА MPU6050

Я. В. ЗНАМЕНЩИКОВ<sup>1</sup>, Ю. О. ШКИРЯ<sup>1</sup>, С. С. НЕКРАСОВ<sup>2</sup>, А. Ю. ДОВГОПОЛОВ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> кафедра електроніки і комп'ютерної техніки, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра технології машинобудування верстатів та інструментів, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА

\*e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** У теперішній час широке розповсюдження отримали мікроелектромеханічні системи. Яскравими прикладами мікроелектромеханічної системи є акселерометри та гіроскопи. В даній статті розглядається можливість використання вимірювальної системи на основі мікроелектромеханічного сенсорного модуля MPU6050 для визначення кута нахилу приладу по відношенню до горизонту. Даний модуль може використовуватись для цифрового рівня, в різних пристроях для стабілізації положення, для визначення швидкості нахилу і т.і. Основною перевагою мікроелектромеханічного сенсора MPU6050 перед всіма іншими є його дешевизна і широкі можливості вимірювання величин, дані з якого отримуються у цифрових значеннях. MPU6050 дозволяє вимірювати прискорення та частоту обертання, і можливість прямого вимірювання кута нахилу відсутня. Для вимірювання ж кута нахилу використовується «побічна дія», через яку змінюється значення прискорення вільного падіння при зміні кута нахилу до горизонту. Основною проблемою при використанні зазначеного модуля, є те, що покази мають сильний шум, що обмежує його можливість використання для точних вимірів та при необхідності отримання результатів вимірювань при великих швидкостях руху. Але використовуючи математичну обробку результатів вимірювань стає можливим отримувати статичні значення з точністю до 0.05 градуси, що дозволяє ставити сенсор MPU6050 в один ряд з іншими сенсорами призначеними для вимірювання кута нахилу. Наведена авторами методика обробки дозволяє значно знизити цифровий шум, що виникає при статичному положенні сенсора. Зниження цифрового шуму стало можливим завдяки тому, що мікроелектромеханічний сенсор MPU6050 дозволяє вимірювати кутову швидкість, відповідно кут нахилу по відношенню до горизонту не може змінюватись при статичному положенні сенсора, тобто коли кутова швидкість навколо відповідної вісі дорівнює нулю. І навпаки коли з'являється кутова швидкість, то відповідно і з'являється зміна кута нахилу сенсору, більш того чим більше значення кутової швидкості, тим швидше мають змінюватись значення кута нахилу, що і враховано в математичній моделі розрахунку кута нахилу.

**Ключові слова:** акселерометр; гіроскоп; кут нахилу; MEMS; MPU6050; мікроконтролер; STM8

## DETERMINATION OF THE ANGLE OF THE DEVICE INCLINATION RELATIVE TO THE HORIZON USING A MEASURING SYSTEM BASED ON THE MPU6050 MICROELECTROMECHANICAL SENSOR

Y. ZNAMENSHCHYKOV<sup>1</sup>, Yu. SHKYRYA<sup>1</sup>, S. NEKRASOV<sup>2</sup>, A. DOVHOPOLOV<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronics and Computer Technology, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Technology of machine building, machine tools and tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

**ABSTRACT** At present time microelectromechanical systems have become widely used. Accelerometers and gyroscopes are prominent examples of a microelectromechanical system. In this article we consider the possibility of using a measuring system based on the microelectromechanical sensor module MPU6050 for determination the angle of device inclination relative to the horizon. This module can be used for the digital protractors, in various devices to stabilize the position, to determine the speed of inclination, etc. The main advantage of the microelectromechanical sensor MPU6050 over all others sensors are its low cost and wide possibilities of parameters measurement, as well as the possibility to obtain digital data output. The MPU6050 allows to measure acceleration and rotation speed, however the ability of direct measurement of the inclination angle is not provided. To measure the inclination angle a "side effect" is used, which changes the value of the acceleration of free fall when changing the inclination angle relative to the horizon. The main problem related to application of this module is a strong noise in output values. This limits the ability of using of this sensor for accurate measurements and measurements at high movement speeds. But using of mathematical processing of measurement results makes it possible to obtain static values with an accuracy of 0.05 degrees, which allows using the MPU6050 sensor analogously to other sensors designed for measurement of the inclination angle. The processing technique given by the authors allows to significantly reduce the digital noise that occurs when the sensor is in a static position. The reduction of digital noise is achieved due to the fact that the microelectromechanical sensor MPU6050 allows to measure the angular velocity, consequently the inclination angle relative to the horizon cannot be changed at static position of the sensor, i.e. when the angular velocity around the axis is equal to zero. Conversely, when the angular velocity is not equal to zero, the inclination

angle of the sensor changes. Moreover, the greater the value of the angular velocity leads to the faster change the of inclination angle values, this phenomenon is taken into account in the mathematical model of inclination angle calculation.

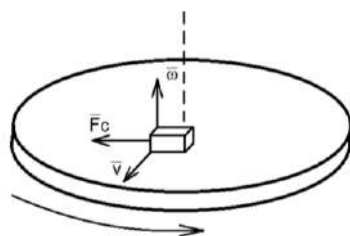
**Keywords:** accelerometer; gyroscope; MEMS; inclination angle; MPU6050; microcontroller; STM8

### Вступ. Принцип роботи

Широке використання мікроелектромеханічних систем стало можливим завдяки їх мініатюрності, більшій функціональності, високій надійності, низького енергоспоживання та низької вартості. Типовими прикладами мікроелектромеханічних систем є акселерометри та гіроскопи які є в будь якому смартфоні, планшеті і т. д. Акселерометри використовуються для вимірювання лінійних прискорень, а гіроскопи – для вимірювання кутових швидкостей. Спільне використання акселерометра та гіроскопу дозволяє визначити параметри руху тіла у просторі [1,2].

Мікроелектромеханічні пристрої виготовляють на кремнієвій підкладці аналогічно технології виробництва однокристальних інтегральних мікросхем, тому їх розміри змінюються в діапазоні від декількох десятків мікрометрів до декількох міліметрів [3,4].

Існує декілька різновидів мікроелектромеханічних гіроскопів [5], що розрізняються внутрішньою будовою, але їх всіх об'єднує те, що їх робота ґрунтується на використанні сили Коріоліса. В кожному з них є робоче тіло, що здійснює зворотно-поступальний рух. Якщо обертати підкладку, на якій знаходиться це тіло, то на нього починає діяти сила Коріоліса, що спрямована перпендикулярно осі обертання та напрямку руху тіла [6]. На рис. 1 наведено механізм дії цієї сили.



$\vec{\omega}$  - вектор кутової швидкості,  $\vec{V}$  - вектор лінійної швидкості,  $\vec{F}_c$  - сила Коріоліса

Рис. 1 – Механізм роботи сили Коріоліса

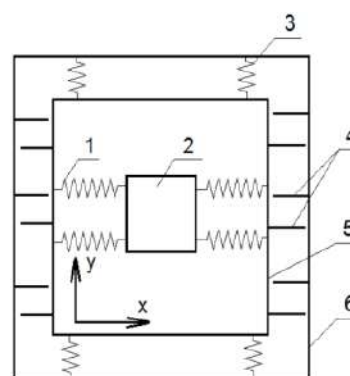
Знаючи лінійну швидкість та силу Коріоліса можна визначити кутову швидкість.

Одна з можливих реалізацій гіроскопу має наступну структуру: закріплена на гнучких підвісах рамка, всередині якої здійснює поступові коливальні рухи маса. Структура такого сенсора наведена на рис. 2.

Коливання робочої маси відбуваються вздовж вісі X та генеруються електростатично, а коливання внутрішньої рамки можливі лише вздовж вісі Y. Між внутрішньою рамкою та підкладкою розташовані обкладки плоских конденсаторів, таким чином,

вимірюючи їх ємність, можна фіксувати рух рамки відносно підкладки [7].

На рис. 3 наведена структура гіроскопу при його обертанні в площині XY за годинниковою стрілкою [8].



1 – кріплення маси, 2 – робоча маса, 3 – кріплення внутрішньої маси, 4 – сенсори переміщення внутрішньої рамки, 5 – внутрішня рамка, 6 – підкладка

Рис. 2 – Внутрішня структура гіроскопу

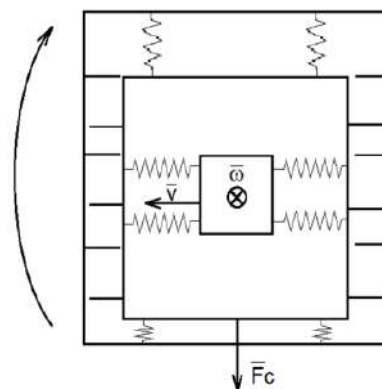


Рис. 3 – Структура гіроскопу при обертанні

Але коливання внутрішньої рамки можуть бути викликані не лише силою Коріоліса, але й лінійними прискореннями, що діють вздовж вісі Y. Проблема вирішується шляхом розміщення на одній підкладці двох рамок, в кожній з яких знаходиться робоча маса. Обидві маси коливаються в протифазі, відповідно, в конкретний момент часу сила Коріоліса, що діє на першу масу, спрямована протилежно силі, що діє на іншу [9,10]. Сигнали, що генеруються силою Коріоліса, будуть додаватись, а синфазна складова, що створюється лінійними прискореннями – відніматись.

Кут нахилу модулю можна отримати за даними акселерометра визначається за формулою 1:

$$\theta = \arctg \frac{a_y}{a_x} \quad (1)$$

де  $a_x$ ,  $a_y$  – проекції прискорення на повздовжню та вертикальну вісі в системі координат, що зв'язана з центром мас модуля.

Вимірювання акселерометра мають суттєві викиди та спотворення, що обумовлені дією бокових прискорень.

Кут нахилу може бути отриманий також інтегруванням відповідних проекцій кутової швидкості, що отримані від гіроскопу, однак при цьому можливе накопичення похибки інтегрування. До того ж, для мікроелектронічних гіроскопів характерна незначна зміщення кутової швидкості. Відповідно, потрібно провести фільтрацію вимірювань акселерометру та гіроскопу, що поєднує переваги обох датчиків [6].

### Мета роботи

Розробка математичної моделі визначення кута нахилу приладу по відношенню до горизонту з використанням мікроелектромеханічного сенсору MPU6050.

### Викладення основного матеріалу

#### Структура вимірювальної системи

На рис. 4 представлена структурна схема системи для вимірювання кута, система складається з передаючої і приймальної частини. До складу передаючої частини входять: модуль MPU6050, плата мікроконтролера STM8 та модуль бездротової передачі даних (бездротовий передавач). Приймаюча частина складається з модуля бездротової передачі даних (бездротовий приймач), мікроконтролера STM8, перетворювача інтерфейсів UART/USB. Приймальна частина за допомогою інтерфейсу USB підключається до комп'ютера для збору даних.

У модуль MPU 6050 інтегровано трьохосовий акселерометр, трьохосовий гіроскоп та цифровий процесор для первинної обробки вимірювань. В модулі MPU 6050 передбачено аналоговий вхід для зовнішнього компасу, що дозволяє забезпечувати вимірювання орієнтації трьох кутів Ейлера. Вбудовані в модуль аналогово-цифрові перетворювачі (3 АЦП – для акселерометра та 3 – для гіроскопу) забезпечують

вимірювання на виході модуля в цифровому вигляді. Для обміну даними з мікроконтролером застосовується інтерфейс I<sup>2</sup>C.

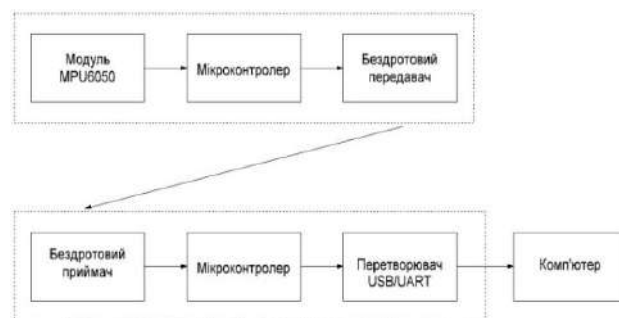


Рис. 4 – Структурна схема вимірювальної системи

#### Математична модель вимірювального модуля

Оскільки вимірювання кутової швидкості гіроскопом на малому інтервалі часу має достатню високу точність, його можна використовувати для корегування вимірювання акселерометром. Для цього було запропоновано рівняння 2:

$$\alpha_n = K(\theta_n - \alpha_{(n-1)}) + \alpha_{(n-1)} \quad (2)$$

де  $K$  – коефіцієнт який має залежати від кутової швидкості

Тобто, запропоноване рівняння має враховувати зміну кута нахилу лише тоді коли змінюється кутова швидкість, якщо ж такої зміни немає, то відповідно немає й причин для зміни кута нахилу. Отже, коефіцієнт  $K$  має розраховуватись за формулою 3:

$$K = A + B|\omega_n - \omega_{(n-1)}| \quad (3)$$

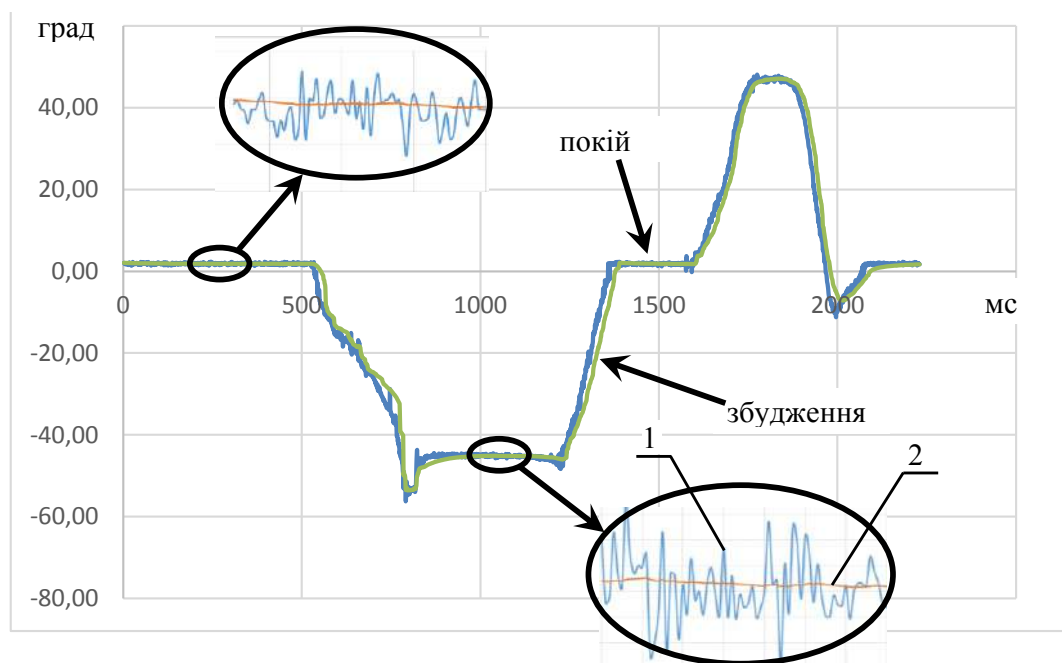
де  $A$  та  $B$  коефіцієнти чутливості, які були визначені емпірично та склали  $A=0.015$ ;  $B=0.0002$ .

Отже кінцева залежність, що враховує рух буде мати залежність 4:

$$\alpha_n = \left(0.015 + 0.0002|\omega_n - \omega_{(n-1)}|\right)(\theta_n - \alpha_{(n-1)}) + \alpha_{(n-1)} \quad (4)$$

Графік цієї залежності отриманий з модулю MPU 6050 наведено на рис. 5.





1 – діаграма прямого розрахунку кута нахилу, 2 – діаграма кута нахилу з математичною обробкою

Рис. 5 – Діаграма зміни кута нахилу в залежності від часу

Як видно з отриманої діаграми, запропонована математична модель визначення кута нахилу дозволяє значно знизити коливання кута нахилу під час знаходження вимірювального пристрою в покое.

### Висновки

Показана можливість визначення кута нахилу приладу по відношенню до горизонту з використанням мікроелектромеханічного сенсору MPU 6050 за рахунок визначення зміни значення прискорення, в залежності від кута нахилу, що дозволило розширити межі використання мікроелектромеханічного сенсору MPU 6050.

Запропонована методика обробки даних, що отримані з мікроелектромеханічного сенсору MPU 6050 значно підвищити точність отримуваних результатів вимірювання кутів нахилу. При розрахунку кута нахилу враховується швидкість обертання приладу, що дозволило знизити шуми при знаходженні сенсору у спокої.

### Список літератури

1. Deng L., Fang Y., Wang D., Wen Z. A MEMS based piezoelectric vibration energy harvester for fault monitoring system. *Microsyst Technol*, 2018. № 4. P. 3637 – 3644. doi: 10.1007/s00542-018-3784-7.
2. Acciari G., Caruso M., Miceli R., Riggi L., Romano P., Schettino G., Viola F. Piezoelectric rainfall energy harvester performance by an advanced Arduino-based measuring system. *IEEE Trans Ind Appl*, 2018. № 54 (1). P. 458 – 468. doi: 10.1109/tia.2017.2752132.
3. Iacono F. L., Navarra G., Oliva M. Structural monitoring of "Himera" viaduct by low-cost MEMS sensors: characterization and preliminary results. *Meccanica*, 2018 № 52 (13). P. 3221 – 3236. doi:10.1007/s11012-017-0691-4.
4. Yan Y., Liu Y., Chávez J. P., Zonta F., Yusupov A. Proof-of-concept prototype development of the self-propelled capsule system for pipeline inspection. *Meccanica*, 2017 № 5. P. 1 – 16. doi: 10.1007/s11012-017-0801-3.
5. Gravina R., Parastoo A., Ghasemzadeh H., Giancarlo F. Multi-sensor fusion in body sensor networks: state-of-the-art and research challenges. *Inf Fusion*, 2017. № 35. P. 68 – 80. doi: 10.1016/j.inffus.2016.09.005.
6. Bengherbia B., Zmiria M. O., Toubala A., Guessoum A. FPGA-based wireless sensor nodes for vibration monitoring system and fault diagnosis. *Measurement*, 2017. № 101. P. 81 – 92. doi: 10.1016/j.measurement.2017.01.022.
7. Son J. D., Ahn B. H., Ha J. M., Choi B. K. An availability of MEMS-based accelerometers and current sensors in machinery fault diagnosis. *Measurement*, 2016. № 94. P. 680 – 691. doi: 10.1016/j.measurement.2016.08.035.
8. Varanis M., Silva A. L., Brunetto P. H. A., Gregolin R. F. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2016. № 38 (1). P. 1301. doi: 10.1590/s1806-11173812063.
9. Varanis M., Silva A. L., Mereles A., de Oliveira C., Balthazar J. M. Instrumentation of a nonlinear pendulum using Arduino microcontroller. In Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American congress on computational methods in engineering. 2016. doi: 10.26512/ripe.v2i27.14447.
10. Duc T. T., Le Anh T., Dinh H. V. Estimating modal parameters of structures using Arduino platform. In:



International conference on advances in computational mechanics. *Springer, Singapore*, 2017. P. 1095 – 1104  
doi:10.1007/978-981-10-7149-2\_76.

#### References (transliterated)

1. Deng L., Fang Y., Wang D., Wen Z. A MEMS based piezoelectric vibration energy harvester for fault monitoring system. *Microsyst Technol*, 2018, no. 4, pp. 3637 – 3644, doi: 10.1007/s00542-018-3784-7.
2. Acciari G., Caruso M., Miceli R., Riggi L., Romano P., Schettino G., Viola F. Piezoelectric rainfall energy harvester performance by an advanced Arduino-based measuring system. *IEEE Trans Ind Appl*, 2018, no. 54 (1), pp. 458 – 468, doi:10.1109/tia.2017.2752132.
3. Iacono F. L., Navarra G., Oliva M. Structural monitoring of “Himera” viaduct by low-cost MEMS sensors: characterization and preliminary results. *Meccanica*, 2018, no. 52 (13), pp. 3221 – 3236, doi: 10.1007/s11012-017-0691-4.
4. Yan Y., Liu Y., Chávez J. P., Zonta F., Yusupov A. Proof-of-concept prototype development of the self-propelled capsule system for pipeline inspection. *Meccanica*, 2017, no. 5, pp. 1 – 16, doi: 10.1007/s11012-017-0801-3.
5. Gravina R., Parastoo A., Ghasemzadeh H., Giancarlo F. Multi-sensor fusion in body sensor networks: state-of-the-art and research challenges. *Inf Fusion*, 2017, no. 35, pp. 68 – 80, doi: 10.1016/j.inffus.2016.09.005.
6. Bengherbiaa B., Zmiria M. O., Toubala A., Guessoumb A. FPGA-based wireless sensor nodes for vibration monitoring system and fault diagnosis. *Measurement*, 2017, no. 101, pp. 81 – 92, doi: 10.1016/j.measurement.2017.01.022.
7. Son J. D., Ahn B. H., Ha J. M., Choi B. K. An availability of MEMS-based accelerometers and current sensors in machinery fault diagnosis. *Measurement*, 2016, no. 94, pp. 680 – 691, doi: 10.1016/j.measurement.2016.08.035.
8. Varanis M., Silva A. L., Brunetto P. H. A., Gregolin R. F. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2016, no. 38 (1), pp. 1301, doi: 10.1590/s1806-11173812063.
9. Varanis M., Silva A. L., Mereles A., de Oliveira C., Balthazar J. M. Instrumentation of a nonlinear pendulum using Arduino microcontroller. In *Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American congress on computational methods in engineering*, 2016, doi: 10.26512/ripe.v2i27.14447.
10. Duc T. T., Le Anh T., Dinh H. V. Estimating modal parameters of structures using Arduino platform. In: *International conference on advances in computational mechanics. Springer, Singapore*, 2017, pp. 1095 – 1104, doi:10.1007/978-981-10-7149-2\_76.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Знаменщиков Ярослав Володимирович** – кандидат фізико-математичних наук, старший викладач, кафедра Електроніки та комп'ютерної техніки (ЕКТ), Сумський державний університет, м. Суми, Україна; e-mail: yaroslav.znamenshchikov@gmail.com.

**Yaroslav Znamenshchikov** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Lecturer, Department of Electronics and Computer Technology, Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: yaroslav.znamenshchikov@gmail.com.

**Шкиря Юрій Олегович** – студент, кафедра Електроніки та комп'ютерної техніки (ЕКТ), Сумський державний університет, м. Суми, Україна; e-mail: rocketyaria@gmail.com.

**Yuriy Shkyrya** – Student, Department of Electronics and Computer Technology, Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: rocketyaria@gmail.com.

**Некрасов Сергій Сергійович** – кандидат технічних наук, Сумський державний університет, доцент кафедри Технологія машинобудування верстати та інструменти (ТМБІ), м. Суми, Україна; e-mail: nekrasovss@gmail.com.

**Sergii Nekrasov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy, Ukraine, e-mail: nekrasovss@gmail.com.

**Довгополов Андрій Юрійович** – кандидат технічних наук, викладач, Сумський державний університет, кафедра Технологія машинобудування верстати та інструменти (ТМБІ), м. Суми, Україна; e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net.

**Andrii Dovhopolov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), lecturer, Sumy State University, postgraduate Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy, Ukraine; e-mail: d\_a\_y\_@ukr.net.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Знаменщиков Я. В., Шкиря Ю. О., Некрасов С. С., Довгополов А. Ю. Визначення кута нахилу приладу до горизонту з використанням вимірювальної системи на основі мікроелектромеханічного сенсора MPU6050. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 65-70. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.10.

*Please cite this article as:*

Znamenshchikov Y., Shkyrya Yu., Nekrasov S., Dovhopolov A. Determination of the angle of the device inclination relative to the horizon using a measuring system based on the MPU6050 microelectromechanical sensor. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 65-70, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.10.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Знаменщиков Я. В., Шкиря Ю. О., Некрасов С. С., Довгополов А. Ю. Определение угла наклона прибора к горизонту с использованием измерительной системы на основе микроэлектромеханического сенсора MPU6050. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 65-70. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.10.

**АННОТАЦИЯ** В настоящее время широкое распространение получили микроэлектромеханические системы. Яркими примерами микроэлектромеханических систем являются акселерометры и гироскопы. В данной статье рассматривается возможность использования измерительной системы на основе микроэлектромеханического сенсорного модуля MPU 6050 для определения угла наклона прибора по отношению к горизонту. Данный модуль может использоваться для цифрового уровня, в различных устройствах для стабилизации положения, для определения скорости наклона и т.д. Основным преимуществом микроэлектромеханического сенсора MPU6050 перед всеми другими является его дешевизна и широкие возможности измерения величин, данные из которого получаются в цифровых значениях. MPU6050 позволяет измерять ускорение и частоту вращения, и возможность прямого измерения угла наклона отсутствует. Для измерения же угла наклона используется «побочное действие», под влиянием которой меняется значение ускорения свободного падения при изменении угла наклона к горизонту. Основной проблемой при использовании указанного модуля является то, что показания имеют сильный шум, что ограничивает его возможность использования для точных измерений и при необходимости получения результатов измерений при больших скоростях движения. Но используя математическую обработку результатов измерений становится возможным получать статические значения с точностью до 0.05 градуса, что позволяет ставить сенсор MPU6050 в один ряд с другими сенсорами предназначенными для измерения угла наклона. Приведенная авторами методика обработки позволяет значительно снизить цифровой шум, возникающий при статическом положении сенсора. Снижение цифрового шума стало возможным благодаря тому, что микроэлектромеханический сенсор MPU6050 позволяет измерять угловую скорость, соответственно угол наклона по отношению к горизонту не может изменяться при статическом положении сенсора, то есть когда угловая скорость вокруг соответствующей оси равна нулю. И наоборот когда появляется угловая скорость, то соответственно и появляется изменение угла наклона сенсора, более того, чем больше значение угловой скорости, тем быстрее должны меняться значение угла наклона, что и учтено в математической модели расчета угла наклона.

**Ключевые слова:** акселерометр; гироскоп; угол наклона; МЭМС; MPU6050; микроконтроллер; STM8

Надійшла (received) 21.11.2020

УДК 004.896

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.11

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

С. Ю. ЛЕОНОВ\*, О. Р. БОРОВИК

кафедра Обчислювальної техніки та програмування, факультет комп'ютерних та інформаційних технологій, Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: serleomail@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** У даній статті були розглянуті методи і засоби забезпечення електромагнітної сумісності, які можуть застосовуватися для зменшення впливу перехресних перешкод між провідниками на платі пристрою. Було проаналізовано причини і механізм виникнення перехресних перешкод, які можуть порушити коректну роботу пристрою через зміну логічного рівня сигналу на провіднику-жертві внаслідок впливу на нього наведеної перехресної перешкоди. Було виконано моделювання впливу перешкод на сигнал в пасивній лінії в залежності від відстані між ними, довжини прилеглої ділянки провідників, матеріалів провідників. Для дослідження була побудована логічна схема електронного пристрою, зокрема шифратор, і його печатна плата. Були проведені експерименти при використанні таких даних: товщина провідників дорівнює 5, 6 і 1.2 міліюймов, відстань між провідниками рівна 5 і 6 міліюймов, довжина прилеглих ділянок провідників дорівнює 4340, 2020, 1620, 1050, 630, 320 і 300 міліюймов. Також застосовувались матеріали провідників, які мають різні значення питомої електропровідності: срібло (62500000 См/м), мідь (5950000 См/м), платина (10000000 См/м), золото (43000000 См/м), нікель (15000000 См/м), алюміній ( $35 \cdot 10^6$  См/м), сталь (1400000 См/м). Дослідження виконувались на спроектованій логічній схемі електронного пристрою і його печатній платі. Були отримані дані про величини наведених перехресних перешкод. В ході виконання досліджень були встановлені і підтверджені залежності збільшення величини значення перехресних перешкод від збільшення довжини прилеглих ділянок, зменшення відстані між провідниками.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність; перехресні перешкоди; печатна плата; моделювання; САПР; шифратор; електронний пристрій

## RESEARCH OF ELECTRONIC DEVICES TAKING INTO ACCOUNT ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

S. LEONOV, O. BOROVYK

Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** In this article methods and means of ensuring electromagnetic compatibility were considered, which can be used to reduce the effect of crosstalk between conductors on the device board. We analyzed the causes and mechanism of crosstalk, which can disrupt the correct operation of the device due to a change in the logic level of the signal on the victim conductor due to the effect of crosstalk pickup on it. The simulation of the influence of interference on the signal in the passive line was automated depending with the distance between conductors, the length of the adjacent section of conductors, and conductor materials. For the study, a logical circuit of an electronic device, in particular encoder, and a printed circuit board were built. Experiments were carried out using the following data: conductor thickness of 5, 6 and 1.2 mils, conductor spacing of 5 and 6 mils, adjacent conductor lengths of 4340, 2020, 1620, 1050, 630, 320 and 300 mils, and materials conductors that have different values of specific electrical conductivity: silver (62,500,000 S/m), copper (5950,000 S/m), platinum (10,000,000 S/m), gold (43,000,000 S/m), nickel (15,000,000 S/m), aluminum ( $35 \cdot 10^6$  S/m), steel (1400000 S/m). The data on the values of crosstalk were obtained. Research performed at the designed logic circuit electronic device and its circuit board. The data on the values of crosstalk were obtained according to the constructed reports. In the course of these studies, the dependences of an increase in the value of crosstalk on an increase in the length of adjacent sections, a decrease in the distance between conductors.

**Keywords:** electromagnetic compatibility; crosstalk; printed circuit board; modeling; CAD; encoder; electronic device

### Вступ

Робота електронних пристроїв повинна гарантувати коректність вихідних даних. Логічний рівень сигналу в провідниках плати електронного пристрою може змінитися внаслідок впливу перешкод. Тому актуальним є питання забезпечення правильного функціонування пристрою з урахуванням можливого впливу факторів перешкод, зумовлених електромагнітною сумісністю окремих провідників на платі.

Дослідження причин виникнення перешкод між провідниками на платі електронного пристрою дозволяє знайти помилки при забезпеченні електромагнітної сумісності пристрою на стадії його проектування і побудови [1,2]. Якщо напруга наводки достатня, це може привести до зміни логічного рівня з нуля на одиницю і навпаки. Згідно диференціальних рівнянь, що описують перехідні процеси в активній і пасивній лініях (1),

$$\begin{cases} \frac{\partial i^a}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial U^a}{\partial t} + C_{e0} \frac{\partial U^n}{\partial t} \\ \frac{\partial i^n}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial U^n}{\partial t} + C_{e0} \frac{\partial U^a}{\partial t} \\ \frac{\partial U^a}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial i^a}{\partial t} - L_{e0} \frac{\partial i^n}{\partial t} \\ \frac{\partial U^n}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial i^n}{\partial t} - L_{e0} \frac{\partial i^a}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

де  $U^a$ ,  $U^n$  – напруги відповідно в активній та пасивній лініях,  $i^a$ ,  $i^n$  – струми відповідно в активній та пасивній лініях,  $C_0$  – взаємна ємність аналізованих провідників,  $L$  – їх взаємна індуктивність.

а також формули оцінки можливого впливу напруги перехресної завади на зміну сигналу в пасивній лінії (2)

$$U_{\Sigma}^n = \left[ \frac{U^a R C_{B0}}{t_U} + \frac{I^a R_B L_{B0}}{t_I (R_{Bx} + R_{aux})} \right] l_{e3} \quad (2),$$

де  $l_{e3}$  – довжина прилеглої ділянки провідників,  $U^a$ ,  $U^n$  – напруги відповідно в активній та пасивній лініях,  $R$  – опір в лініях,

було встановлено залежність напруги перехресної перешкоди від довжини прилеглих ділянок провідників, що є важливим при виконанні трасування [1,3,4]. У разі, якщо значення опору, ємності й індукції є незмінними, то досить велике значення довжини може викликати спотворення сигналу на провіднику-жертві. Перехресні перешкоди від провідника-джерела можуть впливати і спотворювати сигнал на зворотному або ближньому кінці провідника-жертви (NEXT) [2,3,5] а також на кінцях провідника-жертви (FEXT) [2,6,7]. Коефіцієнт перехресної перешкоди розраховується за формулами:

$$\begin{aligned} NEXT &= -20 \log \left( \frac{V_n}{V_i} \right) \\ FEXT &= -20 \log \left( \frac{V_f}{V_i} \right), \end{aligned}$$

де  $V_f$  і  $V_n$  – напруга перехресної перешкоди, що впливає відповідно на дальній і ближній кінець провідника-жертви [8-10].

Значення напруги перехресної перешкоди в залежності від напрямку розраховується наступним чином (3):

$$V_{bl} = \frac{V_{ex}}{4} \left[ \frac{L_{12}}{L_{11}} + \frac{C_{12}}{C_{11}} \right], V_{dal} = \frac{V_{ex} * X * \sqrt{LC}}{2 * T} \left[ \frac{L_{12}}{L_{11}} + \frac{C_{12}}{C_{11}} \right], \quad (3)$$

де  $V_{ex}$  – вхідна напруга на провіднику агресорі,  $L$  – індуктивність,  $C$  – ємність,  $X$  – довжина загальної ділянки,  $T$  – тривалість наростання сигналу на провіднику-агресорі [3,11-16].

Загальне рівняння результуючої напруги для перехресної перешкоди таке (4):

$$V_{Xtalk} = \frac{1}{2} * l * t^{-1} * \left( C * Z - \frac{L}{Z} \right) * V(t), \quad (4)$$

згідно з яким  $l$  – це загальна взаємна довжина досліджуваних провідників,  $t$  – тривалість наростання сигналу на провіднику-агресорі,  $C$  – взаємна ємність,  $L$  – взаємна індуктивність,  $Z$  – імпеданс,  $V$  – рівень зміни сигналу на провіднику-агресорі [4,13,17].

Перехресні перешкоди можуть бути синфазними (Even) і протифазні (Odd). У разі синфазних, струм тече в одному напрямку, має однаковий знак. Протифазні перешкоди мають різний знак і протилежний напрямок [11-13,18].

Для пошуку і встановлення оптимальних параметрів, при яких вплив перешкоди буде мінімальним, було виконано автоматизоване проектування пристрою.

### Мета статті

Виконати автоматизоване дослідження електронного пристрою на предмет перевірки коректності його функціонування у зв'язку з можливим спотворенням сигналу і зміни його логічного рівня через вплив перехресних перешкод між окремими провідниками на платі електронного пристрою.

### Основна частина

Такі фактори, як товщина, ширина, відстань між провідниками і їх кількість, можуть викликати спотворення сигналу на провіднику-жертві.

Першим кроком була виконана побудова структурної схеми в системі автоматизованого проектування OrCAD, були отримані його часові діаграми, потім було виконано трасування в середовищі Allegro PCB [14,15]. Схеми і плата пристрою показані на рис. 1.

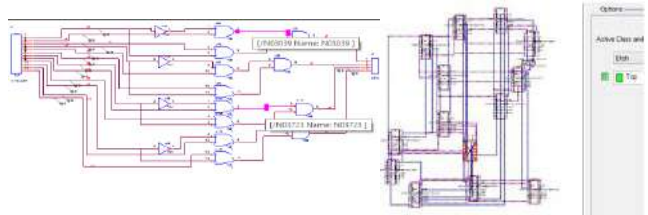


Рис. 1 – Логічна схема та плата пристрою

Було обрано провідники для проведення досліджень (N03723, N03039), які зображені на платі на рис. 2.

Для проведення досліджень було проведено моделювання при значеннях товщини провідників: 1,2, 5, 6 міліджоймів. Результати представлені в табл. 1. Згідно з отриманими результатами, зі зменшенням товщини провідників відбувається зменшення напруги перехресної перешкоди. В таблиці символи Ls/Hs означають низький або високий рівень на провіднику-жертві; Even/Odd – перехід рівня сигналу на провіднику-агресорі з низького на високий і навпаки.

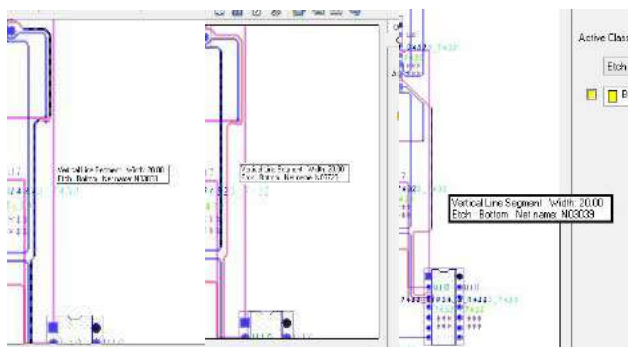


Рис. 2 – Вибір провідників для досліджень

Таблиця 1 – Значення перешкод при різних товщинах провідників

| Товщина, мілідюйм | Максимальне значення напруги завади, мВ | Тип перехресної завади |
|-------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| 1.2               | 496,5                                   | LSEvenXtalk            |
| 5                 | 707,9                                   | HsOddXtalk             |
| 6                 | 770,8                                   | HsOddXtalk             |

Далі було проведено дослідження, в якому було автоматизовано, але з використанням ручного трасування, встановлено залежність значення величини перехресної перешкоди від відстані між досліджуваними провідниками. В ході даного дослідження були виконані наступні дії: моделювання напруг сигналів на провідниках в разі використання відстані між ними 4340, 2020, 1620, 1050, 630, 320, 300 мілідюймів. Результати наведені в табл. 2, а також показані у вигляді діаграм на рис. 3, 4.

Таблиця 2 – Значення перешкод при зміні прилеглих ділянок провідників

| Довжина, мілідюйми | Максимальна напруга перешкоди, мВ | Тип перехресної перешкоди |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 4340               | 931, Even                         | LSEvenXtalk               |
| 2020               | 847, Even                         | LSEvenXtalk               |
| 1620               | 414 Odd                           | HSOddXtalk                |
| 1050               | 345,6 Even                        | LSEvenXtalk               |
| 630                | 80,78 Even                        | LSEvenXtalk               |
| 320                | 69,47 Even                        | LSEvenXtalk               |
| 300                | -                                 | -                         |

При зменшенні довжини прилеглої ділянки до 300 мілідюймів спостерігалася відсутність спотворення сигналу на провіднику-жертві.

На рис. 3 можна спостерігати подачу імпульсного сигналу на провідник агресор, а також його вплив на провідник-жертву в режимі NEXT і FEXT.

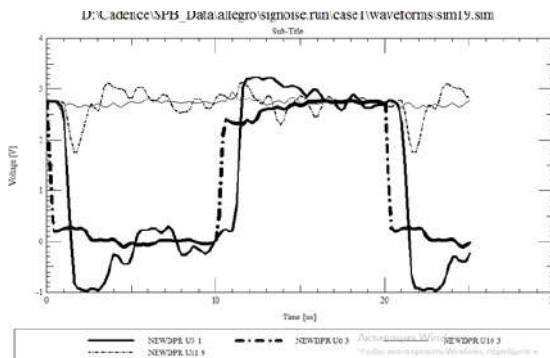


Рис. 3 – Графік зміни сигналів внаслідок дії перехресних завад

На провідник агресор N03039 (на вхідний порт U5 1) був поданий імпульсний сигнал (жирний графік), значення вихідного сигналу аналізується на порту U6 3 (штрих-пунктирна жирний графік). Сигнал на даному провіднику викликає перехресні завади HSOddXtalk на провіднику жертви N03723, сигнал на якому зображений у вигляді графіка U10 3. На цей сигнал діє зворотній вплив перешкоди (NEXT). Сигнал на виході U11 9 (штрих-пунктирний графік, тонкий), який приймає перешкоду типу FEXT, схильний до впливу. Ці графіки зображені на рис. 4. В окремі моменти часу перешкоди на вхідному сигналі такі: на інтервалі часу 1.5-2 нс перешкода 0,01 В, на інтервалі часу 3-4 нс – 0,05 В, на інтервалі часу 16-17 нс – 0,05 В, на інтервалі часу 12,5-13 нс – 0,05 В, на інтервалі часу 23-24 нс – 0,1 В. Слід відмітити, що за рахунок впливу сусіднього провідника напруга на провіднику-жертві може істотно змінитися щодо очікуваної. На наведеному графіку рівні сигналів позначені як VIL і VIH (2В і 3 В відповідно). При цьому VIH – мінімальний рівень сигналу, який з'являється на вході пристрою (U10 3) і представляє логічну одиницю; VIL – максимальний рівень сигналу, який буде на вході пристрою (U10 3). Він представляється як логічний нуль.

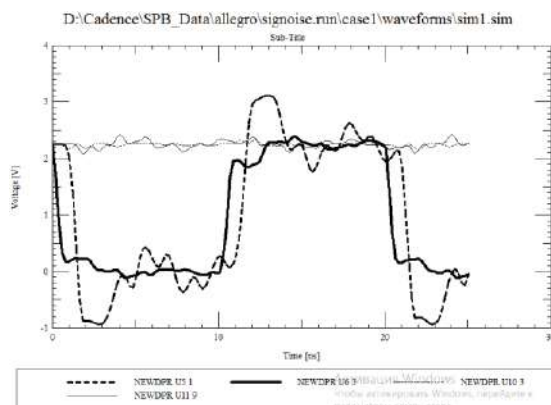


Рис. 4 – Зменшення спотворення сигналу на пасивній лінії

На рис. 4 показано графік імпульсного сигналу, поданого на вхід провідника агресора N03039 (U5 1 – вхідний сигнал, обозначено на графіку товстою

переривчастою лінією, U6 3 – вихідний сигнал, на графіку обозначено жирною суцільною лінією). На цьому рисунку показано також отриману в результаті моделювання перехресну перешкоду HSOddXtalk, викликану імпульсним сигналом на провідник N03723 (рис. 2). Цей вхідний сигнал зображений тонким пунктирним графіком (U10 3) і зумовлен зворотним впливом перешкоди (NEXT). Вихідний сигнал (U11 9), зображений тонким суцільним, відображає вплив прямої перешкоди (FEXT), яка виникає після збільшення простору між провідником агресором N03039 і провідником жертвою N03723, а також скорочення прилеглої ділянки цих провідників на платі. На рис. 4 можна побачити також перешкоди, які виникли на провіднику-жертві, на інтервалах часу 11-12 нс – 10 мВ; на інтервалах часу 3,5-4,5 нс і 22-24 нс – 180 мВ. Варто зазначити, що певна кількість перешкод збереглася, проте значно зменшилася, також зменшилася і амплітуда напруги перешкод на провідниках (максимальне значення зменшилось до 180 мВ в порівнянні з 0,9 В у випадку з більш довгою прилеглою ділянкою і меншим простором між провідниками).

Далі було проаналізовано вплив відстані між провідниками на значення величини перехресної перешкоди. Були обрані значення відстані 5 і 6 міліджоймів. Після виконання автоматизованого проектування були отримані дані, які представлені в табл. 3. Було встановлено, що при відстані, як мінімум 6 міліджоймів, перешкода не викликає спотворення сигналу на провіднику жертві.

Таблиця 3 – Зменшення напруги перехресної завади при збільшенні відстані між провідниками

| Відстань, міліджойм | Напруга перехресної перешкоди |
|---------------------|-------------------------------|
| 5                   | 587.3, HsOddXtalk             |
| 6                   | -                             |

Також було проведено дослідження щодо впливу матеріалів провідників на величину перехресної перешкоди. Для даних експериментів були взяті метали з різними значеннями питомої електропровідності: срібло (62500000 См/м), мідь (59500000 См/м), платина (100000000 См/м), золото (430000000 См/м), нікель (150000000 См/м), алюміній (35 \* 10<sup>6</sup> См/м), сталь (14000000 См/м). При виконанні моделювання було обрано прилеглу ділянку між провідниками довжиною 550 міліджоймів. Товщина обох провідників була встановлена 5 міліджоймів, відстань між ними 1.2 міліджойма. Отримані значення показані в табл. 4, в якій приведені значення напруги перешкоди і її тип. Однак можна звернути увагу, що істотного зміни напруги перехресної перешкоди не спостерігається тільки в разі, якщо обидва провідники мають матеріал сталь. При цьому значення напруги нижче на 12 мВ щодо інших результатів.

Таблиця 4 – Значення напруги перехресних перешкод при різних матеріалах провідників

| Матеріал | Максимальна напруга перехресної завади, мВ | Тип перехресної перешкоди |
|----------|--------------------------------------------|---------------------------|
| срібло   | 141.6                                      | LSEvenXtalk               |
| платина  | 141.3                                      | LSEvenXtalk               |
| мідь     | 143                                        | LSEvenXtalk               |
| алюміній | 142.7                                      | LSEvenXtalk               |
| сталь    | 128.4                                      | LSEvenXtalk               |
| золото   | 142.8                                      | LSEvenXtalk               |
| нікель   | 141.9                                      | LSEvenXtalk               |

### Обговорення результатів

В ході дослідження були виконані дослідження з різними товщинами провідників (показані в табл. 1), дослідження при зменшенні величини товщини обох провідників, за рахунок якого очікується зменшення значення перехресної перешкоди, що впливає на пасивну лінію: від 770,8 мВ при товщині 6 міліджоймів до 496,5 мВ при товщині 1.2 міліджойма.

Під час проведення дослідження впливу довжини прилеглої ділянки провідників на величину перехресної перешкоди були отримані результати, що описують зниження величини перешкоди від зменшення довжини прилягання провідників: від 931 мВ при 4340 міліджоймах до повної відсутності спотворення при довжині ділянки прилягання 300 міліджоймів. Порівнюючи графіки, зображені на рис. 2, 3, можна побачити імпульсні сигнали, подані на вхід провідника-агресора, а також зниження амплітуди перешкоди в пасивній лінії при зменшенні довжини прилеглої ділянки провідників.

Після проведення досліджень щодо впливу величини відстані були отримані дані, що вказують, що при відстані між провідниками, рівному 5 міліджоймів, значення напруги стає 587.3 мВ, при подальшому збільшенні відстані перешкода не викликає спотворення сигналу на провіднику-жертві.

Після проведення дослідження впливу матеріалу провідників електронного пристрою було встановлено, що зміна матеріалу не веде до істотної зміни сигналу на пасивній лінії.

### Висновки

Таким чином, в ході даного дослідження за допомогою систем САПР OrCAD і Allegro було встановлено вплив товщини, відстані між провідниками і довжини прилеглих ділянок провідників на величину перехресної перешкоди. Встановлено допустиму довжину ділянки прилягання провідників (300 міліджоймів), товщину (5 міліджоймів), відстані між провідниками (6 міліджоймів), при яких пристрій працює коректно, не змінюючи рівнів сигналів на провідниках

внаслідок перехресних перешкод. Також даного ефекту можна досягти, розмішуючи між провідниками на печатній платі шар землі, а також за рахунок застосовування екранування. Отримані дані вказують про необхідність урахувати цих особливостей при проектуванні і виготовленні печатних плат електронних пристроїв для уникнення небажаних збоїв функціонування і гарантування коректної роботи пристрою.

#### Список літератури

1. Савельєв А. Й. *Проектування комп'ютерів і систем*, Москва: Вища школа, 1984. 284 с.
2. Фей Дай, Ян Лю. *Теорія та методи проектування кількісних оцінок щодо електромагнітної сумісності на рівні системи*, 2019. doi: 10.1002/978-981-13-3690-4.
3. Джункі Женг. *Електромагнітна сумісність (ЕМС) Розробка та аналіз тестових кейсів*, 2019. doi: 10.1002/9781118956847.
4. Генрі В. Отт. *Техніка електромагнітної сумісності*, 2009. doi: 10.1002 / 9780470508510.
5. Ерік Богатін. *Цілісність сигналу*, 2018.
6. Пол Клейтон. *Вступ Електромагнітна сумісність*. 2006. doi: 10.1002/0471758159.
7. Марк Ван Гельворт, Мат'є Меленхорст. ЕМС для установників. Електромагнітна сумісність систем та установок, 2018. Doi: 10.1201 / 9781315119359.
8. Кейзер Кенет, Довідник з електромагнітної сумісності, 2005 р.
9. Четан Каталай, Практичний підхід до електромагнітної сумісності, 2020 р.
10. Zhang, J., Xu, W., Chen, D., Zhang, C. Порівняльне дослідження схем, оптимізованих за струмом і напругою, для системи WPT з декількома передавачами і одним приймачем. Журнал електронної та комп'ютерної інженерії (Scopus), 2020.
11. Волін М.Л. Паразитні процеси в електронному обладнанні. Друге видання переглянуте та розширене. Москва, Видавництво "Радіо та зв'язок", 1981.
12. Князєв А.Д., Проектування радіоелектронної та електронно-обчислювальної техніки з урахуванням електромагнітної сумісності. Москва, Видавництво радіо та зв'язку, 1989.
13. Рогінський В. Ю. Екранування в радіоприладах. Ленінград, Видавництво "Енергія", 1969.
14. Шапіро Д.Н. Основи теорії електромагнітного екранування. Ленінград, Видавництво "Енергія", 1975.
15. Дизайн печатної плати за допомогою OrCAD Capture та редактора печатних плат, 1-е видання, Крейг Міцнер.
16. Цифрові інтегральні схеми. Методологія проектування, 2-е видання.
17. Касрі, Піах. Компактний високовольтний імпульсний генератор для імпульсних застосувань електричного поля: Розробка лабораторних масштабів. Журнал електронної та комп'ютерної інженерії (Scopus), 2020.

18. Манкалале М.Г., Лян З., Чжао З., Магнітоелектрична логічна технологія на основі композитного входу. Журнал IEEE про дослідницькі твердотільні обчислювальні пристрої та схеми, 2017, с. 27-36 (Scopus).

#### References (transliterated)

1. Savelyev A.Y. Design of computers and systems, Moscow: Higher school, 1984. – 284 p.
2. Fei Dai, Yan Liu. Theory and Methods of Quantification Design on System-Level Electromagnetic Compatibility, 2019. Doi: 10.1002/978-981-13-3690-4.
3. Junqi Zheng. Electromagnetic Compatibility (EMC) Design and Test Case Analysis, 2019. doi:10.1002/9781118956847.
4. Henry W. Ott. Electromagnetic Compatibility Engineering, 2009. Doi: 10.1002/9780470508510.
5. Eric Bogatin, Signal Integrity, 2018.
6. Paul Clayton. Introduction Electromagnetic Compatibility. 2006. Doi: 10.1002/0471758159.
7. Mark Van Helvoort, Mathieu Melenhorst. EMC for Installers. Electromagnetic Compatibility of Systems and Installations, 2018. Doi: 10.1201/9781315119359.
8. Kaiser Kenneth L, Electromagnetic Compatibility Handbook Hardcover, 2005.
9. Chetan Kathalay. A Practical Approach to Electromagnetic compatibility, 2020.
10. Zhang, J., Xu, W., Chen, D., Zhang, C. A Comparative Study on Current-And Voltage-Optimized Circuit Scheme for Multiple-Transmitter and Single-Receiver WPT System, Journal of Electrical and Computer Engineering (Scopus), 2020.
11. Volin M.L. Parasitic processes in electronic equipment. Second edition revised and enlarged. Moscow, Publishing House "Radio and Communication", 1981.
12. Knyazev A.D. Design of radio-electronic and electronic-computing equipment, taking into account electromagnetic compatibility. Moscow, Radio and Communication Publishing House, 1989.
13. Roginsky V.Yu. Shielding in radio devices. Leningrad, Energiya Publishing House, 1969.
14. Shapiro D.N. Fundamentals of the theory of electromagnetic shielding. Leningrad, Energia Publishing House, 1975.
15. PCB Design with OrCAD Capture and PCB Editor, 1st Edition, Craig Mitzner.
16. Digital integrated circuits. Design Methodology, 2nd Edition.
17. Kasri, N.F., Piaah, M.A.M., Adzis, Z. Compact High-Voltage Pulse Generator for Pulsed Electric Field Applications: Lab-Scale Development., Journal of Electrical and Computer Engineering (Scopus), 2020.
18. Mankalale M.G., Liang Z., Zhao Z. Composite-Input Magnetolectric-Based Logic Technology. IEEE Journal on Exploratory Solid-State Computational Devices and Circuits, 2017, pp. 27-36 (Scopus).

#### Відомості про авторів (About authors)

**Леонов Сергій Юрійович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра обчислювальної техніки та програмування, м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0001-8139-0458; email: serleomail@gmail.com

**Sergey Leonov** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8139-0458; e-mail: serleomail@gmail.com



**Боровик Олексій Романович** – студент магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра обчислювальної техніки та програмування, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2097-5994; e-mail: science.alex.email@gmail.com

**Oleksiy Borovik** – Master's student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Computer Engineering and Programming Department, Kharkov, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2097-5994; e-mail: science.alex.email@gmail.com

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Леонов С. Ю., Боровик О. Р. Дослідження роботи електронних пристроїв з урахуванням електромагнітної сумісності. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 71-76. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.11.

*Please cite this article as:*

Leonov S., Borovik O. Research of electronic devices taking into account electromagnetic compatibility. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 71-76, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.11.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Леонов С. Ю., Боровик А. Р. Исследование работы электронных устройств с учётом электромагнитной совместимости. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2020. № 4 (6). С. 71-76. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.11.

**АННОТАЦІЯ** В статті розглянуті методи і засоби забезпечення електромагнітної сумісності, які можуть застосовуватися для зменшення впливу перехресних перешкоджань між провідниками на платі пристрою. Були проаналізовані причини і механізми виникнення перехресних перешкоджань, які можуть порушити коректну роботу пристрою через зміну логічного рівня сигналу на провіднику-жертві внаслідок впливу на нього наводки перехресної перешкоди. Було виконано моделювання впливу перешкод на сигнал в пасивній лінії в залежності від відстані між провідниками, довжини прилеглої ділянки провідників, матеріалів провідників. Для дослідження була розроблена логічна схема електронного пристрою, в частині шифратора, і його друкована плата. Були проведені експерименти при використанні наступних даних: товщина провідників рівна 5, 6 і 1.2 миліонів, відстань між провідниками рівна 5 і 6 миліонів, довжина прилеглих ділянок провідників рівна 4340, 2020, 1620, 1050, 630, 320 і 300 миліонів. Також в ході експериментів були використані матеріали провідників, які мають різними значеннями питомої електропровідності: срібло (62500000 См/м), мідь (5950000 См/м), платина (10000000 См/м), золото (43000000 См/м), нікель (15000000 См/м), алюміній ( $35 \cdot 10^6$  См/м), сталь (1400000 См/м). Були отримані дані про величини перехресних перешкод. В ході виконання досліджень були встановлені і підтверджені залежності збільшення величини значення перехресних перешкод від збільшення довжини прилеглих ділянок, зменшення відстані між провідниками. Встановлено, що матеріали провідників, які мають різною електропровідністю, не викликають суттєвого впливу на величину перехресної перешкоди.

**Ключевые слова:** електромагнітна сумісність; перехресні перешкоди; друкована плата; автоматизоване проектування; САПР; шифратор; електронне пристроїв

Надійшла (received) 28.11.2020

УДК 004.422.8

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.12

## СТРУКТУРА CMS СИСТЕМИ

**В. А. ПРОХОРЕНКО, Г. Е. ЗАВОЛОДЬКО\***

кафедра системи інформації ім. В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: ann.zavolodko@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** У роботі проаналізована структура та продуктивність систем управління контентом. За останні три десятиліття сайти перетворилися зі звичайного способу передачі гіпертексту на багатокомпонентне програмне забезпечення, що обслуговує тисячі користувачів одночасно та дає можливість на одній платформі існувати різним за типом ВЕБ ресурсам. Для зручного маніпулювання даними у такому випадку використовують системи управління контентом (CMS). Чотири найпопулярніші у багатьох країнах CMS: WordPress, OpenCart, Joomla, Drupal порівнюються у статті за допомогою 10 ключових ознак: платформа; технологія; системи управління базами даних, використаних в проектуванні; розробник; швидкість оброблення запитів; вартість; надійність; цільова аудиторія; зручність користування; наявність перекладу адміністративної панелі українською мовою. Як показало дослідження повністю універсальних системи управління контентом не існує. Кожне наявне програмне забезпечення для створення веб-ресурсу розроблене під вирішення конкретного спектру задач. Методика побудови CMS базується на класичних методах розробки Web-сайтів, а саме це гібрид ручної розробки HTML, програмних засобів розробки сайтів, інструментальних систем, фреймворків. Безкоштовні CMS мають відкритий вихідний код. Безкоштовні системи, що з'явилися на ринку більше 10 років назад, не уступають платним, більш новітнім, варіантам за рівнем захищеності та об'ємом функціонального наповнення. Такий стан проблеми обумовлюється тим, що розробкою плагінів і доповнень можуть займатися не тільки розробники системи, а і сторонні розробники. Структура системи управління контентом базується на використанні модульного принципу. Завдяки цьому система управління контентом стає гнучкою, простою для взаємодії, як для користувача, так і для розробника, та надає можливість розширювати спектр дій одного модуля за допомогою встановлення іншого. WordPress це CMS, яка має більш витончену архітектуру, що відображається на продуктивності, інтуїтивно зрозумілій адміністративній панелі й, нарешті, має більше переваг перед аналогами.

**Ключові слова:** система управління контентом; архітектура CMS; класифікація CMS; функціонуюча CMS; CMS-система; структура системи

## CMS SYSTEMS STRUCTURE

**V. PROHORENKO, G. ZAVOLODKO**

Department of Information systems named after V. Kravets, National Technical University "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The structure and performance of content management systems are analyzed. Over the past three decades, sites have evolved from a conventional way of transmitting hypertext to multi-component software that serves thousands of users simultaneously and allows different types of Internet resources to exist on the same platform. For easy data manipulation in this case use content management systems content management systems. The four most popular in many countries content management systems: WordPress, OpenCart, Joomla, Drupal are compared in the article using ten key features: platform; technology; database management systems used in the design; developer; request processing speed; cost; reliability; target audience; ease of use; availability of translation of the administrative panel into Ukrainian. As research has shown, there is no completely universal content management system. Every of the existing software for creating a web resource is designed to solve a specific range of tasks. The method of building a content management system is based on classical methods of Web-site development, namely it is a hybrid of manual HTML development, site development software, tool systems, frameworks. Free content management systems are open source. Free systems that have appeared on the market for more than 10 years ago are not inferior to paid, to newer, options in terms of security and volume of functional content. This state of the problem is due to the fact that the development of plug-ins and add-ons can be engaged not only in system developers, but also third-party developers. The structure of the content management system is based on the use of the modular principle. This makes the content management system flexible, easy for both the user and the developer to interact with, and allows you to expand the range of one module by installing another. WordPress is a content management system that has a more sophisticated architecture that reflects performance, intuitively clear administrative panel and, finally, has more advantages over analogues.

**Keywords:** content management system; CMS architecture; CMS classification; functioning CMS; CMS system; system structure

### Вступ

Сьогодні рішення для створення сучасних веб-сторінок та веб-ресурсів базуються на активній інтеграції нових підходів та гібриді існуючих засобів

розробки та інструментів. За останні три десятиліття сайти перетворилися із звичайного способу передачі гіпертексту на багатокомпонентне програмне забезпечення, яке обслуговує тисячі користувачів одночасно. Для зручного маніпулювання даними у

такому випадку використовуються системи керування контентом (CMS) [1,2].

### Мета роботи

Метою даної статті є аналіз структури найпоширеніших систем керування вмістом, виокремлення з неї основних модулів та створення загальної схеми.

### Виклад основного матеріалу

Сучасні системи керування контентом мають відповідати наступним критеріям, щоб бути конкурентоспроможними:

1. Швидке та ефективне маніпулювання інформацією. Програмне забезпечення має надавати можливість делегувати наповнення сайту редактору, web-мастеру або іншому співробітнику без попереднього формування технічного завдання.

2. Зменшення вартості підтримки системи. CMS повинно надавати власнику простий та зрозумілий інструмент для встановлення додаткових функційних можливостей та додавання, редагування або видалення контенту.

3. Розмежування прав та доступу. Кожен користувач повинен мати власну роль, яка дозволяє йому виконувати тільки певний спектр задач, не впливаючи на роботу інших компонентів [3].

4. SEO-оптимізація. Просування сайту у пошукових системах за змістовими критеріями – це одна з головних задач власника сайту. Тому у веб-ресурсі повинні бути інструменти для кастомізації метаданих та налаштування URL-адреси.

5. Можливість змінювати дизайн, не впливаючи на роботу функціональних елементів.

Щодо архітектури системи керування контентом, то популярні сьогодні варіанти (WordPress, OpenCart та Joomla) схожі за своєю внутрішньою структурою. Вони створені з використанням розподілених сервісів. Завдяки цьому CMS стає гнучкою, простою для взаємодії, як для користувача, так і для розробника, та надає можливість розширювати спектр дій одного сервісу за допомогою встановлення іншого [4].

Залежно від виду програмного забезпечення та переліка задач, які воно виконує, кількість сервісів може розширюватись або зменшуватись. Загальна схема побудови представлена на рисунку 1.

Сервіс це автономний компонент системи, який виконує тільки один тип завдань. Для їх зв'язування використовується єдиний системний елемент, ядро. Він виступає у якості ядра, яке ініціалізує систему, викликає потрібні компоненти, займається передачею інформації від одного сервісу до іншого та надсилає результат роботи користувачу.

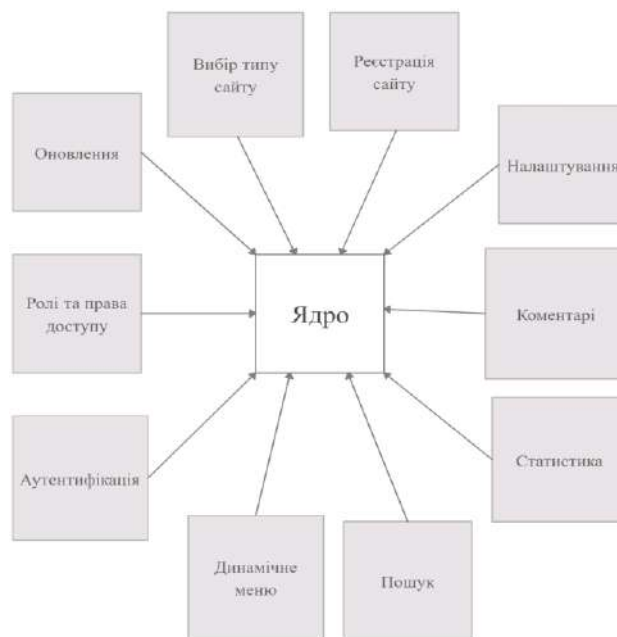


Рис. 1 – Типова схема систем керування контентом

### Обговорення результатів

Усі базові сервіси систем керування вмістом, які представлені на схемі, виконують спектр задач, що наведено у таблиці 1.

Аналіз систем керування контентом. Як наведено вище архітектура більшості сучасних CMS подібна, тому для порівняння беруться 10 критеріїв: платформа; технологія; СУБД; розробник; швидкість оброблення запитів; вартість; надійність; цільова аудиторія; зручність користування; наявність перекладу адміністративної панелі українською мовою.

WordPress – це повністю безкоштовна система керування вмістом з відкритим вихідним кодом з вбудованою системою керування плагінами та темами. На сьогоднішній день вона є найбільш популярною у світі. WordPress реалізована на платформі PHP, у якості бази даних використовується MySQL [5]. До того ж його розробники Ryan Boren, Mark Jaquith, Matt Mullenweg, Andrew Ozz, Peter Westwood дозволяють розширювати функціональне наповнювання за допомогою своїх модулів.

Адміністративна панель WordPress має доволі простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Тому навіть користувач без технічних навичок розбереться, як створити сторінку, пост, рубрику або як встановити плагін.

Цільовою аудиторією даної системи керування вмістом можна вважати власників сайтів-візиток, блогів та корпоративних сайтів. Також WordPress використовують підприємці, бізнесом котрих є невеликі та середні інтернет-магазини.

Таблиця 1 – Функції основних сервісів CMS

| Назва блоку           | Функції                                                                                                                                |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Оновлення             | Постійна перевірка наявності оновлень на офіційному сервері розробників CMS, встановлення оновлень та доповнень.                       |
| Ролі та права доступу | Створення, редагування та видалення ролей із системи, налаштування і перевірка прав доступу до кожного із сервісів.                    |
| Аутентифікація        | Авторизація і створення нових користувачів у системі, робота з авторизованим акаунтом.                                                 |
| Динамічне меню        | Керування, побудова та рендеринг меню публічної та адміністративної частини сайту.                                                     |
| Пошук                 | Пошук та фільтрація сутностей у системі за допомогою ідентифікатору та звичайного тексту.                                              |
| Статистика            | Збір статистики на сайті, побудова графіків та звітностей для використання у панелі адміністратора та поза системою керування вмістом. |
| Коментарі             | Створення, редагування, видалення, модерація та виведення коментарів до обраних сутностей системи.                                     |
| Налаштування          | Маніпуляція налаштуваннями системи та активністю інших сервісів.                                                                       |
| Регенерація сайту     | Створення резервних копій веб-ресурсу та відновлення сайту з їх допомогою за потреби.                                                  |

Таблиця 2 – Кількість запитів за секунду для Wordpress

| Версія PHP | Кількість запитів за секунду |
|------------|------------------------------|
| PHP 5.6    | 97.71                        |
| PHP 7.0    | 256.81                       |
| PHP 7.1    | 256.99                       |
| PHP 7.2    | 273.07                       |
| PHP 7.3    | 305.59                       |
| PHP 7.4    | 313.42                       |

Представлена вище система є досить надійною за рахунок підтримки SSL-протоколу та конструктора запитів до бази даних, що виключає ризик виникнення SQL-ін'єкцій. До того ж, завдяки швидкості оброблення запитів Wordpress підходить для сайтів будь-якої складності [6]. У таблиці 2 представлено кількість запитів за секунду, котре може обробити система залежно від використаної версії PHP.

OpenCart представляє собою безкоштовну систему керування вмістом. Вона розроблена

Денизлем Керром та Джоном Хелфішом для створення інтернет-магазинів. У якості платформи використана мова програмування PHP, система керування базою даних (СКБД) – MySQL [7–9].

OpenCart підходить, як для новачків, так і для досвідчених користувачів у сфері e-commerce. Панель керування зручна і дозволяє обрати комфортний переклад, у тому числі доступна українська мова [10].

До переваг слід віднести велику базову захищеність. Після встановлення система надає: захист від автоматичного вводу капчи; фіксацію усіх дій користувача; можливість розмежування прав доступу; підтримку протоколу SSL; можливість модерувати публікації.

За швидкістю OpenCart значно повільніший, ніж WordPress, більше ніж у 6 разів. У таблиці 3 представлено швидкість опрацювання запитів залежно від версії PHP.

Таблиця 3 – Кількість запитів за секунду для OpenCart

| Версія PHP | Кількість запитів за секунду |
|------------|------------------------------|
| PHP 5.6    | 45.56                        |
| PHP 7.0    | 65.9                         |
| PHP 7.1    | 65.82                        |
| PHP 7.2    | 67.33                        |
| PHP 7.3    | 70.27                        |
| PHP 7.4    | 73.04                        |

Joomla займає 11% ринку в країнах СНГ. Також вона входить до п'ятірки лідируючих систем для створення сайтів у світі. Вона створена командою незалежною командою розробників із CMS Mambo і розповсюджується повністю безкоштовно [11].

Написана Joomla із використанням об'єктно-орієнтованої технології та за допомогою мови програмування PHP, СКБД – MySQL.

Представлена система досить захищена від несанкціонованого доступу. З кожним оновленням з'являються інструменти для підвищення рівня безпеки. Наприклад, система дозволяє встановити SSL-сертифікат, розмежувати права доступу та модерувати сторінки і пости перед публікацією.

За зручністю користування Joomla є аналогом WordPress. Встановлення та налаштування системи займає не більше 5 хвилин. До того ж, інтерфейс панелі керування досить простий і дозволяє обрати комфортну для роботи мову (російську, англійську або українську) [12].

Швидкість обробки запитів у Joomla при використанні PHP 7.4 досягає 80 запитів за секунду. Це робить систему підходящим варіантом для створення корпоративних сайтів, блогів та невеликих інтернет-магазинів. У таблиці 4 можна ознайомитися із порівнянням швидкості роботи системи на базі різних версій PHP.

Четверта система керування вмістом – це Drupal. Вона є повністю безкоштовною та має відкритий вихідний код. Її створенням займався бельгієць Дріс Байтаєрт. Написана CMS із використанням об'єктно-орієнтованої технології та за допомогою мови програмування PHP, СКБД – MySQL.

Таблиця 4 – Кількість запитів за секунду для Joomla

| Версія PHP | Кількість запитів за секунду |
|------------|------------------------------|
| PHP 5.6    | 48.40                        |
| PHP 7.0    | 67.80                        |
| PHP 7.1    | 67.37                        |
| PHP 7.2    | 68.53                        |
| PHP 7.3    | 71.63                        |
| PHP 7.4    | 76.31                        |

Drupal є досить захищеним від несанкціонованого доступу. Для цього у програмному забезпеченні використовуються модулі захисник зображень та блокування спаму. Також є інструменти для запобігання SQL-ін'єкціям і розподілення прав доступу.

Панель керування Drupal є зручною тільки для досвідчених користувачів. Новачкам доведеться постійно користуватися інструкцією, щоб знайти необхідні функції. Що стосується локалізації, то спільнота активно перекладає тексти ядра різними мовами, у тому числі й українською.

За швидкістю роботи представлена система значно повільніша, ніж розглянуті аналоги. Середня кількість запитів за секунду варіюється між 18 та 22 (табл. 5) [13].

Таблиця 5 – Кількість запитів за секунду для Drupal 8.8

| Версія PHP | Кількість запитів за секунду |
|------------|------------------------------|
| PHP 5.6    | Не підтримується             |
| PHP 7.0    | 18.47                        |
| PHP 7.1    | 18.81                        |
| PHP 7.2    | 19.38                        |
| PHP 7.3    | 21.56                        |
| PHP 7.4    | Не підтримується             |

### Висновки

Обґрунтовано, що найбільш швидкою, зручною та універсальною системою керування контентом є WordPress. Ця CMS відрізняється більш продуманою архітектурою, що відобразилося на продуктивності, інтуїтивно зрозумілою панеллю адміністратора і в підсумковому аналізі має більше переваг над своїми аналогами.

### Список літератури

1. Заволодько А. Э., Кашеев С. А. Интеллектуальный агент управления этапами разработки проектов. *Збірник*

*наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. 2009. 2. С. 123–125.

2. Курилов М. А., Терещенко С. В. Классификация систем управления содержимым web-ресурсов и их использование для разработки сайта дистанционного обучения. *Штучний інтелект*. 2010. № 3. С. 648–654.
3. Архитектура CMS. URL: <https://habr.com/ru/post/51152/> (дата звернення: 19.10.2020).
4. Сравнение 5 популярных CMS: особенности, плюсы, минусы. URL: <https://habr.com/ru/company/vdsina/blog/514764/> (дата звернення: 19.10.2020).
5. Преимущества и недостатки CMS WordPress. Почему ВордПресс — самый используемый движок сайта? URL: <https://ipipe.ru/info/preimushhestva-i-nedostatki-cms-wordpress> (дата звернення: 19.10.2020).
6. WordPress. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/WordPress> (дата звернення: 19.10.2020).
7. OpenCart. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenCart> (дата звернення: 19.10.2020).
8. Joomla. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Joomla!> (дата звернення: 19.10.2020).
9. Преимущества и недостатки CMS Joomla. Плюсы и минусы, недостатки для интернет коммерции. URL: <https://ipipe.ru/info/preimushhestva-i-nedostatki-cms-joomla> (дата звернення: 19.10.2020).
10. Тестирование и скорость работы известных cms на PHP 5.6, 7.0, 7.1, 7.2, 7.3 и 7.4. URL: <https://ok2web.ru/testirovanie-i-skorost-raboty-izvestnyh-cms-na-php-5-6-7-0-7-1-7-2-7-3-i-7-4/> (дата звернення: 19.10.2020).
11. eCommerce Platform Comparison Benchmarks. URL: <https://www.comentum.com/e-commerce-platform-benchmark-comparison.html> (дата звернення: 19.10.2020).
12. CMS Opencart: плюсы и минусы, обзор функционала. URL: <https://www.interkassa.com/blog/cms-opencart-plyusy-i-minusy-obzor-funkcionala/> (дата звернення: 19.10.2020).
13. Drupal. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Drupal> (дата звернення: 19.10.2020).

### References (transliterated)

1. Zabolodko A. E., Kashcheyev S. A. Yntellektualnij agent upravleniya etapami razrabotky proektov [An intelligent agent for managing the stages of project development]. *Zbirnyk naukovykh prac Kharkivskogo universytetu Povitryanykh syl* [Collection of scientific works of Kharkiv University of the Air Force], 2009, 2, pp. 123–125.
2. Kurylov M. A., Tereshchenko S. V. Klassyfykacya system upravleniya soderzhymim web-resursov y yx yspolzovanye dlya razrabotky sayta dystancyonnogo obuchenyya [Classification of content management systems for web resources and their use for the development of a distance learning site] *Shtuchnyj intelekt* [Artificial Intelligence], 2010, no. 3, pp. 648–654.
3. Arxyektura CMS [CMS architecture]. Available at: <https://habr.com/ru/post/51152/> (accessed: 19.10.2020).
4. Sraivnenye 5 populyarnix CMS: osobennosti, plyusi, mynusi [Comparison of 5 popular CMS: features, pros, cons]. Available at: <https://habr.com/ru/company/vdsina/blog/514764/> (accessed: 19.10.2020).
5. Preymushhestva y nedostatky CMS WordPress. Pochemu VordPress — samij yspolzuemij dyzhok sajta? [Advantages and disadvantages of CMS WordPress. Why is WordPress the most used site engine?] Available at:

- <https://ipipe.ru/info/preimushhestva-i-nedostatki-cms-wordpress> (accessed: 19.10.2020).
6. WordPress. Available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/WordPress> (accessed: 19.10.2020).
  7. OpenCart. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenCart> (accessed: 19.10.2020).
  8. Joomla!. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Joomla!> (accessed: 19.10.2020).
  9. Preimushhestva y nedostatky CMS Joomla. Plyusi y mynusi, nedostatky dlya ynternet kommercyu. Available at: <https://ipipe.ru/info/preimushhestva-i-nedostatki-cms-joomla> (accessed: 19.10.2020).
  10. Testyrovanye y skorost raboty yzvestnix cms na PHP 5.6, 7.0, 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 [Testing and speed of work of famous cms on PHP 5.6, 7.0, 7.1, 7.2, 7.3 and 7.4]. Available at: <https://ok2web.ru/testirovanie-i-skorost-raboty-izvestnyh-cms-na-php-5-6-7-0-7-1-7-2-7-3-i-7-4/> (accessed: 19.10.2020).
  11. eCommerce Platform Comparison Benchmarks. Available at: <https://www.comentum.com/e-commerce-platform-benchmark-comparison.html> (accessed: 19.10.2020).
  12. CMS Opencart: plyusi y mynusi, obzor funkcyonala [CMS Opencart: pros and cons, functional overview]. Available at: <https://www.interkassa.com/blog/cms-opencart-plyusy-i-minusy-obzor-funkcionala/> (accessed: 19.10.2020).
  13. Drupal. Available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Drupal> (accessed: 19.10.2020).

#### Відомості про авторів (About authors)

**Прохоренко Владислав Андрійович** – магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри систем інформації ім. В.О. Кравця; м. Харків, Україна; ORCID 0000-0002-2172-2219; e-mail: [prohorenko.vladyslav.98@gmail.com](mailto:prohorenko.vladyslav.98@gmail.com).

**Vladislav Prokhorenko** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Master of the department Information systems named after V. Kravets; Kharkiv, Ukraine; ORCID 0000-0002-2172-2219; e-mail: [prohorenko.vladyslav.98@gmail.com](mailto:prohorenko.vladyslav.98@gmail.com).

**Заволодько Ганна Едвардівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри систем інформації ім. В.О. Кравця; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0000-8910; e-mail: [ann.zavolodko@gmail.com](mailto:ann.zavolodko@gmail.com).

**Ganna Zavolodko** – Ph. D., Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Department of Information systems named after V. Kravets, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0000-8910; e-mail: [ann.zavolodko@gmail.com](mailto:ann.zavolodko@gmail.com).

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Прохоренко В. А., Заволодько Г. Е. Структура CMS системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 77-81. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.12.

*Please cite this article as:*

Prokhorenko V., Zavolodko G. CMS systems structure. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 77-81, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.12.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Прохоренко В., Заволодько А. Структура CMS системы. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 77-81. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.12.

**АННОТАЦІЯ** В роботі проаналізована структура і продуктивність систем управління контентом. За останні три десятиліття сайти перетворились із звичайного способу передачі гіпертекста на багатокомпонентне програмне забезпечення, яке обслуговує тисячі користувачів одночасно і дає можливість на одній платформі існувати різним за типом ВЕБ ресурсам. Для зручного маніпулювання даними в такому випадку використовують системи управління контентом (CMS). Чотири популярні в багатьох країнах CMS: WordPress, OpenCart, Joomla, Drupal порівнюються в статті за допомогою 10 ключових ознак: платформа; технологія; системи управління базами даних, використаних в проектуванні; розробник; швидкість обробки запитів; ціна; надійність; цільова аудиторія; зручність використання; наявність перекладу адміністративної панелі українською мовою. Як показало дослідження, повністю універсальних систем управління контентом не існує. Кожне програмне забезпечення для створення веб-ресурсу розроблено під рішення конкретного спектра завдань. Методика побудови CMS базується на класичних методах розробки Web-сайтів, а саме це гібрид ручної розробки HTML, програмних засобів розробки сайтів, інструментальних систем, фреймворків. Безкоштовні CMS мають відкритий вихідний код. Безкоштовні системи, які з'явилися на ринку понад 10 років тому, не поступають платним, новішим варіантам за рівнем захищеності і обсягом функціонального наповнення. Таке положення проблеми обумовлюється тим, що розробкою плагінів і доповнень можуть займатися не тільки розробники системи, а й сторонні розробники. Структура системи управління контентом базується на використанні модульного принципу. Завдяки цьому система управління контентом стає гнучкою, простою для взаємодії, як для користувача, так і для розробника, і надає можливість розширювати спектр дій одного модуля за допомогою встановлення іншого. WordPress це CMS, яка має більш зрозумілу архітектуру, відображається на продуктивності, інтуїтивно зрозумілій адміністративній панелі і, нарешті, має більше переваг перед аналогами.

**Ключові слова:** система управління контентом; архітектура CMS; класифікація CMS; функціонуюча CMS; CMS-система; структура системи

Надійшла (received) 24.11.2020

УДК 65.012.3

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.13

## ІНФОРМАЦІЙНА СКЛАДОВА СТІЙКОСТІ БЛУКАЮЧИХ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**І. І. СТАНОВСЬКА<sup>1\*</sup>, О. Л. СТАНОВСЬКИЙ<sup>2</sup>, Є. О. НАУМЕНКО<sup>2</sup>, І. А. САУХ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> кафедра вищої математики та моделювання систем, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА

\*e-mail: stanovskairaida@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Складні системи (процеси) відповідального призначення набувають все більшого поширення в сучасному світі. Відповідальність призначення складних систем обумовлюється такими, наприклад, обставинами, як залежність від останніх здоров'я або, навіть, життя великої кількості людей, екологічної безпеки регіонів та великих матеріальних витрат. До них можна віднести відповідальні промислові та енергетичні споруди, елементи систем транспорту, зв'язку та безпеки життєдіяльності, комп'ютерні системи та мережі, обладнання для складного медичного втручання в організм людини, освітні заклади, тощо. Об'єднує ці системи і робить їх суб'єктами дослідження те, що їхня складність вимагає для управління ними застосування сучасних інформаційних технологій та відповідної «вбудованої» комп'ютерної системи отримання та обробки в реальному часі достовірних даних про стан об'єкта. Існуючі вбудовані інформаційні системи, як правило, повинні бути заздалегідь навчені виявляти відхилення параметрів стану керованого об'єкта від норми, а також, розраховувати і здійснювати (іноді, за допомогою оператора) дії із своєчасної компенсації таких відхилень. Але, на жаль, існують й інші системи, які потрапляють у ситуації (кризи), коли їхні «паспортні» параметри піддаються суттєвим відхиленням, а існуюча, «вбудована» інформаційна підтримка таким ситуаціям не навчена, і оперативно допомогти в он-лайн подоланні наслідків кризи не здатна. Адже керованість СС ВП, боротьба із кризами, які ці процеси спіткають, спирається на наявні адекватні та відносно швидкодіючі (вони повинні встигнути до руйнування псевдостійкого пошкодженого об'єкта) моделі та методи прийняття термінових антикризових рішень в управлінні. Метою роботи є підвищення ефективності антикризового управління процесами швидкоплинного розвитку складних багатопараметричних організаційно-технічних систем шляхом розробки та впровадження нових моделей та методів. Під ефективністю управління розуміли поліпшення в порівнянні з планом таких основних показників процесу, як час, вартість, параметри якості продукту, взаємодія із навколишнім середовищем або, принаймні, збереження планових показників в умовах криз. Для досягнення цієї мети в роботі проаналізовані складні системи відповідального призначення з точки зору їхньої стійкості до пошкоджень та криз; виконано класифікацію (сортування) складних систем відповідального призначення із блукаючими елементами; побудовано загальний алгоритм процесу накопичення загального параметричного простору при управлінні складними системами; виконана реалізація та оцінено практичне значення отриманих результатів.

**Ключові слова:** надійність; блукаюча складна система; відповідальне призначення; антикризове управління; інформаційна система

## INFORMATION COMPONENT OF RESPONSIBLE PURPOSE WANDERING COMPLEX SYSTEMS STABILITY

**I. STANOVSKA<sup>1</sup>, O. STANOVSKYI<sup>2</sup>, Y. NAUMENKO<sup>2</sup>, I. SAUKH<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Higher Mathematics and Systems Modeling, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Petroleum and Chemical Engineering, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

**ABSTRACT** Complex systems (processes) of responsible purpose are becoming more common in the modern world. The responsibility for designing complex systems is due to, for example, circumstances such as dependence on the latest health or even the lives of large numbers of people, the environmental security of regions and high material costs. These include responsible industrial and energy facilities, elements of transport, communication and safety systems, computer systems and networks, equipment for complex medical interventions in the human body, educational institutions, etc. What unites these systems and makes them subjects of research is that their complexity requires the use of modern information technologies and the appropriate "embedded" computer system for obtaining and processing real-time reliable data on the state of the object. Existing embedded information systems, as a rule, should be trained in advance to detect deviations of the parameters of the state of the controlled object from the norm, as well as to calculate and perform (sometimes, with the help of the operator) actions to compensate for such deviations. But, unfortunately, there are other systems that get into a situation (crisis), when their "passport" parameters are subject to significant deviations, and the existing, "built-in" information support for such situations is not trained, and quickly help in overcoming the consequences online crisis is not capable. After all, the controllability of SS SS, the fight against crises that these processes encounter, is based on the available adequate and relatively fast (they must have time to destroy the pseudo-resistant damaged object) models and methods of making urgent anti-crisis decisions in management. The aim of the work is to increase the efficiency of crisis management processes of rapid development of complex multi-parameter organizational and technical systems through the



*development and implementation of new models and methods. environment or, at least, the preservation of targets in times of crisis. To achieve this goal, the paper analyzes complex systems of responsible purpose in terms of their resistance to damage and crises; classification (sorting) of complex systems of responsible purpose with wandering elements is executed; the general algorithm of the general parametric space accumulation process at management of difficult systems is constructed; the implementation is performed and the practical significance of the obtained results is evaluated.*

**Keywords:** reliability; wandering complex system; responsible appointment; crisis management; information system

## Вступ

Складні системи (процеси) відповідального призначення (СС ВП) набувають все більшого поширення в сучасному світі. Відповідальність призначення складних систем обумовлюється такими, наприклад, обставинами, як залежність від останніх здоров'я або, навіть, життя великої кількості людей, екологічної безпеки регіонів та великих матеріальних витрат. До них можна віднести відповідальні промислові та енергетичні споруди, елементи систем транспорту, зв'язку та безпеки життєдіяльності, комп'ютерні системи та мережі, обладнання для складного медичного втручання в організм людини, освітні заклади, тощо. Об'єднує ці системи і робить їх суб'єктами дослідження те, що їхня складність вимагає для управління ними застосування сучасних інформаційних технологій та відповідної «вбудованої» комп'ютерної системи отримання та обробки в реальному часі достовірних даних про стан об'єкта [1,2].

В той же час, існуючі вбудовані інформаційні системи, як правило, повинні бути заздалегідь навчені виявляти відхилення параметрів стану керованого об'єкта від норми, а також, розраховувати і здійснювати (іноді, за допомогою оператора) дії із своєчасної компенсації таких відхилень.

Але, на жаль, існують й інші системи, які потрапляють у ситуації (кризи), коли їхні «паспортні» параметри піддаються суттєвим відхиленням, а існуюча, «вбудована» інформаційна підтримка таким ситуаціям не навчена (блукаючі системи), і оперативно допомогти в он-лайн подоланні наслідків кризи не здатна. Адже керованість СС ВП, боротьба із кризами, які ці процеси спіткають, спирається на наявні адекватні та відносно швидкодіючі (вони повинні встигнути до руйнування пошкодженого об'єкта) моделі та методи прийняття термінових антикризових рішень в управлінні.

## Аналіз літературних джерел

Відповідно до зазначеного вище, виділимо для аналізу окремі понятійні групи загального напрямку «інформаційна складова стійкості блукаючих складних систем відповідального призначення»:

1) інформаційна складова надійності складних систем [3-7];

2) інформаційна складова класифікації елементів складних багатопараметричних систем та виявлення «блукаючих» елементів, що відмовили: [8-

13];

3) динамічні системи із точками у фазовому просторі, до яких збігаються фазові траєкторії дисипативної системи (атракторами) [14,15];

3) інформаційні технології реінжинірингу, ремонту або заміни елементів, що відмовили [16-18];

4) розрахунок часу імплементації пошкодженого елемента та його контролю після ремонту або заміни [19,20].

Боротьба із критичним відхиленням параметрів складних систем відноситься до проблеми їхньої **надійності** – властивості складних об'єктів зберігати у встановлених межах часу значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування [3]. З точки зору довгострокового та безпечного користування такими об'єктами найважливішими їхніми характеристиками є головні компоненти надійності – стійкість, працездатність та ремонтпридатність.

**Стійкість** – здатність складної системи до збереження свого поточного стану в умовах зовнішнього впливу [4]. Стійкість складної системи у великій мірі залежить не тільки від властивостей останньої, але й від параметрів оточуючого середовища та вимог часу. Тому, вивчаючи ту або іншу складну систему, не можна робити висновки про її стійкість без врахування цих чинників.

**Працездатність** – стан складної системи, при якому вона спроможна виконувати певні функції при збереженні значень параметрів в межах, встановлених нормативною документацією [5].

**Ремонтпридатність** – властивість складної системи, що полягає в пристосованості до попередження, виявлення й усунення несправностей, а також підтримання і відновлення працездатного стану системи шляхом проведення технічних обслуговувань і ремонтів [6].

Головним показником ремонтпридатності, в свою чергу, є час відновлення об'єкта після відмови, що містять такі основні складові:

- час виявлення елемента, що відмовив;
- час доставлення необхідних елементів та деталей;
- час ремонту або заміни елементів, що відмовили;
- час налагоджування елемента та контролю після його ремонту або заміни [7].

Класифікація – система розподілення об'єктів по групах відповідно до наперед визначених ознак. В деяких випадках, вживають термін категоризація у

значенні *розподілення об'єктів на категорії*.

Проблема класифікації в цих задачах розв'язується, як правило, в умовах багатопараметричності, нечітких функціональних зв'язків [8] та в просторах, що можуть зовсім не перетинатися або перетинатися частково [9-11]. Це потребує додаткового часу для приведення окремих просторів до єдиного.

В наслідок того, що *класифікація* утворює щонайменш одну не пусту групу (клас), то визначають класифікацію групування як процес утворення класів [12,13].

Класифікація визначає головну роль в тому, що допомагає суттєво спростити в спілкування визначення об'єктів, дозволяючи оперувати більш вузькими і конкретними поняттями.

Якщо ознаки класів сталі та чіткі в математичному сенсі, то ознаки окремих груп класів також є сталими та чіткими, незалежно від того, що відбувається поза межами цього класу. Але, якщо межі цих класів не є сталими, можна вважати що приналежність будь якого елемента відповідної множини до того або іншого класу залежить також від «подій», які відбуваються за його межами.

Таким чином, впливаючи на елементи ззовні та оцінюючи їхній стан після цього впливу можна отримати різні класи таких елементів.

Найкращою групою складних об'єктів є така, яка після збурення «сама» повертається до стану, в якому це збурення та його наслідки скасовуються. До такої групи відносяться динамічні системи з атрактором [14,15].

Перебудова складної системи з метою відновлення після кризи – це, як правило, реінжиніринг – деяка комплексна процедура, яка передбачає розробку нових елементів систем шляхом радикального перепроєктування існуючих елементів, зазвичай на основі інтенсивного використання у нових процесах електронних систем, зміни умов життєвого циклу останніх, що, у свою чергу, дає можливість отримання додаткових часових переваг [16,17].

І, нарешті, згадуючи про терміновість усіх процесів, пов'язаних із антикризовою діяльністю, в науковій літературі присутні роботи про прийняття відповідних рішень за допомогою автоматичних систем [18,19,20].

Важливо зазначити, що під зовнішнім впливом будемо розуміти не тільки деяку дію, яка змінює об'єкт (наприклад: був червоний, став зелений), але і нову інформацію, яку ми отримуємо про елемент (наприклад: стала доступна інформація, що колір елемента зелений).

В цьому випадку головною дією, направленою на елемент з метою уточнення результатів його класифікації, є інформаційна технологія отримання обробки та збереження нової інформації про нього.

## Мета роботи

**Метою роботи** є підвищення ефективності антикризового управління процесами швидкоплинного розвитку складних багатопараметричних організаційно-технічних систем шляхом розробки та впровадження нових моделей та методів, що застосовуються в антикризовому управлінні.

В цьому випадку під ефективністю управління розуміли, в першу чергу, поліпшення таких основних показників, як час досягнення антикризової мети та стійкості системи.

Для досягнення цієї мети в роботі **розв'язані наступні задачі**:

- проаналізовані складні системи відповідального призначення з точки зору їхньої стійкості до пошкоджень та криз;
- виконано класифікацію (сортування) складних систем відповідального призначення із блукаючими елементами;
- побудовано загальний алгоритм процесу накопичення загального параметричного простору при управлінні ПС ВП;
- виконана реалізація та оцінено практичне значення отриманих результатів.

## Розробка інформаційних засад підвищення стійкості складних систем відповідального призначення

**1. Аналіз та класифікація (сортування) складних систем відповідального призначення з точки зору їхньої стійкості до пошкоджень та криз.**

На рис. 1 наведений зразок гіпотетичної часової діаграми життєвого циклу абсолютно стійкої складної системи, адже під час свого життєвого циклу вона без зовнішніх втручань та без порушень границь коридору стійкості досягає кінцевої мети свого існування.

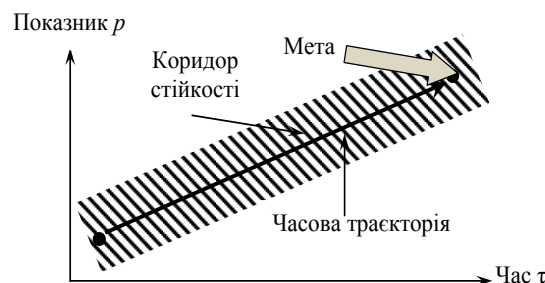


Рис. 1 – Зразок гіпотетичної часової діаграми життєвого циклу абсолютно стійкої складної системи (стійкість дорівнює 100 %)

Ще одним чинником стійкості є умовна ширина деякого «коридору» допусків на показник (показники), за значеннями якого (яких) приймається

рішення про відмову системи в цілому (рис. 2). Отже стійкість в будь-якому випадку є характеристикою нечіткою.

На цьому ж рисунку наведений зразок іншої гіпотетичної часової діаграми життєвого циклу абсолютно нестійкої складної системи, адже під час свого життєвого циклу вона без зовнішніх втручань порушує границю коридору стійкості тобто руйнується і не досягає кінцевої мети свого руху.

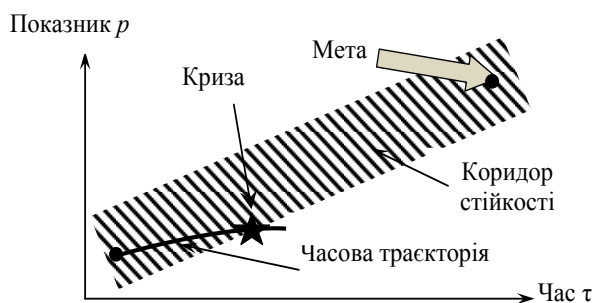


Рис. 2 – Зразок гіпотетичної часової діаграми життєвого циклу абсолютно нестійкої складної системи (стійкість дорівнює 0 %)

Наведені на рис. 1 та 2 зразки є прикладами гіпотетичних граничних станів стійкості складних систем. Між ними в реальному світі лежать системи, стійкість яких не дорівнює ані 0, ані 100 %, а отже тут «працюють» додаткові чинники

Відповідальність призначення тієї або іншої системи також є характеристикою нечіткою, адже вона залежить від суб'єктивної оцінки об'єктів керування користувачами. В роботі відповідальними вважали такі системи (процеси), від діяльності яких залежить доля або, навіть, життя великої кількості людей [10]. Прикладами складних систем відповідального призначення є експлуатація великих енергетичних споруд, елементів транспорту, процеси медичного втручання в організм людини, будівництва, освіти, тощо. Пошук таких моделей і методів, особливо, в умовах наявності несподіваних криз і порушень в перебігу життєвого циклу відповідальних складних процесів – завдання вельми непросте, адже, як це прийнято вважати, складна система – це відкрита система, властивості якої не можуть бути виведені із властивостей окремих її

елементів. Таким чином, з точки зору стійкості множину складних систем відповідального призначення можна умовно розподілити на декілька підмножин.

Із складних систем з точки зору стійкості функціонування до пошкоджень та криз можна на першому етапі класифікації умовно виділити дві групи: абсолютно стійкі та абсолютно нестійкі (базові підсистеми).

**I. Стійкі системи.** Базову підмножину складних систем відповідального призначення назвемо **абсолютно стійкою (або абсолютно надійною)** (рис. 1), якщо під час їхнього функціонування кризи взагалі не відбуваються, і тому вони не потребують відновлення. Стійкість таких систем є наслідком не тільки внутрішніх особливостей останніх, а й зовнішніх умов їхньої експлуатації.

Зрозуміло, що у випадку дійсно складних систем ані абсолютно стійких, ані абсолютно нестійких не буває. Адже у першому випадку система у своєму русі в межах «коридору стійкості» у часі повинна досягти кінцевої мети свого існування, незалежно від пошкоджень та криз які її спіткають.

У цьому випадку можна вважати, що в цій системі кризи та пошкодження за період свого руху до мети або не відбуваються взагалі, або складна система їх не помічає (рис. 1).

**II. Нестійкі системи.** Базову множину складних систем назвемо **абсолютно нестійкими (УН)**, якщо після кризи, тобто перетину часовою траєкторією границі коридору стійкості, система взагалі не може існувати та розвиватися за планом (хоча попередній план може існувати) без постійних змін та криз, а також боротьби з ними. Абсолютно нестійка система при першому ж пошкодженні або кризі виходить за межі дозволеного коридору стійкості і назад до нього не повертається (рис. 2), тобто мета її руху не досягається.

Базові підсистеми мають лише теоретичний характер, оскільки в реальному житті вони практично не зустрічаються або зустрічаються лише на обмеженому часовому діапазоні.

Узагальнення головних властивостей базових складних підсистем I та II здійснено до табл. 1.

Таблиця 1 – Підкласи базових складних систем відповідального призначення з точки зору їхньої стійкості до пошкоджень

| №№ з/п | Назва підкласу систем відповідального призначення | Пошкодження     | Чинники стійкості | Засоби стійкості |
|--------|---------------------------------------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 1      | 2                                                 | 3               | 4                 | 5                |
| I      | <b>Абсолютно стійкі</b><br>(рис. 1)               | Не відбуваються | –                 | –                |
| II     | <b>Абсолютно нестійкі</b><br>(рис. 2)             | Відбуваються    | Відсутні          | Відсутні         |

Прикладом таких систем є будь-які організаційні проекти або програми, наприклад, будівництва деяких складних споруд, які мають конкретні строки початку та завершення. Саме в цей період менеджмент проекту має постійно передбачати та ліквідувати наслідки криз у вигляді пошкоджень системи.

Крім базових, існують системи, які після кризи «борються» за свою працездатність, тобто виявляють умовну стійкість.

**III. Умовно стійкі системи.** Підмножину складних систем назвемо **умовно стійкими (УС)**, якщо після кризи, тобто перетину часовою траєкторією границі коридору стійкості, система та (або) її оточення роблять усе, щоб повернути цю траєкторію до коридору стійкості. Прикладом УС є майже усі види транспорту, процеси медичного втручання, освітнього процесу, тощо.

Іноді вони роблять це самі, а іноді – тільки в результаті швидкого прийняття та виконання деякого антикризового вердикту, отриманого порівнянням параметрів кризи та параметрів наявних (відомих та забезпечених усім необхідним) можливих рішень.

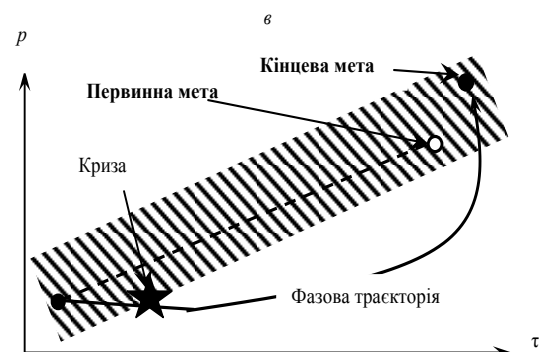
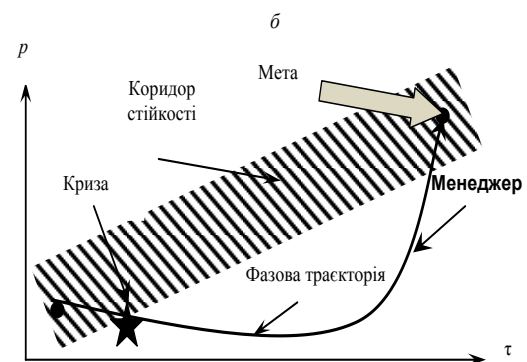
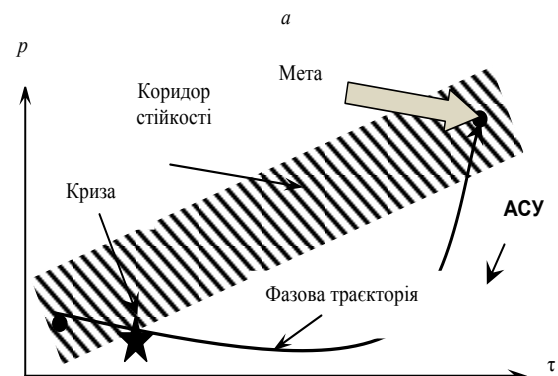
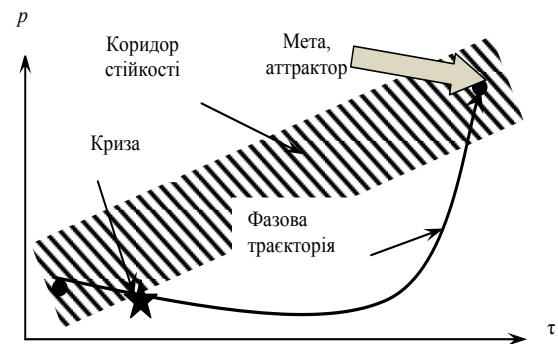
Звісно, в цьому випадку починає відігравати вирішальну роль час, який під час кризи відведено на її подолання моделлю описаною в інструкції.

Реальна система повинна мати деякі можливості повернення до заданого коридору і, таким чином, вбудована система управління повинна супроводжувати її рух до мети (рис. 3, а – з), протидіючи на своєму шляху кризам та пошкодженням в системі.

Зазначимо також, що один і той же процес можна розглядати або як УН, або УС, тому менеджери УС систем повинні намагатися не допускати до «звалювання» УС до НС, а якщо це все ж таки відбулося, переходити до зовсім іншого типу управління, наприклад, штатне управління літаком переходить до управління процесом «Аварійно посадити літак». Коли життєвий цикл складної багатопараметричної системи відповідального призначення спіткає істотна криза, наслідки можуть бути вельми катастрофічними, тому антикризова складова такого управління є досить актуальною.

В цьому випадку для ліквідації наслідків кризи необхідно застосувати відповідні антикризові дії, зміст і забезпечення яких можуть бути заздалегідь запланованими (перша група), або таким, які були розроблені вже після того, як несподівана криза відбулася (друга група).

В такому випадку фактично маємо **складну адаптивну систему** відповідального призначення (САС ВП), причому, щодо кінцевого результату користувачам таких підсистем байдуже, виникає ця адаптивність за рахунок внутрішніх властивостей останніх та їхніх елементів або за рахунок активних управляючих впливів на систему деяких активних менеджерів.



- а) – автостійка система із аттрактором;  
б) – примусово стійка система із вбудованою АСУ;  
в) – примусово стійка система під управлінням менеджеру;  
г) – управління проектом із зміною мети проектною діяльністю

Рис. 3 – Зразки фазових діаграм життєвого циклу умовно нестійких складних систем

Питанням є, як виглядає така протидія та якими засобами вона може бути реалізована на практиці.

По-перше, це можуть бути особливості конструкції системи, які роблять мету руху останньої у фазовій площині атрактором цієї системи (рис. 3, а). Тоді повернення системи після пошкодження до запланованого дозволеного коридору фазової траєкторії відбувається автоматично. При цьому стійкість таких систем достатньо висока, хоча і не дорівнює 100 %.

В багатьох реальних системах повернення умовно стійких об'єктів до дозволеного коридору відбувається «вручну». Для цього оператор повинен мати дві системи управління поверненням. Перша – визначення причин кризи за її зовнішніми проявами (встановлення діагнозу) і друге – вибір та реалізація антикризових дій, які цьому діагнозу відповідають.

Переходи від кризи до діагнозу та від діагнозу до антикризових дій часто бувають заздалегідь відомими та прописаними в інструкціях якими користується оператор. Такий перехід передбачає також, що прописані інструкцією антикризові протидії забезпечені в системі програмно та матеріально.

У випадку, якщо в системі відбулася «відома» (в тому сенсі, що її опис є в інструкції) криза, а також є час, необхідний для виконання, передбачених інструкцією дій, то така система може вважатися умовно стійкою.

Якщо в інструкції не описані ознаки кризи, яка відбулася в системі, то у оператора залишається остання надія: власними можливостями встановити причину кризи (поставити діагноз), а також знайти та реалізувати засоби подолання цієї кризи.

Оскільки заздалегідь результати таких дій оператора невідомі, ймовірність «врятувати» пошкоджену систему нижче за ймовірність описаних вище класів систем, але вона все ж таки не дорівнює нулю.

Як бачимо розв'язання перелічених проблем, незалежно від фізичної структури складних систем, – механічної, медичної, технологічної, тощо, – лежить в інформаційній площині, оскільки розв'язання антикризових задач потребує банків даних (інструкції, тощо), а також здійснення пошуку та використання інформації для прийняття відповідних антикризових рішень.

Складні адаптивні системи відповідального призначення повинні не тільки компенсувати наслідки ризикових подій, але ще й повертати керований об'єкт до стану, з якого він може стартувати ще невизначену кількість разів. В якості прикладу можна розглянути літак під час польоту, коли у разі виникнення кризи він під дією САС ВП не тільки врятовується, але й готовий після цього повторювати польоти аж до зношування.

Далі розглянемо реальні умовно стійкі складні підсистеми із заздалегідь вбудованою системою

опору пошкодженням. До них відносяться такі.

**III-1. Автостійкі системи** (рис. 3, а). Відновлення таких систем після пошкодження полягає в автоматичному поверненні фазової траєкторії до запланованого заздалегідь «коридору». Мета функціонування системи також зберігається. Повернення відбувається автоматично, завдяки конструкції системи, для цього точка мети на діаграмі повинна бути атрактором системи. Атрактори можуть бути точковими (точки рівноваги), лініями (граничні цикли), поверхнями, і навіть складними багатовимірними фрактальними структурами [21].

**III-2. Примусово стійкі системи із вбудованою АСУ** (рис. 3, б). Відновлення таких систем після пошкодження також полягає у поверненні фазової траєкторії до запланованого заздалегідь «коридору». Мета функціонування системи в цьому випадку також зберігається.

Примусове відновлення після пошкодження відбувається тут, як правило, під управлінською дією деякої внутрішньої АСУ. В останньому випадку мається на увазі, що АСУ має дві заздалегідь вбудовані підсистеми виявлення причини кризи в банку даних АСУ та засобів її подолання.

**III-3. Примусово стійкі системи під «ручним» управлінням**, в яких під час їхнього функціонування також відбуваються кризи, і тому вони також потребують відновлення. Однак таке відновлення вже не повертає рух системи до запланованої траєкторії, як в пп. 3 та 4, і тому загальна мета такого руху також має бути змінена (рис. 3, д). Такі системи відносяться до організаційних проектів, а заходи з їхнього відновлення – до **управління проектами** (наприклад, проект створення комп'ютерної мережі).

**III-4. Управління проектами та програмами** (рис. 3, е). Система складається з планування, організації та управління ресурсами з метою успішного досягнення цілей та завершення завдань проекту. Проект – це обмежений часовими рамками процес, що має визначений початок та кінець, зазвичай обмежений датою, але також може обмежуватися фінансуванням або досягненням результатів, який здійснюється для реалізації унікальних завдань.

Узагальнення головних властивостей реальних складних підсистем із заздалегідь вбудованою системою опору пошкодженням здійснено в табл. 2 та 3.

## **2. Класифікація (сортування) складних систем відповідального призначення із блукаючими елементами**

Однією з перших завдань інформаційної системи відновлення пошкоджень в складних об'єктах відповідального призначення є пошук того елемента об'єкта, де це пошкодження «зародилося», при умові, що з параметрів наслідків пошкодження

місце первинної кризи не впливає.

Наприклад, якщо в трубопроводі системи впаде нижче припустимого тиск, то безпосередньо з цього факту не можна визначити, хто в цьому «винен», – поламка насоса, засмічення труби або розрив останньої.

Якщо уявити простір параметрів такої системи як багатовимірний простір станів останньої, то ймовірність знаходження пошкоджень в деяких точках цього простору може суттєво відрізнятись. В цьому випадку модель у вигляді простору таких ймовірностей може значно спростити пошук «винуватця» пошкодження серед деякої «хмари» ймовірних пошкоджень (встановлення діагнозу), а

отже й його ремонту (лікування).

В складних системах при постійній зміні умов функціонування «хмара» ймовірних пошкоджень рухається в межах простору станів системи, створюючи тим самим блукаючу складну систему відповідального призначення.

Зрозуміло, що для практичного врахування особливостей таких систем у відповідального менеджера повинні бути максимально *достовірні* та *оперативні* моделі, як самої блукаючої складної системи, так і процесів, що в них відбуваються під час кризи.

Таблиця 2 – Підкласи реальних складних підсистем із заздалегідь вбудованою системою опору кризам з точки зору їхньої стійкості до відомих можливих пошкоджень

| №№ з/п | Назва підкласу систем відповідального призначення                             | Пошкодження         | Чинники стійкості                                   | Засоби стійкості                                                               |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1      | 2                                                                             | 3                   | 4                                                   | 5                                                                              |
| III-1  | <b>Автостійки системи із атрактором</b><br>(рис. 3, а)                        | <b>Відбуваються</b> | Автоматичне повернення до атрактора                 | Конструкція системи, яка містить атрактор                                      |
| III-2  | <b>Примусово стійки системи із вбудованою АСУ</b><br>(рис. 3, б)              |                     | Автоматичне виявлення конкретних причин пошкодження | Наявні запасні матеріали, інвентар та пристосування під конкретне пошкодження  |
| III-3  | <b>Примусово стійки системи під «ручним» управлінням</b><br>(рис. 3, в)       |                     | Виявлення конкретних причин пошкодження             | Наявні запасні матеріали, інвентар та пристосування, які передбачені в системі |
| III-4  | <b>Проекти та програми із зміною мети проектної діяльності</b><br>(рис. 3, г) |                     | Виявлення конкретних причин пошкодження             | Наявні запасні матеріали, інвентар та пристосування, які передбачені в системі |

Інакше, менеджер не зможе ані поставити правильний «діагноз», ані запропонувати ефективне рішення для повернення пошкодженого кризою процесу в заплановані рамки руху.

Адже, в загальному випадку, коли вже починає розвиватися криза, моделей для пошуку її причин (діагностики) не існує, методи як боротися з її наслідками ще не відомі, і від вчасного створення

цих моделей та методів саме й залежить адаптивність САС до виконання нею відповідального призначення. Мало того, побудувати достовірну модель «криза» – «причина її виникнення» недостатньо. Потрібні не менш достовірні інформаційні моделі процесів та обладнання для імплементації антикризових рішень.

Таблиця 3 – Підклас реальних складних систем без заздалегідь вбудованої системи опору блукаючим кризам (псевдостійкі системи)

| №№ з/п | Назва підкласу систем відповідального призначення | Чинники стійкості                               | Засоби стійкості                                                                 | Засоби стійкості                                                          |
|--------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1      | 2                                                 | 3                                               | 4                                                                                | 5                                                                         |
| IV     | <b>Псевдостійки системи (ПСС)</b>                 | Он-лайн розробка моделей та методів відновлення | Нові програмні та технічні засоби виявлення причин кризи (постановка «діагнозу») | Нові програмні та технічні засоби відновлення ПСС після кризи (лікування) |



### 3. Загальний алгоритм процесу накопичення загального параметричного простору при управлінні ПС ВП.

Важливою проблемою при прийнятті антикризових рішень при управлінні псевдостійкими складними системами відповідального призначення є те, що параметри самої системи, кризи та антикризових рішень, як правило, відносяться до різних просторів, і при розв'язанні таких проблем необхідно ці простори об'єднувати до єдиного, в якому можуть бути представлені моделі усіх «учасників» процесу (рис. 4). Алгоритм процесу накопичення загального простору, для опису антикризових рішень при управлінні псевдостійкими складними системами відповідального призначення, для моделювання та аналізу псевдостійкої складної системи, пошкодженої кризою складається з

наступних кроків.

Крок 1. Опис псевдостійкої складної системи відповідального призначення з визначенням параметрів системи та їх допустимих границь.

Крок 2. Побудова динамічного простору  $P_{CC} = \langle p_1, p_2, \dots, p_n, \tau \rangle$  для аналізу псевдостійкої складної системи.

Крок 3. Чисельне оцінювання кризи в псевдостійких складних системах відповідального призначення, прийняття рішення про наявність кризи.

Крок 4. Побудова простору параметрів кризи  $P_K$  для аналізу псевдостійкої складної системи, пошкодженої кризою.

Крок 5. Об'єднання просторів складної системи  $P_{CC}$  та кризи  $P_K$  для аналізу псевдостійкої складної системи, пошкодженої кризою.

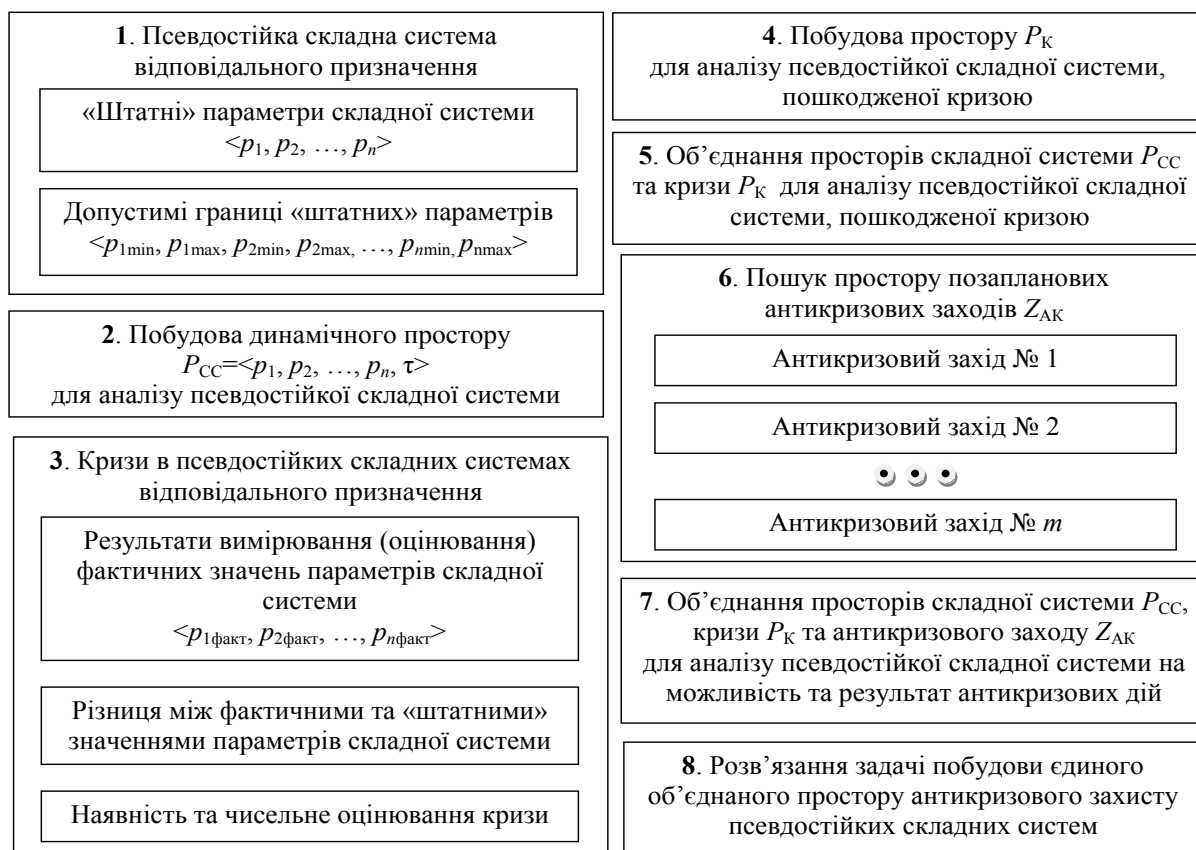


Рис. 4 – Схема алгоритму процесу накопичення загального параметричного простору при управлінні ПС ВП

Крок 6. Прийняття простору позапланових антикризових заходів  $Z_{AK}$ .

Крок 7. Об'єднання просторів складної системи  $P_{CC}$ , кризи  $P_K$  та антикризового заходу  $Z_{AK}$  для аналізу псевдостійкої складної системи на можливість та результат антикризових дій.

**4. Практичне значення отриманих результатів** полягає у їхньому використанні із позитивним ефектом в процесі пошуку антикризових

рішень в освітній системі Одеського національного політехнічного університету, який вимагав термінових змін, пов'язаних із карантинном [1, 2].

В спланований освітній процес були внесені корективи, які забезпечували його планове завершення в попередньо невизначених умовах, як для студентів, так і для викладачів: дистанційно в синхронному або асинхронному режимах. Нові умови виглядають так: можливості фізичного відвідування закладів вищої освіти здобувачами та



викладачами обмежені або відсутні, традиційні інструменти семестрового контролю та атестації не можуть бути застосовані з причин непереборної зовнішньої сили (природні катаклізми, заходи карантинного порядку та інші форс-мажорні обставини).

В результаті одержані такі результати:

- учбовий план змінено тільки в частині виконання лабораторних робіт, які не можуть бути організовані дистанційно;

- дистанційна комунікація учасників освітнього процесу здійснювалася через засоби комунікації, вбудовані до систем управління навчанням, електронну пошту, месенджери, відеоконференції;

- проведені усі види контролю засвоєння матеріалів лекцій та практичних занять;

- проведені усі планові захисти курсових та дипломних робіт;

- виконані роботи з виготовлення та розповсюдження усіх видів супровідної документації

### Висновки

Проаналізовані складні системи відповідального призначення з точки зору їхньої стійкості до пошкоджень та криз.

Виконано класифікацію (сортування) складних систем відповідального призначення із блукаючими елементами. Запропоновані підкласи стійких систем, в яких стійкість досягається різними методами.

Запропоновано також підклас псевдостійких систем із «блукаючими» причинами виникнення кризи і наведені основні засади їхнього подолання у заданий природою пошкодження час.

Побудовано загальний алгоритм процесу створення загального параметричного простору при управлінні складними системами відповідального призначення.

З точки зору нашого дослідження псевдостійкі системи мають такі властивості. Їхній опис має ознаки класифікації, а отже, може бути віднесений до наукової новизни.

Вперше з класу чітких складних систем відповідального призначення виділено підклас нечітких інформаційно-псевдостійких систем, які після внутрішнього пошкодження самостійно вже не можуть досягти мети свого функціонування, але можуть повернутися к траєкторії руху до мети, завдяки отриманим після пошкодження додатковим, заздалегідь невідомим, та розрахованим менеджером управління зовнішнім інформаційним впливам.

Виконана реалізація та оцінено практичне значення отриманих результатів. Реалізація антикризового управління псевдостійкими системами має усі ознаки інформаційних технологій, адже вона потребує розробки нових моделей та методів отримання, обробки, передачі та зберігання

інформації про параметри пошкоджень, криз та антикризових рішень для відновлення псевдостійких систем.

Практичне значення отриманих результатів полягає у їхньому використанні із позитивним ефектом в процесі пошуку антикризових рішень в освітній системі Одеського національного політехнічного університету, який вимагав термінових змін, пов'язаних із карантинном.

### Список літератури

1. Oborskyi Hennadii O., Saveleva Oksana S., Stanovska Irida I., Saukh Igor A. Project manager job description as one of project management key success factors. *Herald of Advanced Information Technology*. 2020. Vol. 3, No. 2. P. 72–82. doi:10.15276/hait.03.2019.7
2. Oborskyi Hennadii O., Saveleva Oksana S., Stanovska Irida I., Saukh Igor A. Information models and methods of the structural crises consequences overcoming in the educational space. *Herald of Advanced Information Technology*. 2020. Vol. 3. No. 3. P. 185–198. doi: 10.15276/hait.03.2020.7
3. Оборський Г. О., Савельєва О. С., Торопенко А. В. *Надійність технологічних систем та обладнання*. Одеса: Бахва, 2013. 560 с.
4. Николіс Г. Пригожин И. *Самоорганізація в неравновесних системах: от диссипативних структур к упорядоченности через флуктуации*. М.: Мир. 1979. 512с.
5. Становський А. Л., Савельєва О. С., Бибік Т. В. Оценка работоспособности сложных технических систем, связанных с повышенной опасностью в эксплуатации. *Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в освіті»*. – Херсон: ХПТК ОНПУ, 14–15 травня 2009. Ч. 1. С. 46–52.
6. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення.
7. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. *Основи творення машин*. Харків: Вид-во «НТМТ», 2017. 448 с.
8. Stanovsky A. L., Tonkonog V. M., Bibik T. V. Automation of management of hazardous facilities. *Materials of the International scientific and technical conference "Automation: problems, ideas, solutions."* Sevastopol: SNTU, September 7–12, 2009. P. 30–33.
9. Skrimizea, Eirini; Haniotou, Helene; Parra, Constanza. On the 'complexity turn' in planning: An adaptive rationale to navigate spaces and times of uncertainty. *Planning Theory*. 2019. 18. P. 122–142. doi: 10.1177/1473095218780515.
10. Становська І. І., Колеснікова К. В. Стратифікація індивідуальних компетенцій з метою побудови динамічних морфологічних моделей проектного управління. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 30 Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2019. № 1 (1326). С. 30–36.
11. Ковалев І. В., Тынченко С. В., Завьялова О. И., Лайков А. Н. Система поддержки многоатрибутивного принятия решений при управлении сложными системами. *Программные продукты и системы*. 2009. № 2. С. 142–144.
12. Класифікація. *Юридична енциклопедія*: [у 6

- т./К.: Українська енциклопедія ім. М. П. Бажана, 2001. Т. 3. 792 с.
13. Класифікація. Великий тлумачний словник сучасної української мови / уклад. і гол. ред. В. Т. Бусел. – 5-те вид. Ірпінь: Перун, 2005.
  14. Thimas H. Cormen; Charles E. Leiserson; Ronald L. Rivest; Clifford Stein. *Introduction to Algorithms* (2nd ed.) The MIT Press.
  15. Gorodetski A., Ilyashenko Yu. Minimal and strange attractors. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 1996. Vol. 6. No. 6. P. 1177–1183.
  16. Зачко О. Б. Моделі, механізми та інформаційні технології портфельного управління розвитком складних регіональних систем безпеки життєдіяльності. Під заг. ред. Рака Ю. П. – Монографія. – Львів: Вид-во ЛДУ БЖД, 2015. 126 с.
  17. Колеснікова К. В., Монова Д. А., Торопенко А. В., Торопенко О. В., Абу Шена Осам Мохаммед Алі. Управління проектом реінжинірингу будівельних конструкцій по обмеженнях у всіх функціональних областях. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 5/2 (31). С. 18–23.
  18. Волошин О. Ф., Машченко С. О. *Моделі та методи прийняття рішень*. Київ, 2011.
  19. Іванов А. О. *Теорія автоматичного керування*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. 2003. 250 с.
  20. Емелін А. Множества. Операции над множествами. *Отображение множеств. Мощности множеств*. URL: <http://mathprofi.ru/mnozhestva.html>.
  21. technologies in the field of education". - Kherson: KhPTK ONPU, 14-15 May 2009, Part 1, pp. 46-52.
  22. DSTU 2860-94 Reliability of equipment. Terms and definitions.
  23. Buchynsky M., Ya., Gorik O. V., Chernyavsky A. M., Yakhin S.V. *Fundamentals of machine creation*. Kharkiv, NTMT Publishing House, 2017. 448 p.
  24. Stanovsky A. L., Tonkonog V. M., Bibik T. V. Automation of management of hazardous facilities. *Materials of the International scientific and technical conference "Automation: problems, ideas, solutions."* Sevastopol, SNTU, September 7-12, 2009, pp. 30-33.
  25. Skrimizea Eirini, Haniotou Helene, Parra Constanza. On the 'complexity turn' in planning: An adaptive rationale to navigate spaces and times of uncertainty. *Planning Theory*, 2019, 18, pp. 122-142, doi: 10.1177/1473095218780515.
  26. Stanovska I. I., Kolesnikova K. V. Stratification of individual competencies in order to build dynamic morphological models of project management. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". 30 Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management*, 2019, 1 (1326), pp. 30-36.
  27. Kovalev I. V., Tynchenko S. V., Zavyalova O. I., Laikov A. N. A system of support for multi-attribute decision making in managing complex systems. *Software products and systems*, 2009, No. 2, pp. 142-144.
  28. Classification. *Legal encyclopedia: [in 6 vols.]*. K. Ukrainian encyclopedia. MP Bazhana, 2001, Vol. 3. 792 p.
  29. Classification. *Large explanatory dictionary of the modern Ukrainian language / style. and goal. ed. W. T. Busel*. 5 types. Irpen. Perun, 2005.
  30. Thimas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein. *Introduction to Algorithms* (2nd ed.) The MIT Press.
  31. Gorodetski A., Ilyashenko Yu. Minimal and strange attractors. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1996, Vol. 6, No. 6, pp. 1177-1183.
  32. Zachko O. B. Models, mechanisms and information technologies of portfolio management of development of complex regional systems of life safety. Under the general. ed. Raka Yu. P. - Monograph. - Lviv: LSU BJD Publishing House, 2015. 126 p.
  33. Kolesnikova K. V., Monova D. A., Toropenko A. V., Toropenko, O. V., Abu Shen Osama Mohammed Ali. Project management of reengineering of building structures on constraints in all functional areas. *Technological audit and production reserves*, 2016, № 5/2 (31), pp. 18-23.
  34. Voloshin O. F., Mashchenko S. O. *Models and methods of decision making*. Kiev, 2011.
  35. Ivanov A. A. *Theory of automatic control*. Dnepropetrovsk, National Mining University, 2003. 250 p.
  36. Emelin A. Sets. *Operations on sets. Display of sets. The cardinality of the set*. Available at: <http://mathprofi.ru/mnozhestva.html>.

#### References (transliterated)

1. Oborskyi Hennadii O., Saveleva Oksana S., Stanovska Iraida I., Saukh Igor A. Project manager job description as one of project management key success factors. *Herald of Advanced Information Technology*, 2020, Vol. 3, No.2, pp. 72-82, doi:10.15276/hait.03.2019.7.
2. Oborskyi Hennadii O., Saveleva Oksana S., Stanovska Iraida I., Saukh Igor A. Information models and methods of the structural crises consequences overcoming in the educational space. *Herald of Advanced Information Technology*, 2020, Vol. 3, No. 3, pp. 185-198, doi: 10.15276/hait.03.2020.7.
3. Oborskyi H. O., Saveleva O. S., Toropenko A. V. *Reliability of technological systems and equipment*. Odessa, Bakhva, 2013. 560 p.
4. Nicolis G., Prigogine I. *Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to ordering through fluctuations*. M., Mir, 1979. 512 p.
5. Stanovsky A. L., Savelyeva O. S., Bibik T. V. Evaluation of the performance of complex technical systems associated with increased danger in operation. *Materials of the 1st All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Recent trends in the development of information*

#### Відомості про авторів (About authors)

**Становська Іраїда Іванівна** – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри вищої математики та моделювання систем, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0003-0601-7658; e-mail [stanovskairaida@gmail.com](mailto:stanovskairaida@gmail.com).

**Iraida Stanovska** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Higher Mathematics and Modeling Systems Department, Odessa National Polytechnic University Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0601-7658; e-mail [stanovskairaida@gmail.com](mailto:stanovskairaida@gmail.com).

**Становський Олександр Леонідович** – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0002-0360-1173; e-mail ostanovskiy@gmail.com.

**Oleksandr Stanovskyi** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0360-1173; e-mail ostanovskiy@gmail.com.

**Науменко Євгенія Олександрівна** – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, старший викладач кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0002-6963-3995; e-mail naumenko.e.o@onu.ua

**Ievgeniia Naumenko** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6963-3995; e-mail naumenko.e.o@onu.ua

**Саух Ігор Анатолійович** – магістр, Одеський національний політехнічний університет, аспірант кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0001-5558-1488; e-mail: isaukhl@gmail.com

**Igor Saukh** – Master, graduate student of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5558-1488; e-mail: isaukhl@gmail.com

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Становська І. І., Становський О. Л., Науменко Є. О., Саух І. А. Інформаційна складова стійкості блукаючих складних систем відповідального призначення. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 82-92. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.13.

*Please cite this article as:*

Stanovska I., Stanovskyi O., Naumenko I., Saukh I. Information component of stability of wandering complex systems of responsible purpose. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 82-92, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.13.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Становская И. И., Становский А. Л., Науменко Е. А., Саух И. А. Информационная составляющая устойчивости блуждающих сложных систем ответственного назначения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 82-92. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.13.

**АННОТАЦІЯ** Сложные системы (процессы) ответственного назначения получают все большее распространение в современном мире. Ответственность назначения сложных систем обуславливается такими, например, обстоятельствами, как зависимость от последних здоровья или даже жизни большого количества людей, экологической безопасности регионов и больших материальных затрат. К ним можно отнести ответственные промышленные и энергетические сооружения, элементы систем транспорта, связи и безопасности жизнедеятельности, компьютерные системы и сети, оборудование для сложного медицинского вмешательства в организм человека, образовательные учреждения и тому подобное. Объединяет эти системы и делает их субъектами исследования то, что их сложность требует для управления ими применения современных информационных технологий и соответствующей «встроенной» компьютерной системы получения и обработки в реальном времени достоверных данных о состоянии объекта. Существующие встроенные информационные системы, как правило, должны быть заранее обучены выявлять отклонения параметров состояния управляемого объекта от нормы, а также рассчитывать и осуществлять (иногда, с помощью оператора) действия по своевременной компенсации таких отклонений. Но, к сожалению, существуют и другие системы, которые попадают в ситуации (кризиса), когда их «паспортные» параметры подвергаются существенным отклонением, а существующая, «встроенная» информационная поддержка таких ситуаций не обучена, и оперативно помочь в он-лайн преодолении последствий кризиса не способна. Ведь управляемость СС ОП, борьба с кризисами, которые эти процессы сталкиваются, опирается на имеющиеся адекватные и относительно быстродействующие (они должны успеть к разрушению псевдостойкого поврежденного объекта) модели и методы принятия срочных антикризисных решений в управлении. Целью работы является повышение эффективности антикризисного управления процессами скоротечного развития сложных многопараметрических организационно-технических систем путем разработки и внедрения новых моделей и методов. Под эффективностью управления понимали улучшения по сравнению с планом следующих основных показателей процесса, как время, стоимость, параметры качества продукта, взаимодействие с окружающей средой или, по крайней мере, сохранения плановых показателей в условиях кризисов. Для достижения этой цели в работе проанализированы сложные системы ответственного назначения с точки зрения их устойчивости к повреждениям и кризисам; выполнено классификацию (сортировку) сложных систем ответственного назначения с блуждающими элементами; построен общий алгоритм процесса накопления общего параметрического пространства при управлении сложными системами; выполнена реализация и оценены практическое значение полученных результатов.

**Ключевые слова:** надежность; блуждающая сложная система; ответственное назначение; антикризисное управление; информационная система

Надійшла (received) 29.11.2020

УДК 006.71.8

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.14

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ІНТЕГРУВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ОБ'ЄКТІВ КВАЛІМЕТРІЇ

О. М. ЧЕРНЯК\*, Н. А. СОРОКОЛАТ, І. В. КАНИЦЬКА

кафедра охорони праці, стандартизації та сертифікації, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: olena-cheraniak@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Проведено аналіз існуючих наукових підходів до кількісного оцінювання якості об'єктів кваліметрії різної природи, що мають різні показники якості з різними шкалами вимірювання. Розглянуто ряд сучасних наукових робіт, пов'язаних з оцінюванням якості продукції, процесів та послуг, визначено їхні недоліки та можливі межі застосування. У результаті проведеного аналізу було виявлено, що у кваліметрії існує ряд невирішених задач, рішення яких могло би надати можливість розробляти нові практичні методики, які були б достатньо універсальними та могли б ефективно застосовуватись при оцінюванні якості об'єктів різної природи. В результаті аналізу доведено актуальність теми та визначено мету роботи - розробити методику отримання комплексної оцінки показника якості, що буде придатна для оцінювання об'єктів кваліметрії різної природи. Для узагальненого оцінювання якості об'єктів кваліметрії запропоновано визначати оцінку по кожній його характеристиці або критерію, а потім визначати єдину оцінку, враховуючи всі його характеристики. Для визначення узагальненого показника якості одного критерію пропонується застосувати метод інтегрування, тобто знайти площу під ламаною поверхнею, яка вийшла в результаті з'єднання точок на площині системи координат XOY. Для цього застосовуються квадратурні формули з використанням методу трапецій. Метод трапецій - це метод наближеної інтеграції, корисний у тих випадках, коли немає можливості знайти первісну функції й обчислити інтеграл через неї. Запропоновано покроковий алгоритм визначення узагальненого показника якості об'єкту кваліметрії різної природи, застосовуючи інтегрування методом трапецій. У такому випадку отримаємо багатокритеріальну оцінку якості об'єкту кваліметрії. Для інтегрування, можна застосовувати інші методи, що дасть можливість визначити найбільш ефективний з них. Розроблену методику можна застосовувати для багатокритеріального оцінювання якості об'єктів кваліметрії, якщо замість часової шкали застосовувати шкалу одиничних оцінок різних критеріїв, якими характеризується об'єкт.

**Ключові слова:** кваліметрія; узагальнений показник; багатокритеріальне оцінювання якості; метод інтегрування; метод трапецій

## APPLICATION OF THE INTEGRATION METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF QUALIMETRY OBJECTS

O. CHERNIAK, N. SOROCOLAT, I. KANYTSKA

Department of labor safety protection, standardization and certification, UEPA, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The analysis of existing scientific approaches to the quantitative assessment of the quality of qualimetry objects of different nature, which have different quality indicators with different measurement scales, is carried out. A number of modern scientific works related to the assessment of the quality of products, processes and services are considered, their shortcomings and possible boundaries of application are identified. As a result of the analysis, it was revealed that there are a number of unsolved problems in qualimetry, the solution of which could make it possible to develop new practical methods that would be quite universal and could be effectively used in assessing the quality of objects of various kinds. As a result of the analysis, the relevance of the topic was proved and the goals of the work were determined - to develop a methodology for obtaining a comprehensive assessment of the quality indicator, which will be suitable for assessing qualimetry objects of various kind. For a generalized assessment of the quality of qualimetry objects, it is proposed to determine an assessment for each of its characteristics or criteria, and then to determine a single assessment, taking into account all its characteristics. To determine the generalized quality indicator of one criterion, it is proposed to apply the integration method, that is, find the area under the broken surface, which emerged as a result of connecting points on the plane of the XOY coordinate system. For this, quadrature formulas are applied using the trapezoidal method. The trapezoid method is an approximate integration method, useful in cases where it is not possible to find the original function and calculate the integral through it. A step-by-step algorithm for determining a generalized quality indicator of a qualimetry object of various natures is proposed, using the integration by the trapezium method. In this case, we get a multi-criteria assessment of the quality of the qualimetry object. For integration, you can apply other methods, which will determine the most effective one. The developed technique can be used for multi-criteria assessment of the quality of qualimetry objects if, instead of a time scale, a scale of single assessments of various criteria that characterizes the object is used.

**Keywords:** qualimetry; generalized indicator; multi-criteria quality assessment; integration method; trapezium method

### Вступ

Кваліметрія, це науковий напрям, який вивчає методологію та проблематику кількісного оцінювання якості будь-яких об'єктів – предметів, явищ або

процесів, тобто об'єктів різної природи і являється складовою частиною науки про якість - квалітології. Теорія кваліметрії вивчає загальні проблеми оцінювання якості. Прикладна кваліметрія спрямована на вивчення проблем оцінювання якості

конкретних. об'єктів різної природи. Кваліметрія міжгалузева наукова дисципліна, тому з низки завдань суміжна зі стандартизацією, метрологією, економікою, правом, психологією тощо [1].

Об'єкт кваліметрії різної природи – будь-який предмет або процес, який може бути:

- живий (людина) або неживий (автомобіль);
- продукт праці (будинки) або продукт природи (рельєф місцевості);
- матеріальний (промислове підприємство) або ідеальний (художній твір);
- продукція (предмет одягу) або послуга (медичні послуги);
- предмети (автошляхи) або процеси (процеси життєдіяльності).

У кваліметрії є ряд наукових напрямків дослідження, що стосуються усіх об'єктів, незалежно від їх природи – це задачі, пов'язані з багатокритеріальним оцінюванням. Один з таких напрямків – це задачі приведення різнорозмірних показників якості об'єктів до єдиної безрозмірної шкали. Другий – це об'єднання оцінок показників якості у єдину (комплексну) оцінку об'єкту кваліметрії.

### Мета роботи

Розробити методику отримання комплексної оцінки показника якості, що буде придатною для оцінювання об'єктів кваліметрії різної природи.

### Викладення основного матеріалу

У наукових дослідженнях, пов'язаних з оцінюванням якості об'єктів кваліметрії, важливе місце займає вид залежності між фактичним показником якості та його оцінкою на безрозмірній шкалі. Адже показники якості не завжди розподілені рівномірно і не завжди мають лінійну залежність з їх оцінкою. Тобто існують математичні залежності між показниками якості об'єктів кваліметрії та їх оцінкою, які пов'язані математичною моделлю. Визначення об'єктивних математичних залежностей для отримання комплексних оцінок показників якості – трудомістке завдання, що вимагає глибокого і всебічного наукового дослідження.

У переважній більшості методик оцінювання якості прийнято, що оцінка залежить від значень відповідних вимірних показників якості та базового показника. У загальному вигляді ця залежність має вигляд:

$$K_{ij} = f(P_{ij}; P_{ij}^{баз}), \quad (1)$$

де  $P_{ij}$  – вимірний показник якості;  $P_{ij}^{баз}$  – базовий показник якості.

Як відомо, з класифікації методів комплексної оцінки, найбільш широко використовуються наступні види залежності між показниками якості та їх

оцінкою: лінійна, не лінійна та не виражена в явному вигляді. При лінійній залежності оцінка якості є відношенням значень його показника і відповідного базового показника [2]:

$$K_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_{ij}^{баз}}. \quad (2)$$

З формули видно, що будь-якій зміні показника якості відповідає пропорційна зміна його оцінки. У такому випадку залежність між значеннями показників і їх оцінками мають лінійний характер, тобто є однакові для всіх показників і в усьому діапазоні їх зміни.

Е. Роосе [3] запропонував необхідність введення в залежність (1) додаткового параметра – показника браку  $P_{ij}^{бр}$ , за який приймається нижня допустиме значення показника якості, тому залежність приймає таку форму:

$$K_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{ij}^{бр}}{P_{ij}^{баз} - P_{ij}^{бр}} \quad (3)$$

Більш явно нелінійна залежність виражена у формулі, запропонованої А. Томашевським для визначення ступеня відповідності будь-якого з показників якості вимогам, зафіксованим в технічних умовах [4]:

$$Z = 100 \exp\left(1 - \frac{x + \Delta x}{G}\right)\%, \quad (4)$$

де  $x$  – дійсне відхилення показника якості;  $\Delta x$  – похибка визначення  $x$ ;  $G$  – гранично допустиме відхилення показника від значення, зазначеного в технічних умовах.

У методиці, розробленій американським дослідником Харрінгтоном [5], математична залежність оцінки від показника якості визначається моделлю експоненціального типу:

$$K_{ij} = e^{-\left(P_{ij}^0\right)^{mj}}, \quad (5)$$

де  $mj$  – позитивне число в межах  $0 < mj < \infty$ ;  
 $P_{ij}^0$  – лінійна функція від  $P_{ij}$ .

У роботах [6–8] для отримання оцінок різнорозмірних показників якості на безрозмірній шкалі використовували залежність:

$$F(x) = \exp(-\exp(-x)) \quad (-\infty < x < \infty) \quad (6)$$

Така залежність має подвійний експонентний вигляд і ряд позитивних особливостей, які використовували дослідники до практичного її

застосування. Так як ця залежність характеризується принципом симетрії, то авторами була отримана ще одна залежність, симетрична залежності (6):

$$F_5(x) = 1 - \exp(-\exp(x)) \quad (7)$$

Завдяки принципу симетрії авторами була отримана ще одна залежність, яка являється середньою між залежностями (6) і (7):

$$F_3(x) = \frac{(\exp(-\exp(-x)) + 1 - \exp(-\exp(x)))}{2} \quad (8)$$

А також отримали ще дві залежності:

$$F_2(x) = \frac{3\exp(-\exp(-x)) + 1 - \exp(-\exp(x))}{4} \quad (9)$$

та

$$F_4(x) = \frac{\exp(-\exp(-x)) + 3(1 - \exp(-\exp(x)))}{4} \quad (10)$$

У результаті проведених досліджень, були отримані 5 залежностей, за допомогою яких можна отримувати оцінки показників якості будь якого об'єкту кваліметрії на безрозмірній шкалі.

Авторами [9–12] використовувався ще один вид залежностей для тримання оцінки показників якості на безрозмірній шкалі, яка має вид:

$$S_q = \begin{cases} 0 & q_i \leq q_{\min} \\ \left[ \frac{q_i - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \right]^r & q_{\min} < q_i < q_{\max} \\ 1 & q_i \geq q_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

де  $q_i$  – дійсне значення показника якості;  $q_{\min}$  – мінімальне значення показника якості;  $q_{\max}$  – максимальне значення показника якості;  $r$  – параметр форми, який визначається експертним методом.

Так як оцінки одиничних показників шкідливих чинників мають однакову (безрозмірну) шкалу вимірювання (0–1), то можна знайти узагальнений показник, застосувавши одну із середніх значень.

Науковці, у своїх працях [13,14] для отримання оцінок показників якості на безрозмірній шкалі застосовують метод SAW (просте адитивне зважування), сенс якого в застосуванні вагових коефіцієнтів для індивідуальних показників якості. Також часто застосовується метод TOPSIS – метод багатокритеріального оцінювання, при якому застосовується еталонне значення якості [15,16]. Також метод TOPSIS застосовують для отримання комплексної оцінки показників якості [17,18].

Для оцінювання процесів у соціальних дослідженнях часто застосовуються методи: PROMETHEE (метод організації рейтингу переваг для оцінки збагачення); MOORA (багатоцільова

оптимізація за допомогою аналізу відносин); WASPAS (Зважена сукупність оцінок показника якості) різних соціальних об'єктів [19–21].

Для узагальненого оцінювання якості об'єктів кваліметрії пропонується визначати оцінку по кожній його характеристиці (критерію) і, у подальшому, визначати єдину оцінку, враховуючи всі його характеристики. Для цього пропонується використовувати метод інтегрування.

Для початку необхідно отримати оцінки за кожним критерієм і отримати часовий ряд їх змін з плином часу, як показано на рис. 1.



Рис. 1 – Часовий ряд зміни оцінок

Для визначення узагальненого показника якості одного критерію пропонується застосувати метод інтегрування, тобто знайти площу під ламаною поверхнею, яка вийшла в результаті з'єднання точок на площині системи координат XOY. Для цього застосовуємо квадратурні формули з використанням методу трапецій.

Метод трапецій – це метод наближеної інтеграції, корисний в тих випадках, коли немає можливості знайти первісну функції і обчислити інтеграл через неї. Крім методу трапецій існують інші методи наближеного інтегрування, наприклад, метод прямокутників і метод парабол. Сутність методу трапецій в графічному вигляді показаний на рис. 2 [22].

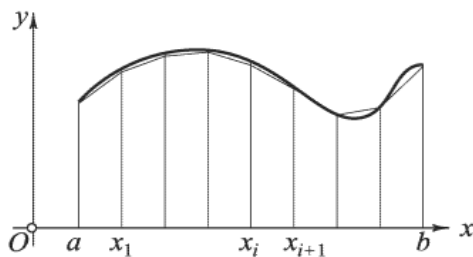


Рис. 2 – Сутність методу трапецій

Припустимо, що потрібно обчислити інтеграл від функції  $f(x)$  на відрізку  $[a; b]$ . Розіб'ємо графік кривої на елементарні сегменти з допомогою точок з абсцисами  $x_i$ , і отримаємо ламану лінію з вершинами

у точках  $(x_i; y_i)$ , при цьому  $y_i = f(x_i)$ , а  $i$  приймає значення від 0 до  $n-1$ .

Для цього виберемо кількість відрізків, на які розбиваємо досліджуваний інтервал і скористаємося формулою для обчислення довжини одного такого відрізка:

$$k = \frac{b-a}{n} \quad (12)$$

Для обчислення за методом трапецій між собою з'єднуються дві поруч розташовані точки розбиття, у результаті утворюючи елементарні сегменти. Як видно далі, значення функції  $f(x)$  береться на межах досліджуваного відрізка.

Площа першої такої трапеції становитиме:

$$S_1 = k \cdot \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad (13)$$

а площа  $i$ -ої трапеції складе:

$$S_i = k \cdot \frac{y_{i-1} + y_i}{2} \quad (14)$$

Складемо площі всіх елементарних трапецій:

$$\int_a^b f(x) dx = k \cdot \frac{y_0 + y_n}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} \quad (15)$$

Таким чином, площі всіх елементарних трапецій, складені разом, є наближеною площею фігури, обмеженої лініями:  $x = a$ ,  $x = b$ , віссю абсцис і графіком кривої  $f(x)$ .

Формула для наближеного обчислення інтегралу методом трапецій має вигляд:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \cdot (f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n)) \quad (16)$$

Похибка при використанні методу трапецій становить:

$$|\sigma_n| \leq \max_{x \in [a; b]} |f''(x)| \cdot \frac{(b-a)^3}{12n^2} \quad (17)$$

Метод трапеції зручний, якщо самого графіка функції немає, але є значення, які приймає функція  $f(x)$  в точках розбиття.

Пропонується методика визначення узагальненого показника якості об'єкту кваліметрії різної природи, яка складається з ряду кроків:

Крок 1. Вимірюються дійсні показники якості об'єкту кваліметрії в одиницях його вимірювання.

Крок 2. Використовуючи одну із залежностей (6–10) або (11) визначають оцінки показника якості на безрозмірній шкалі.

Крок 3. Будують часовий ряд зміни оцінки показника якості з часом у вигляді, показаному на рис. 1.

Крок 4. Використовуючи формулу (13) визначають площу кожної трапеції.

Крок 5. Використовуючи формулу (15) визначають площу під ламаною лінією.

Площа під ламаною лінією буде являтися узагальненою оцінкою об'єкту кваліметрії з часом.

Таку методику можна застосовувати для багатокритеріального оцінювання якості об'єктів кваліметрії, якщо замість часової шкали застосовувати шкалу одиничних оцінок різних критеріїв, якими характеризується об'єкт. У такому випадку отримаємо багатокритеріальну оцінку якості об'єкту кваліметрії. Також, для інтегрування, можна застосовувати інші методи, що дасть можливість визначити найбільш ефективний з них.

## Висновки

Для узагальненого оцінювання якості об'єктів кваліметрії пропонується визначати оцінку по кожній його характеристиці  $i$ , в подальшому, визначати єдину узагальнену оцінку. Запропоновано методику визначення узагальненого показника якості об'єкту кваліметрії різної природи, застосовуючи інтегрування методом трапецій. Таку методику можна застосовувати для багатокритеріального оцінювання якості об'єктів кваліметрії з часом.

## Список літератури

1. Енциклопедія сучасної України URL: [http://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=11519](http://esu.com.ua/search_articles.php?id=11519) (дата звернення: 19.11.2020).
2. Азгальдов Г. Г., Райхман Э. П. *О квалитетии*. Москва: Издательство стандартов, 1972. 172 с.
3. Роосе Э. О комплексной оценке качества. *Техническая эстетика*. 1968. № 7. С. 12–15.
4. Томашевский А. Попытка количественной оценки критериев качества измерительных устройств. *Ротару, автоматика, контроліа*. 1966. № 12. С. 8–9.
5. Harrington E. C. Jr. The desirability Function. *Industr. Quality Control*. 1965. P. 2–9.
6. Авилов В. А. *Математико-статистические методы технико-экономического анализа производства*. Москва: Экономика, 1967. 264 с.
7. Триш Р. М., Слитюк Е. А. Обобщенная точечная и интервальная оценки качества изготовления детали ДВС. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2006. № 1/2 (19). С. 63–67.
8. Триш Р. М., Слитюк Е. А. Точечная и интервальная оценки качества изделий. *Вісник НТУ «ХПИ». Збірник наукових праць. НТУ «ХПИ»*. 2006. № 27. С. 96–102.
9. Trishch R., Maletska O., Cherniak O., Semionova Ju., Jancis V. Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 1 (11). P. 156–162. doi: 10.30837/2522-9818.2020.12.075.



10. Cherniak O., Trishch R., Kim N., Ratajczak S. Quantitative assessment of working conditions in the workplace. *Engineering Management in Production and Services*. 2020. № 12 (2). P. 99–106. doi: 10.2478/emj-2020-0014.
11. Trisch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N., Kiporenko A. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4/3 (82). P. 18–24. doi: 10.15587/1729-4061.2016.75503.
12. Ginevičius, R., Trishch, H. Petraškevičius, V. Quantitative assessment of quality management systems' processes. *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*. 2015. № 28:1, P. 1096–1110. doi: 10.1080/1331677X.2015.1087676.
13. Ginevičius R., Podvezko V. Complex assessment of sustainable development of state regions with emphasis on ecological and dwelling conditions. *Ekologija*. 2007. № 53. P. 41–48.
14. Ginevičius R., Podvezko V. A feasibility study of multicriteria methods application to quantitative evaluation of social phenomena. *Business: Theory and Practice*. 2008. № 9. P. 81–87. doi:10.3846/1648-0627.2008.9.81-87.
15. Ginevičius R., Podvezko A. The evaluation of financial stability and soundness of Lithuanian Banks. *Ekonomika istraživanja: znanstveno stručni časopis*. 2013. № 26. P. 191–208.
16. Ginevičius R., Suhajda K., Šimkūnaitė J. Lithuanian experience of quantitative evaluation of socioeconomic system position by multicriteria methods. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. № 110. P. 952–960. doi:10.1016/j.sbspro.2013.12.941.
17. Šimelytė A., Antanavičienė J. The effect of investment promotion on FDI flows: A case of the Baltic States. *Business: Theory and Practice*. 2013. № 14. P. 200–208. doi:10.3846/btp.2013.21.
18. Beinoraitė Š., Drejeris R. Population entrepreneurship measurement model. *Business: Theory and Practice*. 2014. № 15. P. 199–209. doi: 10.3846/btp.2014.20.
19. Krivka A. Complex evaluation of the economic crisis impact on Lithuanian industries. *Journal of Business Economics and Management*. 2014. № 15. P. 299–315. doi: 10.3846/16111699.2013.867277.
20. Brauers W., Ginevičius R., Podvezko A. Development of a methodology of evaluation of financial stability of commercial banks. *Panoeconomicus*. 2014. № 61. P. 349–367. doi: 10.2298/PAN1403349B.
21. Hashemkhani Zolfanir S., Maknoon E., Zavadskas K. Multiple Nash equilibriums and evaluation of strategies. New application of MCDM methods. *Journal of Business Economics and Management*. 2015. № 16. P. 290–305. doi:10.3846/16111699.2014.967715.
22. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченкова Н. В. *Вычислительные методы: учебное пособие*. СПб.: Лань. 2014. 672 с.
4. Tomashevskiy A. Popytka kolichestvennoy otsenki kriteriyev kachestva izmeritel'nykh ustroystv [Attempt to quantify the quality criteria of measuring devices]. *Pomary, avtomatyko, kontrolia*, 1966, Vol. 12, pp. 8–9.
5. Harrington E. C. Jr. The desirability Function. *Industr. Quality Control*, 1965, April, pp. 2–9.
6. Avilov V. A. *Matematiko-statisticheskiye metody tekhniko-ekonomicheskogo analiza proizvodstva [Mathematical and statistical methods of technical and economic analysis of production]*. Moscow, Economics, 1967. 264 p.
7. Trishch R. M., Slityuk E. A. Obobshchonnaya tochechnaya i interval'naya otsenki kachestva izgotovleniya detali DVS [Generalized point and interval estimates of the quality of manufacturing a part of an internal combustion engine]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2006, Vol. 1/2 (19), pp. 63–67.
8. Trishch R. M., Slityuk E. A. Tochechnaya i interval'naya otsenki kachestva izdeliy [Spot and interval evaluation of product quality]. *Bulletin of the NTU "KhPI". Collection of scientific works*, 2006, Vol. 27, pp. 96–102.
9. Trishch R., Maletska O., Cherniak O., Semionova Ju., Jancis V. Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2020, Vol. 1 (11), pp. 156–162, doi: 10.30837/2522-9818.2020.12.075.
10. Cherniak O., Trishch R., Kim N., Ratajczak S. Quantitative assessment of working conditions in the workplace. *Engineering Management in Production and Services*, 2020, Vol. 12, no. 2, pp. 99–106, doi:10.2478/emj-2020-0014.
11. Trisch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N., Kiporenko A. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 4/3, no. 82, pp. 18–24, doi: 10.15587/1729-4061.2016.75503.
12. Ginevičius, R., Trishch, H. Petraškevičius, V. Quantitative assessment of quality management systems' processes. *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*, 2015, Vol. 28, 1, pp. 1096–1110, doi:10.1080/1331677X.2015.1087676.
13. Ginevičius R., Podvezko V. Complex assessment of sustainable development of state regions with emphasis on ecological and dwelling conditions. *Ekologija*, 2007, Vol. 53, pp. 41–48.
14. Ginevičius R., Podvezko V. A feasibility study of multicriteria methods application to quantitative evaluation of social phenomena. *Business: Theory and Practice*, 2008, Vol. 9, pp. 81–87, doi:10.3846/1648-0627.2008.9.81-87.
15. Ginevičius R., Podvezko A. The evaluation of financial stability and soundness of Lithuanian Banks. *Ekonomika istraživanja: znanstveno stručni časopis*, 2013, Vol. 26. no. 2, pp. 191–208.
16. Ginevičius R., Suhajda K., Šimkūnaitė J. Lithuanian experience of quantitative evaluation of socioeconomic system position by multicriteria methods. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2014, Vol. 110, pp. 952–960, doi:10.1016/j.sbspro.2013.12.941.
17. Šimelytė A., Antanavičienė J. The effect of investment promotion on FDI flows: A case of the Baltic States. *Business: Theory and Practice*, 2013, Vol. 14, no. 3, pp. 200–208, doi:10.3846/btp.2013.21.
18. Beinoraitė Š., Drejeris R. Model for measuring the entrepreneurship of the population. *Business: Theory and Practice*, 2014, Vol. 15, no. 2, pp. 199–209, doi: 10.3846/btp.2014.20.

#### References (transliterated)

1. Encyclopedia of modern Ukraine. Available at: [http://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=11519](http://esu.com.ua/search_articles.php?id=11519) (accessed 19.11.2020).
2. Azgaldov G., Rajhman E. *O kvalimetrii [About qualimetry]*. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1973, 172 p.
3. Roose E. O kompleksnoy otsenke kachestva [On a comprehensive quality assessment]. *Technical aesthetics*, 1968, Vol. 7, pp. 12–15.
4. Tomashevskiy A. Popytka kolichestvennoy otsenki kriteriyev kachestva izmeritel'nykh ustroystv [Attempt to quantify the quality criteria of measuring devices]. *Pomary, avtomatyko, kontrolia*, 1966, Vol. 12, pp. 8–9.
5. Harrington E. C. Jr. The desirability Function. *Industr. Quality Control*, 1965, April, pp. 2–9.
6. Avilov V. A. *Matematiko-statisticheskiye metody tekhniko-ekonomicheskogo analiza proizvodstva [Mathematical and statistical methods of technical and economic analysis of production]*. Moscow, Economics, 1967. 264 p.
7. Trishch R. M., Slityuk E. A. Obobshchonnaya tochechnaya i interval'naya otsenki kachestva izgotovleniya detali DVS [Generalized point and interval estimates of the quality of manufacturing a part of an internal combustion engine]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2006, Vol. 1/2 (19), pp. 63–67.
8. Trishch R. M., Slityuk E. A. Tochechnaya i interval'naya otsenki kachestva izdeliy [Spot and interval evaluation of product quality]. *Bulletin of the NTU "KhPI". Collection of scientific works*, 2006, Vol. 27, pp. 96–102.
9. Trishch R., Maletska O., Cherniak O., Semionova Ju., Jancis V. Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2020, Vol. 1 (11), pp. 156–162, doi: 10.30837/2522-9818.2020.12.075.
10. Cherniak O., Trishch R., Kim N., Ratajczak S. Quantitative assessment of working conditions in the workplace. *Engineering Management in Production and Services*, 2020, Vol. 12, no. 2, pp. 99–106, doi:10.2478/emj-2020-0014.
11. Trisch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N., Kiporenko A. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 4/3, no. 82, pp. 18–24, doi: 10.15587/1729-4061.2016.75503.
12. Ginevičius, R., Trishch, H. Petraškevičius, V. Quantitative assessment of quality management systems' processes. *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*, 2015, Vol. 28, 1, pp. 1096–1110, doi:10.1080/1331677X.2015.1087676.
13. Ginevičius R., Podvezko V. Complex assessment of sustainable development of state regions with emphasis on ecological and dwelling conditions. *Ekologija*, 2007, Vol. 53, pp. 41–48.
14. Ginevičius R., Podvezko V. A feasibility study of multicriteria methods application to quantitative evaluation of social phenomena. *Business: Theory and Practice*, 2008, Vol. 9, pp. 81–87, doi:10.3846/1648-0627.2008.9.81-87.
15. Ginevičius R., Podvezko A. The evaluation of financial stability and soundness of Lithuanian Banks. *Ekonomika istraživanja: znanstveno stručni časopis*, 2013, Vol. 26. no. 2, pp. 191–208.
16. Ginevičius R., Suhajda K., Šimkūnaitė J. Lithuanian experience of quantitative evaluation of socioeconomic system position by multicriteria methods. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2014, Vol. 110, pp. 952–960, doi:10.1016/j.sbspro.2013.12.941.
17. Šimelytė A., Antanavičienė J. The effect of investment promotion on FDI flows: A case of the Baltic States. *Business: Theory and Practice*, 2013, Vol. 14, no. 3, pp. 200–208, doi:10.3846/btp.2013.21.
18. Beinoraitė Š., Drejeris R. Model for measuring the entrepreneurship of the population. *Business: Theory and Practice*, 2014, Vol. 15, no. 2, pp. 199–209, doi: 10.3846/btp.2014.20.

19. Krivka A. Complex evaluation of the economic crisis impact on Lithuanian industries. *Journal of Business Economics and Management*, 2014, Vol. 15, pp. 299–315, doi: 10.3846/16111699.2013.867277.
20. Brauers W., Ginevičius R., Podvieszko A. Development of a methodology of evaluation of financial stability of commercial banks. *Panoeconomicus*, 2014, Vol. 61, no. 3, pp. 349–367, doi: 10.2298/PAN1403349B.
21. Hashemkhani Zolfanir S., Maknoon E., Zavadskas K. Multiple Nash equilibriums and evaluation of strategies. New application of MCDM methods. *Journal of Business Economics and Management*, 2015, Vol. 16, no. 2, pp. 290–305, doi: 10.3846/16111699.2014.967715.
22. Amosov A. A., Dubinskiy Y. A., Kopchenova N. V. *Vychislitelnyye metody: uchebnoye posobiye [Computational methods: a tutorial]*, SPb, Lan Publ., 2014, 672 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Черняк Олена Миколаївна** – кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, старший викладач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6167-8809; e-mail: olena-cheraniak@ukr.net.

**Olena Cherniak** – candidate of technical sciences, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Senior Lecturer at the Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6167-8809; e-mail: olena-cheraniak@ukr.net.

**Сороколат Наталія Андріївна** – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-0140-9364; e-mail: n.a.sorokolat@gmail.com.

**Nataliia Sorocolat** – Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, postgraduate student Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0140-9364; e-mail: n.a.sorokolat@gmail.com.

**Каницька Ірина Вікторівна** – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7001-8340; e-mail: irinadovgopolaya@icloud.com.

**Iryna Kanytska** – Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, postgraduate student at the Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7001-8340; e-mail: irinadovgopolaya@icloud.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Черняк О. М., Сороколат Н. А., Каницька І. В. Застосування методу інтегрування для оцінювання якості об'єктів кваліметрії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 93-98. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.14.

*Please cite this article as:*

Cherniak O., Sorocolat N., Kanytska I. Application of the integration method for assessing the quality of qualimetry objects. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 93-98, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.14.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Черняк Е. Н., Сороколат Н. А., Каницкая И. В. Применение метода интегрирования для оценки качества объектов кваліметрии. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 93-98. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.14.

**АННОТАЦІЯ** Проведен аналіз існуючих наукових підходів до кількісної оцінки якості об'єктів кваліметрії різної природи, які мають різні показники якості з різними шкалами вимірювання. Розглянуто ряд сучасних наукових робіт, пов'язаних з оцінкою якості продукції, процесів і послуг, визначено їх недоліки і можливі межі застосування. В результаті проведеного аналізу було виявлено, що в кваліметрії існує ряд нерешених завдань, рішення яких могло б дати можливість розробляти нові практичні методики, які були б достатньо універсальними і могли б ефективно застосовуватися при оцінці якості об'єктів різної природи. В результаті аналізу доведено актуальність теми і визначено мету роботи – розробка методики отримання комплексної оцінки показника якості, яка буде придатною для оцінки об'єктів кваліметрії різної природи. Для узагальненого оцінювання якості об'єктів кваліметрії пропонується визначати оцінку по кожній його характеристиці або критерію, а потім визначати єдину оцінку, враховуючи всі його характеристики. Для визначення узагальненого показника якості одного критерію пропонується застосувати метод інтегрування, тобто знайти площу під ламаною поверхнею, яка отрималася в результаті з'єднання точок на площині системи координат ХОУ. Для цього застосовуються квадратні формули з використанням методу трапецій. Метод трапецій – це метод наближеного інтегрування, корисний в тих випадках, коли немає можливості знайти первинну функцію і вирахувати інтеграл через неї. Пропонується поширювати алгоритм визначення узагальненого показника якості об'єктів кваліметрії різної природи, застосовуючи інтегрування методом трапецій. В такому випадку отримаємо багатокритеріальну оцінку якості об'єкта кваліметрії. Для інтегрування, можна застосовувати інші методи, що дозволить визначити найбільш ефективний з них. Розроблену методику можна застосовувати для багатокритеріального оцінювання якості об'єктів кваліметрії, якщо замість часової шкали застосовувати шкалу єдиних оцінок різних критеріїв, якими характеризується об'єкт.

**Ключові слова:** кваліметрія; узагальнений показник; багатокритеріальна оцінка якості; метод інтегрування; метод трапецій

Надійшла (received) 22.11.2020

УДК 54.544.6.018/623

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.15

## СУМІЩЕНІ АНОДНІ ПРОЦЕСИ У РОЗЧИНАХ СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ

К. М. КРАВЧЕНКО<sup>1\*</sup>, Б. В. ПАВЛОВ<sup>1</sup>, Г. Г. ТУЛЬСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> кафедра Технічної електрохімії, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра Технічної електрохімії, д. т. н., проф., завідувач кафедри, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Травлення виробів з вуглецевої сталі у розчинах сульфатної кислоти є, з одного боку, поширеним процесом у машинобудуванні та, з іншого боку, шкідливим для екології. По мірі зниження концентрації  $H_2SO_4$  та насичення розчину  $Fe_2SO_4$  швидкість травлення окисної плівки на поверхні сталі знижується. Тому при зниженні концентрації  $H_2SO_4$  до 25-30 г/л процес травлення припиняють та проводять заміну травильного розчину. При цьому концентрація  $Fe_2SO_4$  досягає 400 г/л. При травленні спостерігається два процеси: розчинення оксидів та розчинення заліза, яке знаходиться під шаром оксидів. Ці два процеси можуть протікати одночасно. Дослідження електродних процесів у розчинах сульфатної кислоти, що містять неорганічні та органічні домішки є підґрунтям для розробки технологічних показників регенерації відпрацьованих сульфатних розчинів. Для дослідження використовували мало зношені анодні матеріали – платину і оксиду свинцю (IV). Для визначення кінетичних закономірностей перебігу анодного процесу на обраних анодних матеріалах застосували вольтамперометрію з побудовою одержаних залежностей в тафелевських координатах. Поляризаційні залежності складаються з двох прямолінійних ділянок з перегином при  $\lg i_a \approx -1,8$  ( $i_a$ , А·см<sup>2</sup>). Нахил першої ділянки не залежить від концентрації  $H_2SO_4$  і становить 120 мВ. Нахил другої ділянки, для розчинів з концентрацією  $H_2SO_4$  0,05...0,37 моль·дм<sup>-3</sup>, становить 60 мВ, а для концентрації 2,5 моль·дм<sup>-3</sup> – 71 мВ. Зміна концентрації сульфатної кислоти практично не впливає на поляризацію аноду. При концентрації 5,0 моль·дм<sup>-3</sup>, в області великої густини струму ( $\geq 1500$  А·м<sup>-2</sup>), потенціал анода перевищує ТНЗ для діоксиду свинцю. Це сприяє адсорбції сульфат іонів на поверхні композиційного анода і початку утворення активного кисню. В цих умовах, на платиновому аноді спостерігається виділення пероксиду водню. Концентрація  $H_2SO_4$  значно впливає на механізм і кінетику виділення кисню. Поляризаційні залежності складаються з двох прямолінійних ділянок з різним нахилом. Для всього діапазону концентрацій сульфатної кислоти, в області малих густин струму спостерігається ділянка з нахилом в 120 мВ. Концентрація сульфатної кислоти на цій ділянці не впливає на кінетику процесу, що узгоджується з літературними даними для платини. Нульовий порядок по рН і незалежність від концентрації сульфатної кислоти для цієї ділянки вказує, що найбільш імовірним механізмом виділення кисню є розряд води. Отримані значення ефективної енергії активації процесу виділення кисню на ОСТП близькі до результатів отриманих на платині – 41,8 кДж·моль<sup>-1</sup> при  $E_a = 1,95$  В. Величина ефективної енергії активації вказує на електрохімічну природу поляризації, і її зниження при збільшенні анодного потенціалу - на зменшення міцності зв'язку кисню з поверхнею ОСТП.

**Ключові слова:** сульфатна кислота; відпрацьований розчин; кінетика; платиновий анод; двооксид свинцевий анод

## COMBINED ANODE PROCESSES IN SULFURIC ACID SOLUTIONS

К. KRAVCHENKO<sup>1\*</sup>, B. PAVLOV<sup>1</sup>, G. TULSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Postgraduate Student, Department of Technical Electrochemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Electrochemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Etching of carbon steel products in sulfuric acid solutions is, on the one hand, a common process in mechanical engineering and, on the other hand, harmful to the environment. As the concentration of  $H_2SO_4$  decreases and the solution becomes saturated with  $Fe_2SO_4$ , the etching rate of the oxide film on the steel surface decreases. Therefore, while reducing the  $H_2SO_4$  concentration to 25-30 g/l etching process is stopped, and replacing the etching solution. In this case, the concentration of  $Fe_2SO_4$  reaches 400 g/l. During etching, two processes are observed: dissolution of oxides and dissolution of iron, which is located under the layer of oxides. These two processes can run simultaneously. The study of electrode processes in sulfuric acid solutions containing inorganic and organic impurities is the basis for the development of technological parameters for the regeneration of spent sulfate solutions. For the study used a little wear anode materials - platinum and lead oxide (IV). To determine the kinetic regularities of the anode process in selected anode materials, voltammetry was used with the construction of the obtained dependences in Tafel coordinates. The polarization dependences consist of two rectilinear sections with an inflection at  $\lg i_a \approx -1,8$  ( $i_a$ , A · cm<sup>2</sup>). The slope of the first section does not depend on the  $H_2SO_4$  concentration and is 120 mV. The slope of the second section, for solutions with an  $H_2SO_4$  concentration of 0,05 ... 0,37 mol/dm<sup>3</sup>, is 60 mV, and for a concentration of 2,5 mol/dm<sup>3</sup> - 71 mV. A change in the concentration of sulfuric acid has practically no effect on the polarization of the anode. At a concentration of 5,0 mol·dm<sup>-3</sup>, in the area of high current density ( $\geq 1500$  A·m<sup>-2</sup>), the potential of the anode exceeds the PZCh for lead dioxide. This promotes the adsorption of sulfate ions on the surface of the composite anode and the onset of active oxygen formation. Under these conditions, the evolution of hydrogen peroxide is observed on the platinum anode. The polarization dependences consist of two straight sections with different slopes. For the entire range of sulfuric acid concentrations, at low current density portion is observed with a slope of

120 mV. Concentration of sulfuric acid at this site does not affect the kinetics of the process that corresponds to the literature data for platinum. The zero order in pH and independence from the concentration of sulfuric acid for this site indicates that the most probable mechanism of oxygen evolution is water rarefaction. The obtained values of the effective activation energy of the oxygen evolution process on the LOTC are close to the results obtained on platinum – 41,8 kJ mol<sup>-1</sup> at  $E_a = 1,95$  V. The value of the effective activation energy indicates the electrochemical nature of polarization, and its decrease with an increase in the anodic potential indicates a decrease in the strength of the bond between oxygen and the LOTC surface.

**Keywords:** sulfuric acid; spent solution; kinetics; platinum anode; anode in lead dioxide

### Вступ

Значна кількість процесів в технічній електрохімії перебігає за участю розчинів сульфатної кислоти. Цільовим анодним процесом, при електролізі розчинів сульфатної кислоти та її солей, може бути: як окиснення (синтез пероксидів в області високих анодних потенціалів), так і виділення кисню (регенерація відпрацьованих розчинів, гальванотехніка, гідрометалургія, електродіаліз). Напрямок перебігу анодного процесу і природу кінцевих продуктів визначає природа електродних матеріалів, склад і температура розчину.

Значною проблемою на теперішній час є регенерація відпрацьованих сульфатних розчинів. Такі розчини утворюються у значній кількості після процесів сульфатно-кислотної обробки сталі у гальванічних виробництвах [1].

### Мета роботи

Дослідження кінетики анодних процесів на мало зношуваних анодах дозволить визначити лімітуючі стадії процесу в залежності від концентрації сульфатної кислоти. Також, необхідно визначити технологічні показники анодного процесу при використанні у якості аноду платини та оксиду свинцю (IV). Результати досліджень кінетики виділення кисню на досліджуваних анодних матеріалах дозволять оцінити каталітичну активність використаних анодних матеріалів.

### Методика проведення експерименту

Кінетика анодних процесів у водних розчинах сульфатної кислоти досліджувалась на платиновому [2,3], двооксид свинцевому [4,5] та інших оксидометалевих анодах [6] для різних електрохімічних процесів.

Досліди проводилися у водних розчинах сульфатної кислоти на аноді із оксидно-свинцевим титановим покриттям (ОСТП) та платиновому аноді у діапазоні концентрацій від 0,05 до 5,0 моль·дм<sup>-3</sup> при температурах від 293 К до 353 К.

Тому досліди каталітичної активності, селективності та стійкості зносостійкого аноду із ОСТП [7,8] проведено у сульфатних розчинах у широкому діапазоні концентрацій та густини струму.

У роботах [9-11] досліджено кінетику анодного процесу на гладкій платині в водних розчинах сульфатної кислоти у широкому діапазоні концентрацій 0,5 до 5,0 моль·дм<sup>-3</sup> і анодних

потенціалах до 3,5 В. Було досліджено кінетику анодного процесу на гладкій платині в водних розчинах сульфатної кислоти [12-15] при високих анодних потенціалах - до 12 В. Автори відзначали стійкість платинового анода у всьому діапазоні концентрації сірчаної кислоти.

Стійкість ОСТП лімітується стійкістю PbO<sub>2</sub> компонента, яка обмежується  $pH \geq 0,5$  [16], що відповідає концентрації сульфатної кислоти 12 моль·дм<sup>-3</sup>. При досягненні цієї концентрації у розчині сульфатної кислоти, було помічено помутніння електроліту і спад маси анода з ОСТП.

Для електролізу розчинів сульфатної кислоти використовувався анод з PbO<sub>2</sub>, що мало зношується.

### Результати та їх обговорення

На рис. 1 наведені поляризаційні криві (ПК) (що скомпенсовані за омичною складовою), отримані при електролізі розчинів сульфатної кислоти з концентрацією від 0,05 до 5,0 моль·дм<sup>-3</sup> при 293 К. Залежність потенціалу анода від логарифма щільності струму має складний характер, що пояснюється великою кількістю процесів, протікання яких можливо в цих умовах [17-20].

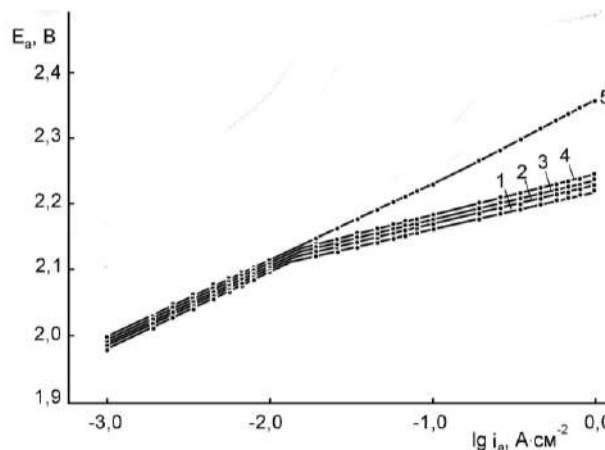


Рис. 1 – Поляризаційні залежності на ОСТП в розчинах сульфатної кислоти з концентрацією (моль·дм<sup>-3</sup>): 1 – 0,05; 2 – 0,37; 3 – 1,0; 4 – 2,5; 5 – 5,0

Зіставляючи результати, наведені на рис. 1 видно, що в розчинах сульфатної кислоти з концентраціями 0,05...2,5 моль·дм<sup>-3</sup> на аноді протікає тільки виділення кисню у всьому діапазоні щільності струму. Поляризаційні залежності складаються з двох прямолінійних ділянок з перегином при  $lg i_a \approx -1,8$  ( $i_a$ , А·см<sup>-2</sup>). Нахил першої ділянки не залежить від

концентрації  $\text{H}_2\text{SO}_4$  і становить 120 мВ. Нахил другої ділянки, для розчинів з концентрацією  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,05...0,37 моль·дм<sup>-3</sup>, становить 60 мВ, а для концентрації 2,5 моль·дм<sup>-3</sup> – 71 мВ. Зміна концентрації сульфатної кислоти практично не впливає на поляризацію.

При концентрації 5,0 моль·дм<sup>-3</sup>, в області великої щільності струму ( $\geq 1500 \text{ А·м}^{-2}$ ), потенціал анода перевищує точку нульового заряду (ТНЗ) для діоксиду свинцю. Це сприяє адсорбції сульфат іонів на поверхні композиційного анода і початку утворення активного кисню. При концентрації  $> 5,0$  моль·дм<sup>-3</sup>, після різкого зростання анодного потенціалу, з'являється друга тафелевська ділянка, якій відповідає максимум виходу за струмом активного кисню. Початок тафелевської ділянки відповідає ділянці уповільнення зростання виходу за струмом активного кисню з подальшим виходом за струмом активного кисню на максимум.

Уповільнення зростання виходу за струмом активного кисню може бути викликано збільшенням виходу за струмом пов'язаних побічних процесів: виділення кисню (рис. 1) або анодного розкладання моноадсерної кислоти. Збільшення виходу за струмом кисню з підвищенням анодного потенціалу і при таких концентраціях  $\text{H}_2\text{SO}_4$  малоімовірно. Так як пероксид водню не був виявлений, то процес (рис. 2) з його участю виключаються. Для протікання процесу (рис. 3) потрібна підвищена температура. Найбільш імовірною причиною уповільнення зростання виходу за струмом активного кисню і одночасного зниження нахилу поляризаційних кривих є протікання сполученого процесу анодного розкладання моноадсульфатної кислоти.

Кінетика виділення кисню на ОСТП вивчалася при 333 К. З підвищенням температури електроліту кисень є єдиним продуктом анодного процесу при електролізі розчинів сульфатної кислоти. При 333 К, для діапазону концентрацій сульфатної кислоти 0,05...5,0 моль·дм<sup>-3</sup>, не були виявлені ні пероксодисульфатна ні пероксомоносульфатна кислоти, не протікали процеси утворення цих перекисних сполук і при використанні в якості анода платини [15].

Створення умов, при яких протікає тільки один електродний процес, дозволить припустити механізм, що задовольняє отриманим кінетичним залежностям.

Для визначення перенапруги виділення кисню, розраховували рівноважний потенціал кисневого електрода:

$$E_{\text{O}_2}^0 = 1,228 - \frac{2,3RT}{F} \text{pH} - \frac{2,3RT}{2F} \lg a_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{2,3RT}{4F} \lg P_{\text{O}_2} \quad (1)$$

Отримані значення рівноважних потенціалів кисневого електрода дозволили розрахувати перенапруження виділення кисню на ОСТП ( $\text{PbO}_2$  – 50 мол. %,  $\text{TiO}_2$  – 50 мол. %) наведені в табл. 1.

Концентрація  $\text{H}_2\text{SO}_4$  значно впливає на механізм і кінетику виділення кисню. Поляризаційні

залежності складаються з двох прямолінійних ділянок з різним нахилом (рис. 2). Для всього діапазону концентрацій сульфатної кислоти, в області малих густин струму спостерігається ділянка з нахилом в 120 мВ. Концентрація сульфатної кислоти на цій ділянці не впливає на кінетику процесу, що узгоджується з літературними даними для платини [19,20], отриманими для низької щільності струму. Залежність перенапруги від щільності струму на цій ділянці описується рівнянням 2:

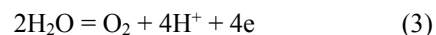
$$\eta_{\text{O}_2} = 1,107 + 0,130 \lg i. \quad (2)$$

Величина предлогарифмічного множника відповідає  $\frac{2,3RT}{\beta F}$ , де  $\beta = 0,5$  [20].

Таблиця 1 – Рівноважні потенціали кисневого електрода

| Концентрація $\text{H}_2\text{SO}_4$ , моль·дм <sup>-3</sup> | pH, [189] | $a_{\text{H}_2\text{O}}$ , [189, 190] | $E_{\text{O}_2}^0$ , В |
|--------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------|------------------------|
| 0,05                                                         | 1,20      | 1,00                                  | 1,157                  |
| 0,37                                                         | 0,41      | 0,99                                  | 1,204                  |
| 1,00                                                         | 0,08      | 0,96                                  | 1,223                  |
| 2,50                                                         | -0,02     | 0,91                                  | 1,230                  |
| 5,00                                                         | -0,42     | 0,79                                  | 1,256                  |

Нульовий порядок по pH і незалежність від концентрації сульфатної кислоти для цієї ділянки вказує, що найбільш імовірним механізмом виділення кисню є розряд води [19, 20]. Вода переноситься до анода в складі гідратованих іонів сірчаної кислоти:



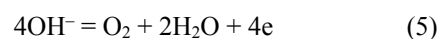
В області високої щільності струму з'являються інші прямолінійні тафелевські ділянки. За нахилом їх можна розділити на дві групи: при низьких значеннях концентрації  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 0,05...2,5 моль·дм<sup>-3</sup>, при високих – 5,0 моль·дм<sup>-3</sup> (табл. 2).

При низьких концентраціях  $\text{H}_2\text{SO}_4$  коефіцієнти в рівняння Тафеля мало відрізняються і становлять величину  $\approx \frac{2,3RT}{F}$  при 333 К. Залежність

перенапруги виділення кисню від концентрації сульфатної кислоти  $\approx 60$  мВ, що дорівнює при 333 К. Таким чином, залежність перенапруги виділення кисню на ОСТП для 0,05...2,5 моль·дм<sup>-3</sup>  $\text{H}_2\text{SO}_4$  описується рівнянням 4:

$$\eta_{\text{O}_2} = a + \frac{2,3RT}{F} \lg i_a + \frac{2,3RT}{F} \lg C_{\text{H}_2\text{SO}_4} \quad (4)$$

а процес виділення кисню описується сумарною реакцією 5:



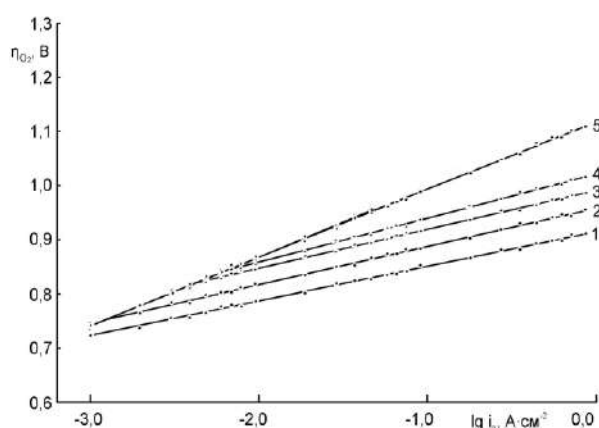


Рис. 2 – Поляризаційні криві виділення кисню при 333 К на ОСТП в розчинах сульфатної кислоти з різною концентрацією (моль·дм<sup>-3</sup>): 1 – 0,05; 2 – 0,37; 3 – 1,00; 4 – 2,50; 5 – 5,00

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта  $b$  рівняння Тафеля в залежності від концентрації  $H_2SO_4$  при 333 К

| Концентрація $H_2SO_4$ , моль·дм <sup>-3</sup> | Інтервал щільностей току, А·м <sup>-2</sup> | $b$ , В |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------|
| 0,05                                           | $1 \cdot 10^1 \dots 1 \cdot 10^4$           | 0,062   |
| 0,37                                           | $1,3 \cdot 10^1 \dots 1 \cdot 10^4$         | 0,063   |
| 1,0                                            | $4,2 \cdot 10^1 \dots 1 \cdot 10^4$         | 0,065   |
| 2,5                                            | $6,9 \cdot 10^1 \dots 1 \cdot 10^4$         | 0,073   |
| 5,0                                            | $1,6 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^4$         | 0,122   |

Запропонований механізм узгоджується з першим порядком по  $OH^-$  (рис. 3) і гальмуванням швидкості виділення кисню зі збільшенням концентрації сульфатної кислоти на логарифмічній залежності щільності струму від концентрації сульфатної кислоти (рис. 4).

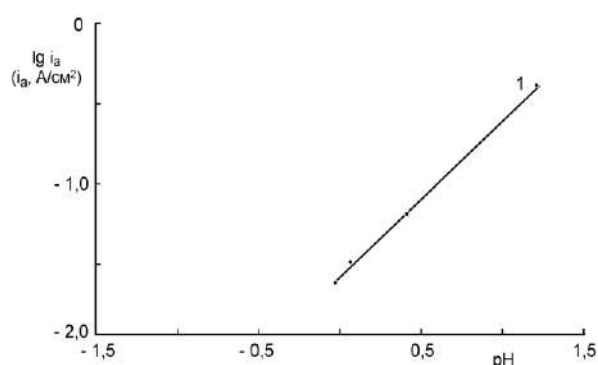


Рис. 3 – Залежність  $lgi$  від  $pH$  розчину сульфатної кислоти при перенапруженні виділення кисню на ОСТП (В): 1 – 0,9

Підвищення нахилу ПК виділення кисню з розчину  $H_2SO_4$  з концентрацією більше 2,5 моль·дм<sup>-3</sup>

може бути пов'язано зі зміною лімітуючої стадії в рамках одного і того ж механізму реакції. Але в даному випадку найімовірніше, що різний нахил тафелевських ділянок поляризаційних залежностей обумовлений зміною характеру адсорбції сульфат-іонів на поверхні ОСТП. На механізм виділення кисню впливають заряд поверхні композиційного оксидного покриття і природа адсорбованих на ньому активних частинок. Сульфат іони на  $PbO_2$  адсорбуються подвійно. При потенціалах нижче ТНЗ має місце вельми слабка хімічна адсорбція. Ймовірно, саме вона призводить до зниження поляризованості у другій гілці поляризованої залежності для низьких значень концентрації  $H_2SO_4$ . Зростання концентрації сульфатної кислоти не впливає на здатність до поляризації першої тафелевської ділянки аж до досягнення ТНЗ, що узгоджується з теорією уповільненої розряду [12,20].

Перегин в ході поляризаційних залежностей для високих концентрацій  $H_2SO_4$  5,0 моль·дм<sup>3</sup> обумовлений досягненням ТНЗ для  $PbO_2$ . При потенціалах, що перевищують ТНЗ  $PbO_2$ , на поверхні композиційного оксидного покриття відбувається адсорбція сульфат іонів і вже гальмує процес виділення кисню. При дослідженні адсорбції іонів на  $PbO_2$  радіоізотопним методом [19,20] була встановлена висока міцність адсорбції  $SO_4^{2-}$  і  $HSO_4^-$ . Іони сульфатної кислоти залишалися на  $PbO_2$  і після відключення поляризації, і над силу десорбували при промиванні у воді.

Для всього досліджуваного діапазону концентрації сульфатної кислоти характерний перший порядок реакції виділення кисню на другій тафелевській ділянці по  $pH$ . Як при потенціалах анода нижче ТНЗ, так і вище (рис. 3). Однак при потенціалах анода вище ТНЗ гальмування швидкості виділення кисню, зі збільшенням концентрації  $H_2SO_4$ , більш значно, ніж при потенціалах анода нижче ТНЗ (рис. 4).

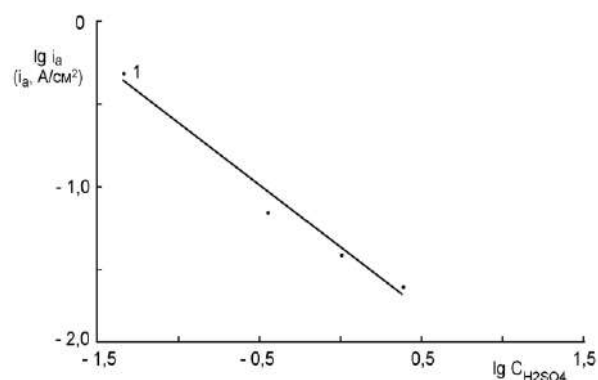


Рис. 4 – Залежність  $lgi$  від  $lg C_{H_2SO_4}$  при перенапрузі виділення кисню на ОСТП (В): 1 – 0,9

Однак, за аналогією з ОРТА,  $TiO_2$  компонент ОСТП, також повинен гальмувати дифузію кисню, і

відповідно покращити експлуатаційні характеристики композиційного анода.

З поляризаційних залежностей виділення кисню з 1 моль·дм<sup>-3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (рис. 5) видно, підвищення температури призводить до зниження анодного потенціалу на 4...5 мВ·К<sup>-1</sup>. Застосувавши температурно-кінетичний метод [21, 22] дослідження природи електрохімічних процесів для отриманої поляризаційної залежності були побудовані температурні залежності  $\lg j_a - \frac{1}{T}$  (рис. 6). З яких була визначена ефективна енергія активації процесу виділення кисню на ОСТП (табл. 3).

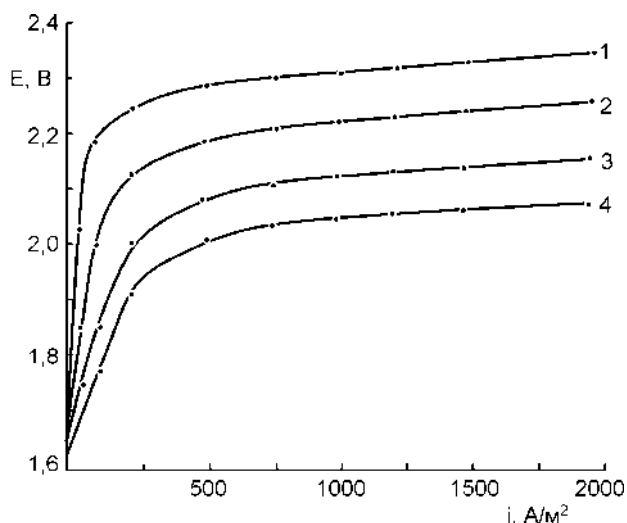


Рис. 5 – Вплив температури на хід анодних ПК у 1 моль·дм<sup>-3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> на ОСТП. Температура (К): 1 – 293; 2 – 313; 3 – 333; 4 – 353

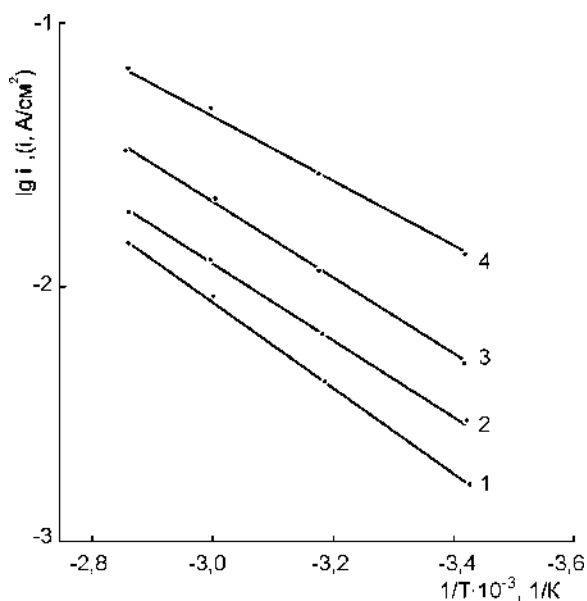


Рис. 6 – Температурна залежність виділення кисню на ОСТП при потенціалах (В): 1 – 1,80; 2 – 1,90; 3 – 2,00; 4 – 2,05

Таблиця 3 – Ефективна енергія активації процесу виділення кисню на ОСТП із 1 моль·дм<sup>-3</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

| Потенціал виділення кисню, В                        | 1,80 | 1,90 | 2,00 | 2,05 |
|-----------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Ефективна енергія активації, кДж·моль <sup>-1</sup> | 33,2 | 29,7 | 28,2 | 23,4 |

Отримані значення ефективної енергії активації процесу виділення кисню на ОСТП близькі до результатів отриманим на платині – 41,8 кДж·моль<sup>-1</sup> при E<sub>a</sub> = 1,95 В [23]. Величина ефективної енергії активації вказує на електрохімічну природу поляризації, і її зниження при збільшенні анодного потенціалу - на зменшення міцності зв'язку кисню з поверхнею ОСТП.

### Висновки

Кінетика електрохімічного окислення сульфатної кислоти на ОСТП при електролізі її водних розчинів вказує на вирішальну роль активних частинок радикального характеру, хемосорбованих на аноді, що можна порівняти з аналогічними процесами для платинового електрода.

Показано, що зміна потенціалу ОСТП впливає на природу адсорбованих частинок, а значить і на селективність процесу при електролізі водних розчинів сульфатної кислоти.

На підставі зміни ходу поляризаційних і ємнісних залежностей в області точки нульового заряду PbO<sub>2</sub> зроблено висновок про зміну природи адсорбованих на ОСТП частинок, що містять кисень.

Встановлено, що розряд і адсорбція гідроксид-іонів на ОСТП є сповільненою стадією. Швидкість виділення кисню знижується при збільшенні концентрації сульфатної кислоти, що полегшує окислення сульфатної кислоти.

### Список літератури

1. Кравченко К. М., Тульський Г. Г. Електрохімічна регенерація відпрацьованого сульфатного розчину травлення сталі. *Матер. міжнар. наук.-практ. конф. 7–8 листоп. 2019 р.* Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. С. 160.
2. Тульський Г. Г., Муратова О. М., Назаров А. В., Куликова Т. П. Вплив стану поверхні композиційного електрода на селективність анодного процесу. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. № 43. С. 88-91.
3. Diaz-Abad S., M. Millán, M. A. Rodrigo, J. Lobato. Review of Anodic Catalysts for SO<sub>2</sub> Depolarized Electrolysis for "Green Hydrogen" production. *Catalysts. University of Castilla-La Mancha. Spain.* 2019. № 9. 63. P. 16. doi:10.3390/catal9010063.
4. Байрачний Б. І., Булавін В. І., Коваленко Ю. І., Вороніна О. В. Пат. на кор. мод. № 79481 Україна, МПК G01N



- 27/30 (2006.01), C25C7/02 (2006.01). Срібно-сульфатний електрод порівняння неполяризований. заявник та патентовласник НТУ "ХПІ". № u201211846, заяв. 15.10.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8. 4 с.
5. Lopes P. P., Tripkovic D., Martins P. F. B. D., Strmcnik D., Ticianelli E. A., Stamenkovic V. R., Markovic N. M. Dynamics of electrochemical Pt dissolution at atomic and molecular levels. *Journal of Electroanalytical Chemistry. United States*. 2018. P. 123 – 129. doi:10.1016/j.jelechem.2017.09.047.
  6. Чайка М. В., Денисюк Р. О., Томашик З. Ф. Хімічна взаємодія CdTe, ZnxCd1-xTe та CdxHg1-xTe з водними розчинами K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> – HBr (HCl). *Вопросы химии и химической технологии*. 2018. № 1. С. 51 – 56.
  7. Butler J. A. V. Armstrong G. The kinetics of Electrode Processes. Reversible Reduction and Oxidation Processes". *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. P. II. 2006. 139. №838. doi:10.1098/rspa.1933.0026.
  8. Тульський Г. Г., Бровін А. Ю., Муратова О. М. Аноди, що малозножуються, на основі оксидів неблагородних металів для електролізу хлоридних і сульфатних розчинів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2005. № 16. С. 146 – 149.
  9. Тульська А. Г. Деполяризація анодного процесу SO<sub>2</sub> в електрохімічному синтезі водню: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.03. Харків. 2015. 22 с.
  10. Куций А. В., Манілевич Ф. Д., Козін Л. Х. Порівняльні дослідження анодних процесів на титанових з родієвим покриттям, родієвих і платинових електродах у сірчанокислих розчинах. *Український хімічний журнал*. Київ. 2015. № 4. С. 108 – 109.
  11. Mirtamizdoust E. A., Karimi F., Bigdeloo M., Parsimehr H. Influence of nanostructured VO-acetylacetonate coordination system with 2-(pyridin-4-ylmethylene) hydrazine-1-carbothioamide in pseudocapacitance performance of p-type conductive polymer composite film. *Plastics, Rubber and Composites*. 2020. № 19. P. 1-8. doi:10.1080/14658011.2020.1859875.
  12. Chen-Wei Lin, Wai H. Mak, Dayong Chen, Haosen Wang, Aguilar S. Kaner R. B. Catalytic Effects of Aniline Polymerization Assisted by Oligomers. *ACS Catalysis*. 2019. №9 (8). 6596-6606. doi:10.1021/acscatal.9b01484.
  13. Тульська А. Г. Байрачний Б. І. Каталітична активність платини при диполаризації SO<sub>2</sub> анодного процесу при електролізі сульфатної кислоти. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2013*, 28 жовтня 2013 р. у 5 ч. Ч. I. Харків: НТУ «ХПІ». С. 275.
  14. Патент 102479 Україна, МКИ C02F 103/16 (2006.01), C23F 1/46 (2006.01), C02F 1/62 (2006.01). Спосіб отримання міді при регенерації відпрацьованих сульфатних мідно-цинкових розчинів травлення латуні Дашенко В. В. Хоботова Е. Б. Єгорова Л. М. Ларін В. І. заявл. 22.05.2012. опубл. 10.07.2013. Бюл. N 13. С. 4.
  15. Нефедов В. Г., Матвеев В. В., Королянчук Д. Г. Влияние частоты электрического тока на электропроводность тонких пленок электролитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 2. С. 58 – 64.
  16. Proubaux M. *Atlas D'Équilibres Electrochimiques*. Paris. Gauthier – Villars & Cie. Éditeur-Imprimeur-Libraire, 1963. 646 p.
  17. Муратова О. М., Тульський Г. Г., Бровін А. Ю. Сенкевич І. В. Кінетика електродних процесів на PbO<sub>2</sub> в розчинах сірчаної кислоти. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків: НТУ "ХПІ". 2005. № 26. С. 95 – 98.
  18. Тульський Г. Г. Байрачний В. Б. Бровін А. Ю. Муратова О. М. Дослідження сумішених анодних процесів в сульфатних розчинах на ОСТА. *Вісник національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків: НТУ "ХПІ". 2006. № 12. С. 122 – 128.
  19. Веліченко О. Б. Мікромодифіковані діоксидносвинцеві електроди. Автореф. дис... д-ра хім. наук. 02.00.05. О. Б. Веліченко; Укр. держ. хім.-технол. ун-т. Д., 2002. 36 с.
  20. Атапин А. Г., Нефедов В. Г. Динамика роста пузырей при электролизе воды в концентрированных растворах. Современные электрохимические технологии и оборудование. *Материалы международной научно-технической конференции, Минск, 28 – 30 ноября 2017 г.* Белорусский государственный технологический университет. Минск. БГТУ, 2017. С.137 – 141.
  21. Golovko D. A., Nefedov V. G., Golovko I. D., Shevchenko L. V. Obtaining of purified solutions of sodium hydroxide for synthesis of ferrates (VI). *Technology Audit and Production Reserves*. 2016. Vol. 6. № 3 (32). P. 17 – 21. doi: 10.15587/2312-8372.2016.86444
  22. Saville D. A. Electrokinetic effects with small particles. *Journal Article. Annual Review of Fluid Mechanics*. 1977. V 9. № 1. P. 321 – 337. doi: 09.010177.001541.

## References (transliterated)

1. Kravchenko K. M., Tulsy G. G. Electrochemical regeneration of spent sulfate solution of steel etching. *Mater. international scientific-practical conf. November 7 – 8. 2019*. Kharkiv. KhNUMG nam. af. O. M. Beketova. 2019. p. 160.
2. Tulsy G. G., Muratova O. M., Nazarov A. V., Kulikova T. P. Influence of the state of the composite electrode surface on the selectivity of the anode process. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2006, no. 43, pp. 88 – 91.
3. Diaz-Abad S., M. Millán, M. A. Rodrigo, J. Lobato. Review of Anodic Catalysts for SO<sub>2</sub> Depolarized Electrolysis for "Green Hydrogen" production. *Catalysts. University of Castilla-La Mancha*. Spain, 2019, no. 9, 63, p. 16, doi:10.3390/catal9010063.
4. Pat. on useful. mod. № 79481 Ukraine, IPC G01N 27/30 (2006.01), C25C7 / 02 (2006.01). Silver-sulfate reference electrode unpolarized. Bayrachny B. I., Bulavin V. I., Kovalenko Y. I., Voronina O. V. applicant and patent owner of NTU "KhPI". № u201211846. application 15.10.2012. publ. 25.04.2013. Bull. No. 8. 4 p.
5. Lopes P. P., Tripkovic D., Martins P. F. B. D., Strmcnik D., Ticianelli E. A., Stamenkovic V. R., Markovic N. M. Dynamics of electrochemical Pt dissolution at atomic and molecular levels. *Journal of Electroanalytical Chemistry. United States*, 2018, pp. 123-129, doi: 10.1016/j.jelechem.2017.09.047.
6. Chaika M. V., Denisyuk R. O., Tomashik Z. F. Chemical interaction of CdTe, ZnxCd1-xTe and CdxHg1-xTe with aqueous solutions of K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> - HBr (HCl). *Questions of chemistry and chemical technology*, 2018, no. 1, pp. 51-56.
7. Butler J. A. V., Armstrong G. The kinetics of Electrode Processes. Reversible Reduction and Oxidation Processes" *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical*

- and Engineering Sciences. P. II. 2006, 139, no. 838, doi:10.1098/rspa.1933.0026
8. Tulska G. G., Brovin A. Y., Muratova O. M., Low-wear anodes based on oxides of base metals for electrolysis of chloride and sulfate solutions. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2005, no. 16, pp. 146-149.
  9. Tulska A. G. Depolarization of the anodic process of SO<sub>2</sub> in electrochemical synthesis of hydrogen: author's ref. dis. ... cand. tech. science. Special. 05.17.03. A. G. Tulska. Kharkiv. 2015. 22 p.
  10. Kutsiy A. V., Manilevich F. D., Kozin L. H. Comparative studies of anode processes on titanium with rhodium coating, rhodium and platinum electrodes in sulfuric acid solutions. *Ukrainian Chemical Journal*. Kiev, 2015, no. 4, pp. 108-109.
  11. Mirtamizdoust E. A., Karimi F., Bigdeloo M., Parsimehr H. Influence of nanostructured VO-acetylacetonate coordination system with 2-(pyridin-4-ylmethylene) hydrazine-1-carbothioamide in pseudocapacitance performance of p-type conductive polymer composite film. *Plastics, Rubber and Composites*, 2020, no. 19, pp. 1-8, doi:10.1080/14658011.2020.1859875.
  12. Chen-Wei Lin, Wai H. Mak, Dayong Chen, Haosen Wang, Aguilar S. Kaner R. B. Catalytic Effects of Aniline Polymerization Assisted by Oligomers. *ACS Catalysis*, 2019, no. 9 (8), pp. 6596-6606, doi:10.1021/acscatal.9b01484.
  13. Tulska A. G., Bayrachny B. I. Catalytic activity of platinum in the dipolarization of SO<sub>2</sub> anodic process in the electrolysis of sulfuric acid. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: abstracts of the XX International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2013*. October 28. 2013, in 5 p. Part I. Kharkiv: NTU "KhPI", p. 275.
  14. Patent 102479 Ukraine, MKI C02F 103/16 (2006.01), C23F 1/46 (2006.01), C02F 1/62 (2006.01). Datsenko V. V. Khobotova E. B. Khobotova E. B. Yegorova L. M. Larin V. I. declared 22.05.2012. publ. 10.07.2013. Bull. N 13. C. 4.
  15. Nefedov V. G., Matveev V. V., Korolyanchuk D. G. Influence of the frequency of electric current on the electrical conductivity of thin films of electrolytes. *Izv. universities. Chemistry and chem. Technology*, 2018, Vol. 61, no. 2, pp. 58-64.
  16. Poubaix M. *Atlas D'Équilibres Électrochimiques*. Paris. Gauthier – Villars & Cie. Éditeur-Imprimeur-Libraire, 1963. 646 p.
  17. Muratova O. M., Tulska G. G., Brovin A. Y., Senkevich I. V. Kinetics of electrode processes on PbO<sub>2</sub> in sulfuric acid solutions. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2005, no. 26, pp. 95-98.
  18. Tulska G. G., Bayrachny V. B., Brovin A. Y., Muratova O. M. Investigation of combined anode processes in sulfate solutions on OSTA. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2006, no. 12, pp. 122-128.
  19. Velichenko O. B. Micromodified lead dioxide electrodes: Abstract. dis ... Dr. chem. Sciences. 02.00.05. O. B. Velichenko. Ukr. state chemical technology un-t. D. 2002. 36 p.
  20. Atapin A. G., Nefedov V. G. Dynamics of bubble growth during electrolysis of water in concentrated solutions. *Modern electrochemical technologies and equipment: materials of the international scientific and technical conference. Minsk. November 28 – 30. 2017*. Belarusian State Technological University, Minsk, BSTU, 2017, pp. 137-141.
  21. Golovko D. A., Nefedov V. G., Golovko I. D., Shevchenko L. V. Obtaining of purified solutions of sodium hydroxide for synthesis of ferrates (VI). *Technology Audit and Production Reserves*, 2016, Vol. 6, no. 3 (32), pp. 17-21, doi: 10.15587/2312-8372.2016.86444
  22. Saville D. A. Electrokinetic effects with small particles. Journal Article. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1977, Vol. 9, no. 1, pp. 321-337, doi: 09.010177.001541.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Кравченко Кристина Миколаївна** – аспірант, кафедра Технічної електрохімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9412-1393; e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com.

**Kristina Kravchenko** – Postgraduate Student, Department of Technical Electrochemistry, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9412-1393; e-mail: k.n.kravchenko92@gmail.com.

**Павлов Богдан Володимирович** – аспірант, кафедра Технічної електрохімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1423-7706; e-mail: Vse\_cho\_treba@ukr.net.

**Bogdan Pavlov** – Postgraduate Student, Department of Technical Electrochemistry, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1423-7706; e-mail: Vse\_cho\_treba@ukr.net

**Тулський Геннадій Георгійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Технічна електрохімія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2662-8333; e-mail: tgg@kpi.kharkov.ua

**Gennady Tulska** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Electrochemistry, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2662-8333; e-mail: tgg@kpi.kharkov.ua

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Кравченко К. М., Павлов Б. В., Тулський Г. Г. Суміщені анодні процеси у розчинах сульфатної кислоти. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 99-106. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.15.

Please cite this article as:

Kravchenko K., Pavlov B., Tulsy G. Combined anode processes in sulfuric acid solutions. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkov: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 99-106, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.15.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кравченко К. Н., Павлов Б. В., Тульский Г. Г. Совмещенные анодные процессы в растворах серной кислоты. *Вестник Национального технического университета «ХПИ».* Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 99-106. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.15.

**АННОТАЦИЯ** Травление изделий из углеродистой стали в растворах серной кислоты является, с одной стороны, распространенным процессом в машиностроении, с другой стороны, вредным для экологии. По мере снижения концентрации  $H_2SO_4$  и насыщения раствора  $Fe_2SO_4$  скорость травления оксидной пленки на поверхности стали снижается. Поэтому при снижении концентрации  $H_2SO_4$  до 25-30 г/л процесс травления прекращают и проводят замену травильного раствора. При этом концентрация  $Fe_2SO_4$  достигает 400 г/л. При травлении наблюдается два процесса: растворение оксидов и растворения железа, которое находится под слоем оксидов. Эти два процесса могут протекать одновременно. Исследование электродных процессов в растворах серной кислоты, содержащие неорганические и органические примеси является основой для разработки технологических показателей регенерации отработанных сульфатных растворов. Для исследования использовали мало изнашиваемые анодные материалы - платину и оксид свинца (IV). Для определения кинетических закономерностей протекания анодного процесса на избранных анодных материалах применили вольтамперометрию с построением полученных зависимостей в тафелевских координатах. Поляризационные зависимости состоят из двух прямолинейных участков с перегибом при  $lg i_a \approx -1,8$  ( $i_a$ , А·см<sup>-2</sup>). Наклон первого участка не зависит от концентрации  $H_2SO_4$  и составляет 120 мВ. Наклон второго участка, для растворов с концентрацией  $H_2SO_4$  0,05 ... 0,37 моль·дм<sup>-3</sup>, составляет 60 мВ, а для концентрации 2,5 моль·дм<sup>-3</sup> - 71 мВ. Изменение концентрации серной кислоты практически не влияет на поляризацию анода. При концентрации 5,0 моль·дм<sup>-3</sup>, в области большой плотности тока ( $\geq 1500$  А·м<sup>-2</sup>), потенциал анода превышает ТНЗ для диоксида свинца. Это способствует адсорбции сульфат ионов на поверхности композиционного анода и начала образования активного кислорода. В этих условиях, на платиновом аноде наблюдается выделение перекиси водорода. Концентрация  $H_2SO_4$  значительно влияет на механизм и кинетику выделения кислорода. Поляризационные зависимости состоят из двух прямолинейных участков с разным наклоном. Для всего диапазона концентраций серной кислоты, в области малых плотностей тока наблюдается участок с наклоном в 120 мВ. Концентрация серной кислоты на этом участке не влияет на кинетику процесса, что согласуется с литературными данными для платины. Нулевой порядок по pH и независимость от концентрации серной кислоты для этого участка указывает, что наиболее вероятным механизмом выделения кислорода является разряд воды. Полученные значения эффективной энергии активации процесса выделения кислорода на ОСТП близки к результатам полученным на платине - 41,8 кДж·моль<sup>-1</sup> при  $E_a = 1,95$  В. Величина эффективной энергии активации указывает на электрохимическую природу поляризации, и ее снижение при увеличении анодного потенциала - на уменьшение прочности связи кислорода с поверхностью ОСТП.

**Ключевые слова:** серная кислота; отработанный раствор; кинетика; платиновый анод; двухоксидсвинцовый анод

Надійшла (received) 29.11.2020

УДК 628.15

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.16

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ КОНЦЕНТРОВАНИХ РОЗЧИНІВ ХЛОРИДУ НАТРІЮ З ОТРИМАННЯМ АЛЮМІНІЄВОГО КОАГУЛЯНТУ

Я. П. КРИЖАНОВСЬКА, М. Д. ГОМЕЛЯ, Т. О. ШАБЛИЙ\*, А. К. ВАКУЛЕНКО

кафедра екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: dsts1@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** У роботі досліджені процеси електрохімічної переробки розчинів хлориду натрію з отриманням хлориду алюмінію і луку в трикамерному електролізері з аніонообмінною мембраною МА-41 і катіонообмінною мембраною МК-40 та в двокамерному електролізері з катіонообмінною мембраною МК-40. Представлений спосіб переробки сольових концентратів із застосуванням розчинного алюмінієвого аноду є економічно доцільним, так як у результаті електролізу одночасно відбувається демінералізація рідких відходів до рівня нормативних вимог та виробництво з вихідних концентратів товарної продукції. Недоліком представленого способу отримання коагулянту є взаємодія алюмінію із водою. Проте, доведено, що із підвищенням анодної щільності струму під час електролізу вихід хлориду алюмінію практично повністю обумовлений електрохімічним розчиненням аноду, а хімічне розчинення алюмінію майже відсутнє. Стабільність отриманих розчинів коагулянтів протягом тривалого часу підтримується низькими значеннями реакції середовища ( $pH \leq 3$ ). Так, при силі струму 1 А (щільність струму  $8,34 \text{ A/dm}^2$ ) та вихідній концентрації хлориду натрію  $1900 \text{ мг-екв/дм}^3$  сумарна концентрація іонів алюмінію в отриманому розчині досягає  $3884 \text{ мг-екв/дм}^3$ . На хімічно розчинений алюміній припадає не більше 12 %. За даних вихідних параметрів вихід іонів алюмінію з урахуванням хімічного розчинення аноду складає 100–108 %. Одночасно в катодній камері відбувається концентрування луку до рівня приблизно  $1500 \text{ мг-екв/дм}^3$ . Його вихід за струмом при цьому сягає 92 %. Ступінь дифузії хлорид-іонів через аніонообмінну мембрану з робочої камери в анодну область становить 99 %. Показано, що процес електролізу розчину хлориду натрію в двокамерному електролізері з катіонообмінною мембраною проходить не так ефективно, як у випадку із застосуванням трикамерного електролізера. На початковій стадії процесу вихід за струмом становить по хлориду алюмінію 61 %, а по луку 64 %. У подальшому через отруєння катіонообмінної мембрани катіонами алюмінію, що блокують всі аніонні функціональні групи даної мембрани, процес припиняється.

**Ключові слова:** електродіаліз; коагулянт; хлорид алюмінію; катод; анод; знесолення води; гідроксохлориди алюмінію

## EVALUATING OF EFFICIENCY OF CONCENTRATED SODIUM CHLORIDE SOLUTIONS CONVERSION PROCESSES FOR OBTAINING ALUMINUM COAGULANT

Y. KRYZHANOVSKA, M. GOMELYA, T. SHABLIY, A. VAKULENKO

Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** In this work, the processes of sodium chloride solutions electrochemical processing in order to obtain aluminum chloride and alkali in a three-chamber electrolyzer with anion exchange membrane MA-41 and a cation exchange membrane MC-40 and in a two-chamber electrolyzer with a cation exchange membrane MC-40 were investigated. The presented method of processing salt concentrates using a soluble aluminum anode is economically feasible, as the electrolysis simultaneously demineralizes liquid waste to the level of regulatory requirements and production from source concentrates of marketable products. The disadvantage of this method of obtaining a coagulant is the interaction of aluminum with water. However, it is proved that with increasing anodic current density during electrolysis, the yield of aluminum chloride is almost entirely due to the electrochemical dissolution of the anode, and the chemical dissolution of aluminum is almost absent. The stability of the obtained solutions of coagulants for a long time is maintained by low values of the reaction medium ( $pH \leq 3$ ). Thus, at a current of 1 A (current density  $8.34 \text{ A/dm}^2$ ) and an initial concentration of sodium chloride of  $1900 \text{ mg-eq/dm}^3$ , the total concentration of aluminum ions in the resulting solution reaches  $3884 \text{ mg-eq/dm}^3$ . Chemically dissolved aluminum is not more than 12 %. According to the initial parameters, the yield of aluminum ions, taking into account the chemical dissolution of the anode is 100–108 %. At the same time in the cathode chamber is the concentration of alkali to a level of approximately  $1500 \text{ mg-eq/dm}^3$ . Its current output reaches 92 %. The degree of diffusion of chloride ions through the anion exchange membrane from the working chamber into the anode region is 99 %. It is shown that the process of sodium chloride solution electrolysis in a two-chamber electrolyzer with a cation exchange membrane is not as efficient as when using a three-chamber electrolyzer. At the initial stage of the process, the current yield is 61 % for aluminum chloride and 64 % for alkali. Subsequently, due to the poisoning of the cation exchange membrane by aluminum cations, which block all the anionic functional groups of this membrane, the process stops.

**Keywords:** electrodialysis; coagulant; aluminum chloride; cathode; anode; water desalination; aluminum hydroxychlorides

### Вступ

Вирішення проблеми знесолення природних, шахтних та інших вод з високою мінералізацією є досить складним. Проблема загострюється у зв'язку з

тим, що всі відомі методи знесолення води, такі як: іонний обмін [1], мембранні методи [2–4], електродіаліз [5], супроводжуються утворенням

концентрованих розчинів, переробка яких є досить складною та економічно затратною.

При досягненні концентрацій сольових розчинів вище 50 г/дм<sup>3</sup> іонний обмін, електродіаліз та мембранні методи взагалі непридатні для використання.

Аналіз попередніх досліджень. З опублікованих наукових праць за напрямком досліджень зі знесолення природних і стічних вод виходить, що будь-які з відомих підходів до опріснення води доцільно використовувати при концентрації мінеральних солей у воді менше 3,0 %. Ця концентрація є граничною як для іонного обміну, так і для мембранних методів. Використання випарних установок [6,7] та сушарок [8,9] є затратним та економічно недоцільним шляхом, якщо не виробляється цінна продукція. У випадку, коли вилучені мінеральні речовини необхідно скидати на звалище, проблема лише ускладнюється, тому що розчинні мінеральні солі розміщувати на звичайних звалищах заборонено, а створення спеціальних герметичних звалищ для захоронення таких відходів є надто дорогим.

Можливий один варіант для вирішення проблеми переробки сольових концентратів – виробництво з них реагентів або матеріалів, придатних для використання. Розчини, що містять сульфат-іони, іони кальцію та магнію, легко переробляти з отриманням в'язучих речовин, будівельних матеріалів. Проте переробка розчинів хлориду натрію є значно складнішою проблемою. Найбільш економічно доцільним способом їхньої переробки є отримання хлориду заліза [10,11]. Публікації щодо отримання хлориду алюмінію з концентратів практично відсутні. У роботі [12] описані основні аспекти отримання солей алюмінію електродіалізом, проте ряд проблем залишилися не вирішеними.

### Мета роботи

Метою роботи є визначення параметрів процесу синтезу хлориду алюмінію при переробці відходів, що містять розчини хлориду натрію.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Визначити параметри процесу знесолення розчинів хлориду натрію при використанні трикамерного електролізера та алюмінієвого аноду, мембран МК-40 та МА-41 в залежності від анодної щільності струму, концентрації луку в катодній області з урахуванням рН аноліту;

2. Оцінити вплив анодної щільності струму на вихід хлориду та гідроксохлориду алюмінію;

3. Встановити граничні параметри процесу отримання хлориду алюмінію при переробці розчинів хлористого натрію у двокамерному електролізері з катіонообмінною мембраною та алюмінієвим анодом.

### Виклад основного матеріалу

У роботі використовували дво- та трикамерні електролізери з об'ємом камер 75–175 см<sup>3</sup> кожна. В двокамерному електролізері використовували катіонообмінну мембрану МК-40, катод із легованої сталі 12Х18Н10Т, алюмінієвий анод (АД-0). У трикамерному електролізері додатково використовували аніонообмінну мембрану МА-41. В катодній камері застосовували слаболужні розчини луку ( $\text{Л}=50\text{--}70$  мг-екв/дм<sup>3</sup>), в анодній камері – слабокислі розчини соляної кислоти ( $\text{К}=0,5\text{--}50$  мг-екв/дм<sup>3</sup>). Робочими розчинами були розчини хлориду натрію з концентрацією 1700–1900 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Площа електродів становила 0,12 дм<sup>2</sup>. Сила струму коливалася у межах 0,25–1,00 А.

При зниженні концентрації розчину NaCl в робочій камері нижче 50–100 мг-екв/дм<sup>3</sup> розчин замінювали на вихідний. При досягненні лужності в катодній камері 1400–1700 мг-екв/дм<sup>3</sup> його також замінювали на вихідний з лужністю 50–70 мг-екв/дм<sup>3</sup>.

Вихід речовини за струмом ( $B$ , %) розраховували за формулою:

$$B = \frac{m_p}{m_t} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де  $m_p$  – реальна маса речовини, розчиненої/перенесеної в іншу камеру в процесі електролізу, г;

$m_t$  – теоретично розрахована маса речовини, отриманої/розчиненої/перенесеної в іншу камеру електролізеру, г:

$$m_t = K_F \cdot I \cdot t \quad (2)$$

де  $K_F=0,0371$  моль/(А·год);  $I$  – сила струму, А;  $t$  – час, год.

$$m_p = V_s \cdot (C_0 - C), \quad (3)$$

де  $V_s$  – об'єм обробленого розчину, дм<sup>3</sup>;  $C_0$  – початкова концентрація компоненту в розчині, моль/дм<sup>3</sup>;  $C$  – кінцева концентрація компоненту в розчині після обробки, моль/дм<sup>3</sup>.

Ступінь вилучення хлоридів (хлориду натрію) з робочої камери ( $Z$ , %) розраховували за формулою:

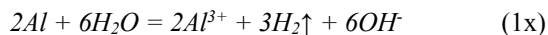
$$Z = \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \cdot 100, \% \quad (4)$$

де  $C$  – кінцева концентрація компоненту в розчині після обробки, моль/дм<sup>3</sup>;  $C_0$  – початкова концентрація компоненту в розчині, моль/дм<sup>3</sup>.

Отримання хлоридів та гідроксохлоридів алюмінію є досить перспективним напрямком переробки відходів, а саме розчинів хлориду натрію різних концентрацій. Процес розчинення алюмінію проходить ефективно незалежно від концентрації хлористого натрію у робочій камері. При цьому

використання анодів із металевого алюмінію суттєво спрощує процес. За умови розділення катодів і анодів робочою зоною в якості алюмінієвих анодів можна використовувати як металеві пластини, так і металеву стружку. Це суттєво здешевлює виробництво алюмінієвих коагулянтів.

З іншої сторони процес отримання хлориду алюмінію ускладнюється взаємодією активованого алюмінію із водою поряд із анодним електрохімічним його розщепленням.



Крім того, за умови підвищення pH середовища в анодній області можливе утворення кисню або активного хлору на аноді, що в подальшому можуть окиснювати алюміній.

### Обговорення результатів

Очевидно, що вихід по основному процесу – синтез хлориду алюмінію, може залежати від анодної щільності струму. Тому на першому етапі ми визначали вихід іонів алюмінію  $Al^{3+}$  та вихід по дифузії хлоридів залежно від анодної щільності струму.

На першому етапі було досліджено процес знесолення розчину хлориду натрію концентрацією  $1700 \text{ мг-екв/дм}^3$  з отриманням хлориду алюмінію при силі струму  $0,25 \text{ А}$ , при анодній щільності струму  $2,08 \text{ А/дм}^2$  (рис. 1).

Як видно з рисунку 1, досить ефективно відбувається дифузія хлоридів із робочої камери в анодну камеру. При цьому концентрація алюмінію в анодній камері зростає швидше за концентрацію хлоридів. З цього виходить, що в даному випадку алюміній частково взаємодіє з водою (рис. 2). Це видно і за підвищенням pH середовища в анодній камері.

Даний процес призводить до зменшення дифузії хлоридів в анодну область. Крім того, це впливає на дифузію натрію в катодну область. Вочевидь часткова дифузія протонів в катодну область спричиняє підвищення лужності в робочій камері, що знову ж знижує ефективність дифузії хлоридів в анодну область. Через 50 годин електролізу різниця у концентраціях алюмінію та хлоридів в анодній області сягає  $890 \text{ мг-екв}$ . Рівень pH сягає 4,36. Це спричиняє частковий гідроліз алюмінію з висадженням  $Al(OH)_3$ . Концентрація алюмінію при цьому на 50–52 годинах електролізу падає з  $3230 \text{ мг-екв/дм}^3$  до  $1850 \text{ мг-екв/дм}^3$ . Концентрація хлоридів зростає до  $2392 \text{ мг-екв/дм}^3$ , а pH падає до 1,55.

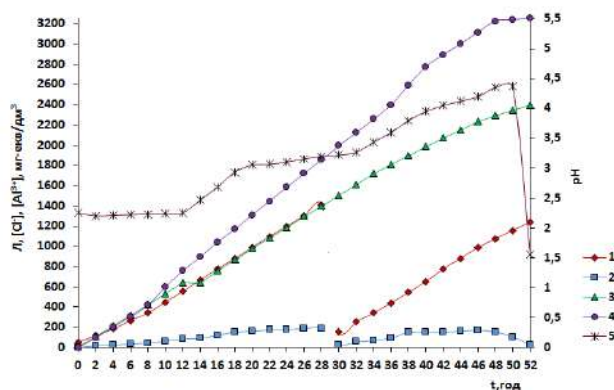


Рис. 1 – Зміна лужності в катодній камері (1) та робочій камері (2) трикамерного електролізера, концентрації хлоридів (3) та іонів алюмінію (4), pH середовища (5) в анодній камері електролізера з алюмінієвим анодом з часом електролізу ( $I=0,25 \text{ А}$ ,  $S_a=S_k=0,12 \text{ дм}^2$ ,  $V_{к.к.}=V_{р.к.}=175 \text{ см}^3$ ,  $j=2,08 \text{ А/дм}^2$ ) розчину хлориду натрію концентрацією  $1700 \text{ мг-екв/дм}^3$

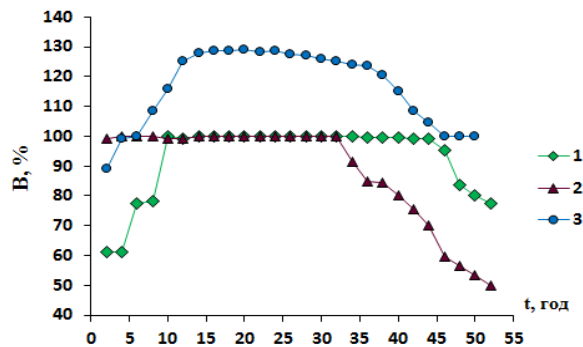


Рис. 2 – Зміна виходу за струмом лугу в катодній області (1), дифузії хлоридів із робочої камери в анодну область (2) та розчинення алюмінієвого аноду (3) із часом електролізу розчину хлориду натрію ( $1700 \text{ мг-екв/дм}^3$ , робоча камера) в трикамерному електролізері при початковій концентрації лугу в катодній області  $50 \text{ мг-екв/дм}^3$ , початковій кислотності в анодній камері  $8,5 \text{ мг-екв/дм}^3$  ( $I=0,25 \text{ А}$ ;  $j=2,08 \text{ А/дм}^2$ )

Як видно з рис. 2, вихід за струмом іонів  $Al^{3+}$  починаючи з 8-ої години електролізу перевищує 100 %, що обумовлено розчиненням алюмінію при взаємодії з водою. Дифузія хлоридів відбувається досить ефективно. Вихід за струмом сягає приблизно 100 %. Менш ефективно відбувається дифузія іонів натрію. Хоча в окремих періодах електролізу вихід за струмом в даних процесах сягає 95–100 %.

При підвищенні сили струму до  $0,5 \text{ А}$ , анодної щільності струму до  $4,17 \text{ А/дм}^2$ , інтенсивність процесу зростає (табл. 1). І хоча при цьому вихід за струмом у процесі дифузії хлоридів зменшується до 90–96 % (крім останніх 4-ох годин електролізу), а вихід за струмом лугу в катодній області знижується до 80–90 %, розчинення алюмінію при взаємодії з водою при pH – 2,21–3,20 є менш значним у порівнянні з попереднім дослідом.

Таблиця 1 – Залежність параметрів процесу електролізу розчину хлориду натрію (1900 мг-екв/дм<sup>3</sup>) в трикамерному електролізері (мембрани МК-40, МА-41) від часу електролізу при використанні алюмінієвого аноду ( $I=0,5$  А,  $S_a=S_k=0,12$  дм<sup>2</sup>,  $V_{к.к.}=V_{а.к.}=V_{р.к.}=100$  см<sup>3</sup>,  $j=4,17$  А/дм<sup>2</sup>)

| t, год | Л, мг-екв/дм <sup>3</sup> |       | [Cl <sup>-</sup> ], мг-екв/дм <sup>3</sup> |      | [Al <sup>3+</sup> ], мг-екв/дм <sup>3</sup> | В, %  |                       |                          | pH, АК | I, А | U, В |
|--------|---------------------------|-------|--------------------------------------------|------|---------------------------------------------|-------|-----------------------|--------------------------|--------|------|------|
|        | КК                        | РК    | РК                                         | АК   |                                             | Л, КК | Al <sup>3+</sup> , АК | Cl <sup>-</sup> , АК, РК |        |      |      |
| 0      | 50,0                      | 0     | 1900                                       | 35   | ---                                         | ---   | ---                   | ---                      | 2,20   | 0,5  | 3    |
| 1      | 193,0                     | 15,6  | 1725                                       | 210  | 180,0                                       | 76,9  | 96,8                  | 94,0                     | 2,21   | 0,5  | 3    |
| 2      | 351,8                     | 37,0  | 1551                                       | 384  | 367,4                                       | 85,4  | 100,2                 | 93,5                     | 2,21   | 0,5  | 3    |
| 3      | 514,6                     | 59,3  | 1375                                       | 560  | 563,4                                       | 87,5  | 105,4                 | 94,6                     | 2,22   | 0,5  | 3    |
| 4      | 681,6                     | 79,8  | 1197                                       | 738  | 768,7                                       | 88,7  | 110,4                 | 95,7                     | 2,24   | 0,5  | 3    |
| 5      | 848,6                     | 94,7  | 1020                                       | 915  | 968,1                                       | 89,8  | 111,5                 | 95,2                     | 2,25   | 0,5  | 3    |
| 6      | 1016,6                    | 105,8 | 840                                        | 1095 | 1157,8                                      | 90,3  | 110,2                 | 96,8                     | 2,35   | 0,5  | 3    |
| 7      | 1184,7                    | 118,8 | 665                                        | 1270 | 1366,7                                      | 90,4  | 112,3                 | 94,1                     | 2,46   | 0,5  | 3    |
| 8      | 1300,3 (50)               | 138,5 | 497                                        | 1438 | 1579,5                                      | 81,2  | 114,4                 | 90,9                     | 2,68   | 0,5  | 5    |
| 9      | 189,5                     | 106,1 | 347                                        | 1588 | 1784,8                                      | 75,4  | 109,2                 | 80,6                     | 2,93   | 0,5  | 7    |
| 10     | 323,7                     | 98,7  | 212                                        | 1723 | 1963,4                                      | 72,1  | 96,0                  | 72,5                     | 3,05   | 0,5  | 10   |
| 11     | 453,6                     | 75,3  | 92                                         | 1843 | 2127,6                                      | 70,4  | 88,3                  | 64,5                     | 3,15   | 0,5  | 30   |
| 12     | 580,1                     | 45,4  | 10                                         | 1925 | 2255,0                                      | 68,5  | 68,5                  | 44,1                     | 3,20   | 0,5  | 50   |

Внесок даного процесу у вихід катіонів Al<sup>3+</sup> не перевищує 24,4 %, а на певних етапах процесу його внесок менше ніж 1 %. У результаті електролізу отримано розчин лугу концентрацією 1300 мг-екв/дм<sup>3</sup>, а концентрація хлориду натрію в робочій камері знижується до 10 мг-екв/дм<sup>3</sup>.

При підвищенні сили струму до 1 А при анодній щільності струму 8,34 А/дм<sup>2</sup> швидкість процесу зростає ще в більший мірі. Якщо при силі струму 0,25 А концентрація хлоридів в анодній області зростає до 2345 мг-екв/дм<sup>3</sup> за 50 год, то при силі струму 1 А концентрація хлоридів в аноліті на рівні 2691 мг-екв/дм<sup>3</sup> досягається за 7 годин електролізу (рис. 3). При цьому еквівалентна концентрація іонів алюмінію в аноліті не перевищує 2697 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Це говорить про те, що розчинення алюмінію відбувається за рахунок електролізу (реакція 2), і внесок хімічного розчинення алюмінію практично відсутній. При цьому за 10 годин електролізу отримано розчин хлориду алюмінію концентрацією 3470 мг-екв/дм<sup>3</sup>.

Концентрація іонів алюмінію сумарно сягає 3884 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Це значить, що внесок хімічного процесу розчинення алюмінію не перевищує 12 %. При цьому рН середовища не перевищує 3,0. Це вказує на те, що отриманий розчин досить стабільний і може тривалий час використовуватись в якості коагулянту.

Вихід за струмом лугу сягає 92 %, а дифузії хлоридів із робочої камери в анодну область – 99 %. Вихід іонів алюмінію з урахуванням хімічного розчинення аноду сягає 100,1–108,5 % (рис. 4).

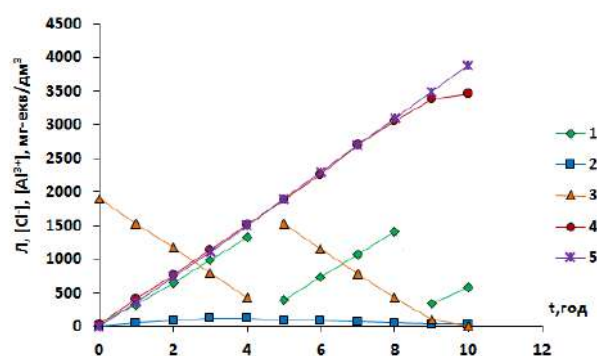


Рис. 3 – Залежність лужності в катодній (1) та робочій (2) камерах, концентрації хлоридів в робочій (3) та анодній (4) камерах, концентрації алюмінію (5) від часу електролізу розчину хлориду натрію (1900 мг-екв/дм<sup>3</sup>) в трикамерному електролізері при силі струму 1А ( $j=8,34$  А/дм<sup>2</sup>)

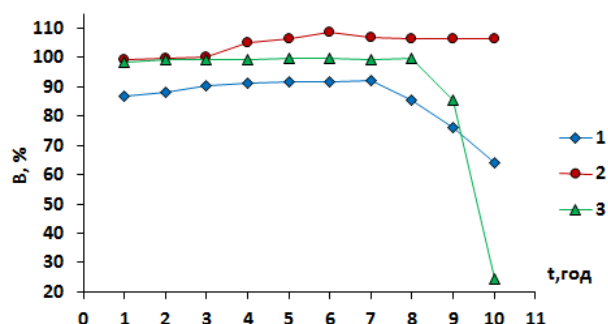


Рис. 4 – Залежність виходу за струмом лугу в катодній камері (1), розчиненого алюмінію в анодній камері (2) та дифузії хлоридів із робочої в анодну камеру (3) від часу електролізу розчину хлориду натрію (1900 мг-екв/дм<sup>3</sup>) в трикамерному електролізері при силі струму 1А ( $j=8,34$  А/дм<sup>2</sup>)



Досить цікавим було вивчення процесу отримання алюмінієвого коагулянту в двокамерному електролізері. У даному випадку розчин хлориду натрію розміщували в анодній камері, а в катодній камері відбувалося концентрування луку. Враховуючи те, що електропровідність катіонообмінної мембрани по іонах натрію значно вища за електропровідність по іонах алюмінію, можна було сподіватись, що в анодній камері буде концентруватись хлорид алюмінію, а в катодній камері – луг. І дійсно, на початок процесу при силі струму 1 А відбувається розчинення алюмінієвого аноду (рис. 5) при зростанні концентрації алюмінію до 524 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Вихід за струмом становить по хлориду алюмінію 60,9 %, а по луку 63,5 %. Проте надалі процес суттєво сповільнюється, а вихід за струмом по хлориду алюмінію падає до 11,7 %, а по луку до 1 %. Пов'язане це з тим, що лугозарядні катіони алюмінію, при збільшенні їхньої концентрації в розчині все більше сорбуються на катіонообмінній мембрані, витісняючи лугозарядні катіони натрію (можливо і протони). З часом практично всі аніонні функціональні групи катіонообмінної мембрани опиняються блокованими катіонами алюмінію, дифузія яких відбувається вкрай повільно через значне електростатичне притягування позитивно заряджених функціональних груп мембран. Електричний опір мембрани зростає у десятки разів. Мембрана практично втрачає здатність до електропровідності. Ефект посилюється по мірі отруєння мембрани іонами алюмінію. Врешті решт, процес електролізу зупиняється. Це видно з рисунку 6, в якому на початок процесу при напрузі 5 В сила струму сягає 1 А, а через 7 годин вже при напрузі 50 В вона ледве сягає 0,2 А.

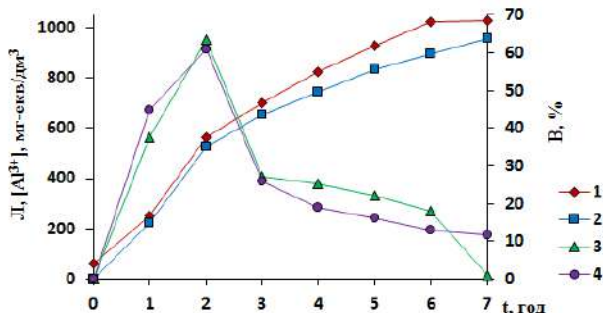


Рис. 5 – Залежність лужності в катодній області (1), концентрації алюмінію в анодній області (2), виходу за струмом хлориду алюмінію (3), виходу за струмом луку (4) від часу електролізу розчину хлориду натрію (1709 мг-екв/дм<sup>3</sup>) в двокамерному електролізері (мембрана МК-40, анод – алюміній АД-0), при силі струму 1А ( $j=8,34 \text{ А/дм}^2$ ,  $V_{к.к.}=V_{а.к.}=75 \text{ см}^3$ , рН 2,50–3,17

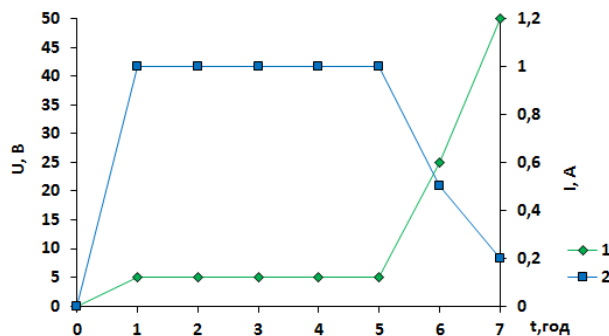


Рис. 6 – Зміна напруги (1) та сили струму (2) з часом електролізу розчину хлориду натрію (1709 мг-екв/дм<sup>3</sup>) в двокамерному електролізері (мембрана МК-40,  $j=8,34 \text{ А/дм}^2$ ,  $V_{к.к.}=V_{а.к.}=75 \text{ см}^3$ , рН 2,50–3,17)

Вихід за струмом як хлориду алюмінію, так і луку є настільки низьким, що продовження процесу є недоцільним.

Таким чином, із приведених результатів видно, що при використанні звичайних катіонообмінних мембран у двокамерних електролізерах отримати задовільні результати по синтезу хлориду алюмінію у разі переробки розчину хлориду натрію із застосуванням алюмінієвих анодів неможливо.

## Висновки

За результатами досліджень можна зробити наступні висновки. При проведенні електролізу розчинів хлориду натрію в трикамерному електролізері можна ефективно їх знесолювати з отриманням розчинів хлориду алюмінію та луку. Інтенсивність процесу зростає із підвищенням анодної щільності струму.

При підвищенні анодної щільності струму зростає вихід хлориду алюмінію, отриманого за рахунок електрохімічного розчинення аноду, тоді як при зменшенні сили струму зростає вклад хімічного розчинення алюмінію в підкислених розчинах. При цьому зростає основність отриманого продукту, рН розчину, що знижує його стабільність, і може супроводжуватись за рН>5 випаданням в осад гідроксиду алюмінію.

Дослідження по переробці розчину хлориду натрію у двокамерному електролізері з катіонообмінною мембраною та алюмінієвим анодом показали, що дані установки низькоєфективні через отруєння катіонообмінної мембрани іонами алюмінію.

Щодо перспектив подальших досліджень. На певних етапах електролізу розчинів хлориду натрію в двокамерних електролізерах отримано позитивні результати. У випадку захисту катіонообмінної мембрани від отруєння її іонами алюмінію процес переробки розчинів хлориду натрію в двокамерному електролізері може бути перспективним. Доцільно провести дослідження при використанні біполярних мембран.

## Список літератури

- Макаренко І. М., Глушко О. В., Рисухін В. В., Терещенко О. М. Застосування катіонітів для кондиціювання води в процесах її баромембранного знесолення. *Восточно-Европейський журнал передових технологій*. 2013. № 3/6 (63). С. 48–52.
- Naidu L. D., Saravanan S., Chidambaram M., Goel M., Das A., Sarat J., Babu C. Nanofiltration in Transforming Surface Water into Healthy Water: Comparison with Reverse Osmosis. *Journal of Chemistry*. 2015. № 1–2. P. 1–6. doi: 10.1155/2015/326869.
- Epszstein R., Nir O., Lahav O., Green M. Selective nitrate removal from groundwater using a hybrid nanofiltration-revers osmosis filtration scheme. *Chemical Engineering Journal*. 2015. № 279. P. 372–378. doi: 10.1016/j.cej.2015.05.010.
- Гончарук В. В., Осипенко В. О., Балакина М. Н., Кучерук Д. Д. Очистка воды от нитратов методом обратного осмоса низкого давления. *Химия и технология воды*. 2013. № 35 (2). С. 71–75.
- Akhter M., Habib G., and Qamar S. Application of Electrodialysis in Waste Water Treatment and Impact of Fouling on Process Performance. *Journal of Membrane Science & Technology*. 2018. № 8(2). P. 1–8. doi: 10.4172/2155-9589.1000182.
- Lin Chen, Huiyao Wang, Sarada Kuravi, Krishna Kota, Young Ho Park, Pei Xu. Low-cost and reusable carbon black based solar evaporator for effective water desalination. *Desalination*. 2020. № 483. P. 114412. doi: 10.1016/j.desal.2020.114412.
- Ferry J., Widyolar B., Jiang L., Winston R. Solar thermal wastewater evaporation for brine management and low pressure steam using the XCPC. *Applied Energy*. 2020. № 256. P. 114746. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114746.
- Wenyi Deng, Yaxin Su, Weichao Yu. Theoretical Calculation of Heat Transfer Coefficient When Sludge Drying in a Nara-Type Padlle Dryer Using Different Heat Carries. *Procedia Environmental Science*. 2013. № 18. P. 709–715. doi: 10.1016/j.proenv.2013.04.096.
- Bennamoun L., Arlabosse P., Leonard A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. № 28. P. 29–43. doi: 10.1016/j.rser.2013.07.043.
- Крижановська Я. П., Гомеля М. Д., Радовенчик Я. В. Безвідходна технологія очистки високомінералізованих вод з отриманням коагулянту. *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2019. № 1. С. 67–72. doi: 10.20535/2617-9741.1.2019.171047.
- Крижановська Я. П., Макаренко І. М., Гомеля М. Д., Шаблій Т. О. Електрохімічна утилізація розчинів хлориду натрію з отриманням хлоридів заліза. *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2020. № 1. С. 50–59. doi: 10.20535/2617-9741.1.2020.207815.
- Гомеля М. Д., Радовенчик Я. В., Мартинюк Я. П. Переробка розчинів хлористого натрію з отриманням хлоридів алюмінію. *Інтегровані технології промисловості та енергозбереження*. 2017. №4. С. 66–69.
- of subacid cationites for water conditioning in baromembrane demineralization]. *Easten-Europe journal of Enterprise Technologies*, 2013, no 3/6 (63), pp. 48–52.
- Naidu L.D., Saravanan S., Chidambaram M., Goel M., Das A., Sarat J., Babu C. 2015 Nanofiltration in Transforming Surface Water into Healthy Water: Comparison with Reverse Osmosis. *Journal of Chemistry*, 2015, no 1–2, pp. 1–6, doi: 10.1155/2015/326869.
- Epszstein R., Nir O., Lahav O., Green M. Selective nitrate removal from groundwater using a hybrid nanofiltration-revers osmosis filtration scheme. *Chemical Engineering Journal*, 2015, no 279, pp. 372–378, doi: 10.1016/j.cej.2015.05.010.
- Goncharuk V., Osipenko V., Balakina M., Kucheruk D. Ochystka vody ot nytratov metodom obratnoho osmosa nyzkoho davleniya [Water purification of nitrates by low-pressure reverse osmosis method]. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2013, no. 35 (2), pp. 71–75.
- Akhter M., Habib G., and Qamar S. Application of Electrodialysis in Waste Water Treatment and Impact of Fouling on Process Performance. *Journal of Membrane Science & Technology*, 2018, no. 8(2), pp. 1–8, doi: 10.4172/2155-9589.1000182.
- Lin Chen, Huiyao Wang, Sarada Kuravi, Krishna Kota, Young Ho Park, Pei Xu. 2020. Low-cost and reusable carbon black based solar evaporator for effective water desalination. *Desalination*, 2020, no. 483, pp. 114412, doi: 10.1016/j.desal.2020.114412.
- Ferry J., Widyolar B., Jiang L., Winston R. Solar thermal wastewater evaporation for brine management and low pressure steam using the XCPC. *Applied Energy*, no 256, pp. 114746, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114746.
- Wenyi Deng, Yaxin Su, Weichao Yu. Theoretical Calculation of Heat Transfer Coefficient When Sludge Drying in a Nara-Type Padlle Dryer Using Different Heat Carries. *Procedia Environmental Science*, 2013, no 18, pp. 709–715, doi: 10.1016/j.proenv.2013.04.096.
- Bennamoun L., Arlabosse P., Leonard A. Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, no 28, pp. 29–43, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.043.
- Kryzhanovskaya Ya. P., Homelia M. D., Radovenchik Ya. V. Bezvidkhodna tekhnolohiia ochystky vysokominalizovanykh vod z otrymanniam koahuliantu [Insufficient cleaning technology high-milled with receiving koagulant]. *Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, 2019, no 1, pp. 67–72, doi: 10.20535/2617-9741.1.2019.171047.
- Kryzhanovska Ya. P., Makarenko I. M., Gomelya M. D., Shabliy T. O. Elektrokhimichna utylizatsiia rozchyniv khlorydu natriiu z otrymanniam khlorydiv zaliza [Electrochemical utilization of sodium chloride solutions with obtaining iron chlorides]. *Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, 2020, no 1, pp. 50–59, doi: 10.20535/2617-9741.1.2020.207815.
- Gomelya M. D., Radovenchik I. V., Martyniuk I. P. Pererobka rozchyniv khlorystoho natriiu z otrymanniam khlorydiv aluminiiu [Treatment of solvents chloride sodium solvents with production of aluminum chloride]. *Integrated technologies and energy conservation*, 2017, no 4, pp. 66–69.

## References (transliterated)

- Makarenko I., Hlushko O., Rychuhin V., Tereschenko O. Zastosuvannia kationitiv dlia kondytsiiuvannia vody v protsesakh yii baromembrannoho znesolennia [Application

### Відомості про авторів (About authors)

**Крижановська Яна Петрівна** – Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів, м. Київ, Україна; e-mail: yanamart93@ukr.net.

**Yana Kryzhanovska** – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, PhD student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Kyiv, Ukraine; e-mail: yanamart93@ukr.net.

**Гомеля Микола Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0003-1165-7545; e-mail: m.gomelya@kpi.ua.

**Mykola Gomelya** – Doctor of Technical Sciences (Dr. Sc), Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, head of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1165-7545; e-mail: m.gomelya@kpi.ua.

**Шаблій Тетяна Олександрівна** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри екології та технології рослинних полімерів, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0002-6710-9874; e-mail: dsts1@ukr.net.

**Tetyana Shabliy** – Doctor of Technical Sciences (Dr. Sc), Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, professor of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6710-9874; e-mail: dsts1@ukr.net.

**Вакуленко Анна Костянтинівна** – Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського», аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів, м. Київ, Україна; e-mail: vakulanna@gmail.com.

**Anna Vakulenko** – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, PhD student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Kyiv, Ukraine; e-mail: vakulanna@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Крижановська Я. П., Гомеля М. Д., Шаблій Т. О., Вакуленко А. К. Оцінка ефективності процесів переробки концентрованих розчинів хлориду натрію з отриманням алюмінієвого коагулянту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». № 4 (6). С. 107-113. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.16.

*Please cite this article as:*

Kryzhanovska Y., Gomelya M., Shabliy T., Vakulenko A. Evaluating of efficiency of concentrated sodium chloride solutions conversion processes for obtaining aluminum coagulant. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 107-113, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.16.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Крижановская Я. П., Гомеля Н. Д., Шаблій Т. А., Вакуленко А. К. Оценка эффективности процессов переработки концентрированных растворов хлорида натрия с получением алюминиевого коагулянта. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». № 4 (6). С. 107-113. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.16.

**АННОТАЦІЯ** В роботі були досліджені процеси електрохімічної переробки розчинів хлориду натрію з отриманням хлориду алюмінію і щелочи в трьохкамерному електролизері з аніонообмінної мембраною МА-41 і катионообмінної мембраною МК-40, а також в двохкамерному електролизері з катионообмінної мембраною МК-40. Представлений спосіб переробки солевих концентратів з використанням розчинного алюмінієвого анода є економічною цілорозумною, так як в результаті електролізу одночасно відбувається демінералізація промислових рідких відходів до рівня нормативних вимог і виробництво з вихідних концентратів товарної продукції. Недоліком представленого способу отримання коагулянту є взаємодія алюмінію з водою. Однак доведено, що з підвищенням анодної густоти струму при електролизі вихід хлориду алюмінію практично повністю обумовлено електрохімічним розчиненням анода, а хімічне розчинення алюмінію майже відсутнє. Стабільність отриманих розчинів коагулянтів впродовж тривалого часу підтримується низькими значеннями реакції середовища ( $pH \leq 3$ ). Так, при силі струму 1 А (густота струму 8,34 А/дм<sup>2</sup>) і вихідній концентрації хлориду натрію 1900 мг-екв/дм<sup>3</sup> сумарна концентрація іонів алюмінію в отриманому розчині досягає 3884 мг-екв/дм<sup>3</sup>. На хімічно розчинений алюміній припадає не більше 12 %. При вказаних вихідних параметрах вихід іонів алюмінію з урахуванням хімічного розчинення анода становить 100–108 %. Одночасно в катодній камері відбувається концентрування щелочи приблизно до 1500 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Її вихід по струму при цьому досягає 92 %. Степень дифузії хлорид-іонів через аніонообмінну мембрану в робочій камері в анодну область становить 99 %. Показано, що процес електролізу розчину хлориду натрію в двохкамерному електролизері з катионообмінної мембраною проходить не так ефективно, як в разі з використанням трьохкамерного електролизера. На початковій стадії процесу вихід по струму становить по хлориду алюмінію 61 %, а по щелочи 64 %. В подальшому через отравлення катионообмінної мембрани катионами алюмінію, які блокують всі аніонні функціональні групи даної мембрани, процес припиняється.

**Ключові слова:** електроліз; коагулянт; катод; анод; обессолювання води; гідроксохлорид алюмінію

Надійшла (received) 16.11.2020

УДК 66.095.132:661.74+66.097.3+544.47

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.17

## КІНЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОДЕРЖАННЯ БУТИЛОЛЕАТУ В ПРИСУТНОСТІ ОКСИДІВ МЕТАЛІВ

С. Р. МЕЛЬНИК<sup>1\*</sup>, Р. О. СТАРЧЕВСЬКИЙ<sup>1</sup>, Ю. Р. МЕЛЬНИК<sup>1</sup>, О. Е. ОРЖЕХОВСЬКА<sup>1</sup>,  
Г. Я. МАГОРІВСЬКА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> кафедра технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

<sup>2</sup> кафедра хімічної технології силікатів, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

\*e-mail: stepan.r.melnyk@lpnu.ua

**АНОТАЦІЯ** Досліджено кінетичні закономірності взаємодії олеїнової кислоти і бутан-1-олу в присутності оксидів цинку, нікелю (II), заліза (II) і міді (II) у стаціонарних умовах. Встановлено, що за температури 383 К найвищу каталітичну активність виявляє оксид цинку, а швидкість реакції естерифікації в присутності інших оксидів металів є нижчою та приблизно однаковою. Показано, що за вмісту 0,25 мас. % гетерогенного каталізатора в реакційній суміші та 7,6–8,0-разового мольного надлишку спирту кінетичне рівняння реакція естерифікації має перший порядок за олеїновою кислотою. Для квазігомогенної кінетичної моделі реакції за умови її каталізу оксидами цинку та нікелю (II) за різної температури визначені ефективні константи швидкості, за якими розраховано енергію активації та передекспоненційний множник. Показано, що квазігомогенна модель реакції між олеїною кислотою та бутан-1-олом задовільно описує процес естерифікації в нестационарних умовах. Розраховані за кінетичними показниками процесу і визначені експериментально значення конверсії олеїнової кислоти в процесі її естерифікації в присутності оксиду цинку та оксиду нікелю (II) за умови відгонки води становили 80,0 і 75,9 та 53,7 і 47,5 % за 360 хв реакції, відповідно. Одержані дані дозволяють розраховувати тривалість реакції одержання бутилолеату, необхідну для досягнення заданої конверсії олеїнової кислоти за відповідних температурних умов. Виявлено, що оксиди цинку та міді (II) під час реакції взаємодіють з олеїною кислотою з утворенням відповідних солей. За допомогою кондуктометрії встановлено, що електрична провідність реакційної суміші збільшується порівняно з модельною сумішшю реагентів у 6,1 та 1,6 рази за умови каталізу реакції оксидом міді (II) та оксидом цинку, відповідно. Зроблене припущення, що в присутності цих оксидів одночасно відбувається гетерогенно- і гомогенно-каталітична естерифікація олеїнової кислоти бутан-1-олом. Вказано, що одним із лімітуючих чинників застосування оксидів металів як каталізаторів трансестерифікації тригліцеридів нижчими аліфатичними спиртами є вміст вільних жирних кислот в олії.

**Ключові слова:** бутилолеат; олеїнова кислота; бутан-1-ол; естерифікація; каталізатор; оксиди металів; кінетика

## KINETIC AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF BUTYLOLEATE OBTAINING IN THE PRESENCE OF METAL OXIDES

S. MELNYK<sup>1</sup>, R. STARCHEVSKYI<sup>1</sup>, Y. MELNYK<sup>1</sup>, O. ORZHEKHOVSKA<sup>1</sup>, H. MAHORIVSKA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Organic products technology, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Chemical technology of silicates, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

**ABSTRACT** The kinetic regularity of reaction between oleic acid and butan-1-ol in the presence of zinc, nickel (II), iron (II), and copper (II) oxides were investigated under stationary conditions. It was found that at 383 K zinc oxide is the most active catalyst among other oxides. The rate of esterification reaction in the presence of other metal oxides is lower and approximately the same. It was shown that the kinetic equation of esterification reaction has the first order for oleic acid (at a content of 0.25 % mass of the heterogeneous catalyst in the reaction mixture and 7.6–8.0 times molar excess of alcohol). The effective rate constants for a quasi-homogeneous kinetic model of esterification reaction catalyzed by zinc and nickel (II) oxides at different temperatures are determined. The constants are used to calculate the activation energy and pre-exponential factor. It was shown that the quasi-homogeneous model of the reaction between oleic acid and butan-1-ol satisfactorily describes the esterification process under non-stationary conditions. The conversion values of oleic acid calculated according to the kinetic parameters and its values determined experimentally under non-stationary conditions for 360 min of the reaction were 80.0 and 75.9 % for zinc oxide catalysis and 53.7 and 47.5 % in the presence nickel (II) oxide, respectively. The obtained data allow calculating the duration of the esterification process required to achieve a given oleic acid conversion under appropriate temperature conditions. It was found that zinc and copper (II) oxides interact with oleic acid during the reaction and form the corresponding salts. Using conductometry, it was found that the electrical conductivity of the reaction mixture increases by 6.1 and 1.6 times compared to the model mixture of reagents without catalysts, provided that the reaction is catalyzed with copper (II) oxide and zinc oxide, respectively. It is assumed that in presence of these oxides heterogeneous and homogeneous catalytic esterification of oleic acid by butan-1-ol occurs simultaneously. It is indicated that one of the limiting factors for the use of metal oxides as catalysts for the transesterification of triglycerides by lower aliphatic alcohols is the content of free fatty acids in the oil.

**Keywords:** butyl oleate; oleic acid; butan-1-ol; esterification; catalyst; metal oxides; kinetic

### Вступ

Реакції між вищими ненасиченими жирними кислотами або тригліцеридами рослинних олій і

бутан-1-олом використовують для одержання біодизелю (в перспективі – компонента біокеросину), пластифікаторів, емульгаторів, вищих жирних спиртів, гідрофобізуючих добавок до цементних

сумішей, присадок до дизпалива, основи моторних олив, антистатичних мастил і компонентів напівсинтетичних олив, складових косметичних і фармацевтичних препаратів, компонентів композицій лаків, ґрунтовок, емалей тощо [1].

Естери вищих жирних кислот одержують у присутності гомогенних, гетерогенних і біологічних каталізаторів [2–5]. Значна частина публікацій з дослідження нових та відомих каталізаторів присвячена вивченню їх фізико-хімічних властивостей, їх взаємозв'язку з каталітичною активністю, визначенню технологічних показників естерифікації і трансестерифікації, побудові кінетичних моделей реакції та оптимізації за нею технологічного процесу.

Зокрема, естерифікацію пальмітинової кислоти ізопропанолом досліджено в стаціонарних умовах із використанням гомогенних (*n*-толуенсульфонова кислота) і гетерогенних (етаноат цинку, нанесений із застосуванням золь-гель-техніки на силікагель) за температури 373–443 К, молярного надлишку спирту кратного 1–5, завантаження каталізатора – 1–5 г кат·дм<sup>-3</sup> і початкового вмісту води 0–15 об. %. Для опису кінетики гомогенно-каталітичної реакції автори використали рівняння швидкості простої рівноважної реакції (перший порядок за кожним із реагентів), а для гетерогенно-каталітичної – модель Ленгмюра Хіншелвуда Хаугена Ватсона. Показано, що результати розрахунку за кожною з моделей адекватно описують процес естерифікації [6].

Високі конверсії (~90%) та селективність (90–97%) утворення алкілових (C<sub>6</sub>–C<sub>9</sub>) естерів левулінової кислоти отримані з використанням каталізатора – сульфату заліза (III) [7]. Вказано, що в реакційному середовищі каталізатор знаходиться в розчинній формі, проте легко регенерується адсорбцією на діоксиді кремнію.

Використання SnCl<sub>2</sub> як каталізатора естерифікації насичених і ненасичених ВЖК етанолом має суттєві переваги порівняно з мінеральними кислотами через його меншу корозійну активність та відсутність стадії нейтралізації реакційної суміші. Авторами встановлений перший порядок як за концентрацією каталізатора, так і олеїнової кислоти. Енергія активації реакції, каталізованої SnCl<sub>2</sub> має близьке значення до енергії активації реакції в присутності H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [8].

Практичний інтерес для реалізації реакції естерифікації вищих жирних кислот становить використання оксидів металів – гетерогенних каталізаторів, які також виявляють високу активність у процесах трансестерифікації олій нижчими аліфатичними спиртами [9].

Взаємодію лауринової, стеаринової та олеїнової кислоти з етанолом з використанням монтморилоніту K10 як каталізатора досліджено в роботі [10]. Визначено вплив довжини ланцюга і ненасиченості кислоти, температури, мольного співвідношення реагентів і вмісту каталізатора на

кінетику реакції. Кінетичні дані, отримані для всіх кислот, використовували для регулювання кінетичних параметрів процесу. Встановлено, що завдяки високій активності в реакції естерифікації вільних жирних кислот, монтморилоніт K10 є каталізатором, придатним для отримання біодизелю із сировини з високим вмістом вільних жирних кислот.

Для каталізу естерифікації дистиляту жирної кислоти пальмової олії використано мезопористий наноккомпозит CuO-ZnO, одержаний гідротермальним методом у присутності поліетиленгліколю як диспергатора та D-глюкози як матриці і додатково функціоналізований бензенсульфоною кислотою [11]. Авторами показано, що максимальна активність каталізатора досягається за атомного співвідношення Cu/Zn = 1,0 і зменшується зі зменшенням вмісту Cu в системі.

У статті [12] наведені результати дослідження кінетики естерифікації жирних кислот (олеїнової кислоти етанолом) у присутності гетерогенного модифікованого цирконієвого каталізатора в реакторі з перемішуванням періодичної дії. Експериментальні дані інтерпретували за допомогою квазігомогенної кінетичної моделі другого порядку і отримали хорошу узгодженість між експериментальними даними та моделлю.

Квазігомогенна кінетична модель також ефективно описує естерифікацію олеїнової кислоти етанолом у присутності сульфованої катіонообмінної смоли [13].

### Мета роботи

Метою роботи було дослідження кінетичних закономірностей естерифікації олеїнової кислоти в присутності оксидів цинку, нікелю (II), міді (II), заліза (II) у стаціонарних умовах та перевірка адекватності кінетичної моделі в технологічному процесі одержання бутилолеату.

### Виклад основного матеріалу

У дослідженнях використовували олеїнову кислоту (ОлК) марки «ч», бутан-1-ол (БС) марки «ч.д.а» (спирт додатково дистилювали), дрібнодисперсні оксиди цинку, нікелю (II), заліза (II) і міді (II) – усі марки «х.ч.», пропан-2-ол марки «х.ч.».

Кінетичні закономірності реакції між олеїновою кислотою та бутан-1-олом досліджено в стаціонарних умовах за температури 373–388 К, 7,6–8,0-разового мольного надлишку спирту та вмісту каталізатора 0,25 мас. % від маси суміші реагентів. Реакційна установка складалася з реактора циліндричної форми, оснащеного кожухом для подачі теплоносія з термостата, термопарою, шліфом для під'єднання зворотного холодильника і пристроєм для відбору проб. Точність регулювання температури реакції становила ± 0,1 К. Каталізатор додавали до суміші реагентів після досягнення температури

реакції, яка була нижчою за температуру кипіння бутан-1-олу. Середовище перемішували магнітною мішалкою зі швидкістю приблизно 500 об/хв. Через певні проміжки часу з реактора відбирали пробу реакційної суміші для визначення в ній концентрації олеїнової кислоти

Реакційна установка для дослідження реакції в нестационарній системі складалася з термостійкої круглодонної колби, насадки Діна-Страка (АОКВ-10), холодильника і термометрів, якими контролювали температуру теплоносія та реакційного середовища. Через 360 хв після досягнення початкової температури реакції 373 К процес зупиняли, зважували вміст колби і пастки та визначали кислотне число реакційної суміші.

Контроль за перебігом реакції здійснювали титруванням відібраних проб реакційної суміші 0,1 молярним розчином гідроксиду натрію в присутності 0,1 %-го спиртового розчину фенолфталеїну після розчинення проби в 5 см<sup>3</sup> пропан-2-олу.

За результатами досліджень та аналізів розраховували такі показники:

- поточну концентрацію олеїнової кислоти;
- енергію активації та передекспоненційний множник;
- кислотне число продуктів реакції;
- конверсію олеїнової кислоти.

Концентрацію олеїнової кислоти в реакційній суміші розраховували за формулою:

$$C(\text{ОлК}) = \frac{C(\text{NaOH})(V_p - V_k)\rho_{pc}}{m}, \quad (1)$$

де  $C(\text{NaOH})$  – молярна концентрація розчину NaOH, моль/дм<sup>3</sup>;  $V_p$  і  $V_k$  – об'єм розчину NaOH, витрачений на титрування проби реакційної суміші та контрольної проби, см<sup>3</sup>;  $\rho_{pc}$  – середня густина реакційної суміші, г/см<sup>3</sup>;  $m$  – маса наважки проби, г.

Ефективні константи швидкості реакції естерифікації розраховували лінеаризацією кінетичних кривих витрати олеїнової кислоти на початковій стадії реакції за високого надлишку спирту в координатах  $\ln C = f(\tau)$ . Визначене значення ефективної константи швидкості реакції є добутком істинної константи, концентрації спирту та каталізатора.

Значення ефективної енергії активації та передекспоненційного множника розраховували із залежності  $\ln k = f(T^{-1})$ .

Кислотне число продуктів реакції розраховували за формулою:

$$KЧ = \frac{C(\text{NaOH})(V_p - V_k)M(\text{KOH})}{m}, \quad (2)$$

де  $M(\text{KOH})$  – молярна маса гідроксиду калію, г/моль.

Конверсію олеїнової кислоти (у %) розраховували за формулою:

$$K(\text{ОлК}) = \frac{KЧ_0 \cdot m_0 - KЧ \cdot m}{KЧ_0 \cdot m_0} 100, \quad (3)$$

де  $KЧ_0$  і  $KЧ$  – початкове і кінцеве значення кислотного числа реакційної суміші, мг KOH/г;  $m_0$  і  $m$  – маса суміші ОлК і бутан-1-олу та продуктів реакції в реакторі після її завершення, відповідно, г.

Також кондуктометром ELWRO N5721M визначали електропровідність реакційних розчинів.

Як видно з рис. 1, досліджені оксиди металів виявляють різну каталітичну активність за температури 383 К. Найактивнішим з них виявився оксид цинку, а всі інші забезпечують приблизно однакову швидкість перетворення олеїнової кислоти та бутан-1-олу.

Відтак, для двох каталізаторів (ZnO і NiO) досліджено вплив температури на перебіг реакції в стаціонарних умовах та розраховані її кінетичні характеристики. У дослідженні було використано великий надлишок спирту, тому прийнято нульовий порядок реакції за спиртом. Оскільки олеїнова кислота є слабкою кислотою і за умов реакції її дисоціація відбувається мінімально, то за нею прийнято перший порядок реакції.

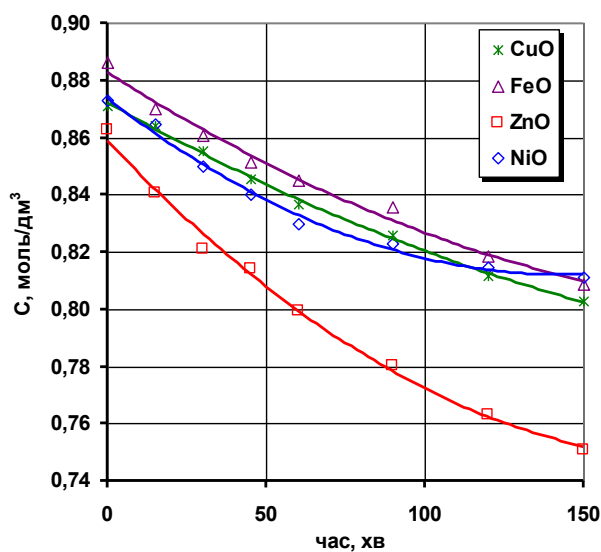


Рис. 1 – Кінетичні криві витрати ОлК у реакції з бутан-1-олом у присутності каталізаторів – оксидів металів. Температура – 383 К, БС : ОлК – 7,6 : 1 (мол.), вміст каталізатора – 0,25 мас. %

Перший порядок за кислотою підтверджує лінеаризацією кінетичних кривих її витрати, наведених на рис. 2, у координатах  $\ln(\text{ОлК}) - \tau$  (рис. 3).

За кутом нахилу цих кривих розраховані ефективні константи швидкості реакції естерифікації (які включають концентрацію активних центрів гетерогенного каталізатора).



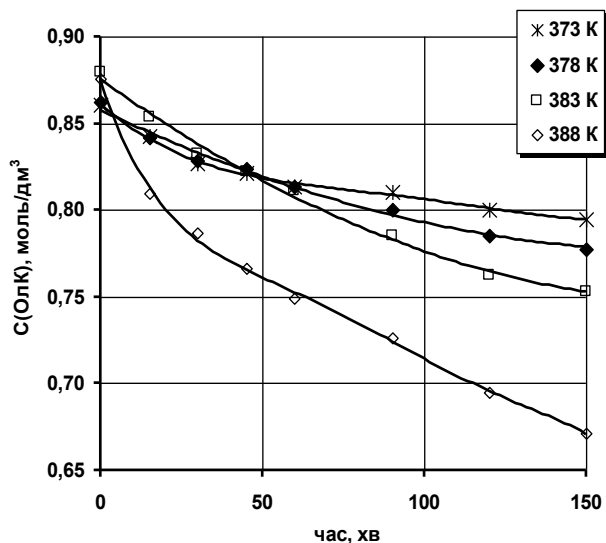


Рис. 2 – Кінетичні криві витрати олеїнової кислоти за умови каталізу її естерифікації бутан-1-олом у присутності оксиду цинку для різної температури реакції. Вміст ZnO – 0.25 мас. %, БС : ОлК – 7,6:1 (мол.)

За залежністю  $\ln(k) = f(T^{-1})$ , наведеною на рис. 4, розраховані значення ефективної енергії активації реакції між олеїновою кислотою та бутан-1-олом: для каталізу NiO – 97,6 кДж/моль, і для каталізу ZnO – 136,4 кДж/моль, а також передекспонційні множники  $k_0 = 4,1 \cdot 10^7$  та  $1,4 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ , відповідно.

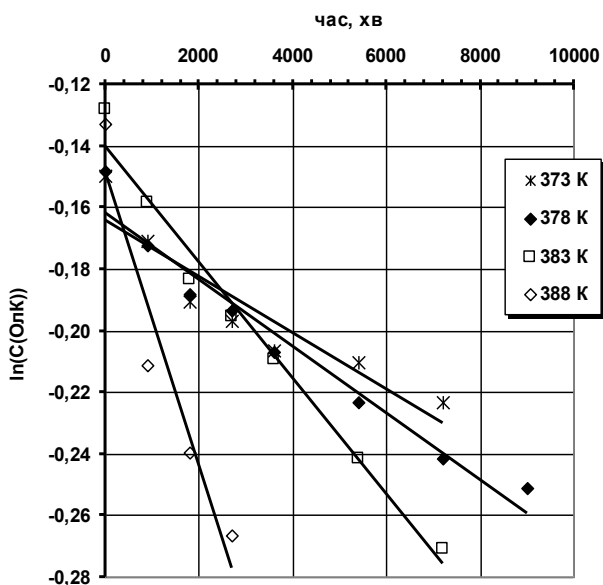


Рис. 3 – Напівлогарифмічні анаморфози кінетичних кривих витрати олеїнової кислоти за умови каталізу її естерифікації бутан-1-олом у присутності оксиду цинку для різної температури реакції. Вміст ZnO – 0.25 мас. %, БС : ОлК – 7,6:1 (мол.)

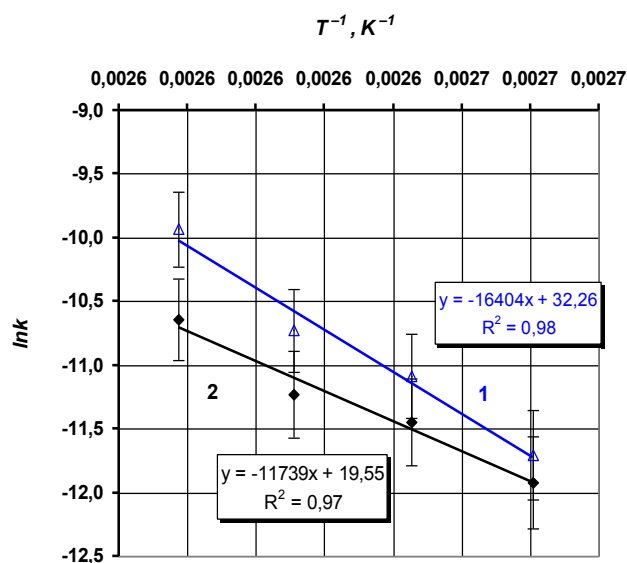


Рис. 4 – Ареніусівська залежність для реакції між олеїновою кислотою та бутан-1-олом у присутності каталізаторів ZnO (1) і NiO (2) (планки похибок – 3 %)

Закономірності естерифікації олеїнової кислоти у присутності оксиду цинку та оксиду нікелю (II) у відкритій системі досліджено за початкового мольного співвідношення олеїнова кислота : бутан-1-ол – 1 : 3,6 та вмісту каталізатора 0,25 мас. % від маси рідких компонентів реакційної суміші. Температура реакції, за рахунок відгонки частини спирту в насадку Діна-Старка та зі зменшенням його концентрації в реакційній суміші внаслідок участі в реакції, збільшувалася з 373 до 404–407 К. Загалом середня температура реакції становила 399–401 К.

За час реакції 360 хв у присутності оксиду цинку досягнуто конверсії олеїнової кислоти 75,9 %, а у присутності оксиду нікелю (II) – 47,5 %.

### Обговорення результатів

Під час кінетичних досліджень помічено, що оксиди цинку і міді (II) реагують з олеїновою кислотою. Це проявляється в перетворенні дрібнодисперсного ZnO на аморфну масу значно більшого об'єму та в зміні кольору реакційного розчину на смарагдовий у присутності CuO. Видимих змін зовнішнього вигляду реакційної суміші та каталізаторів – оксидів нікелю (II) і заліза (II) не виявлено (рис. 5).

Аналогічні явища спостерігалися під час естерифікації олеїнової кислоти бутан-1-олом у присутності оксидів цинку і нікелю (II) у відкритій системі. Зокрема, після завершення реакції за температури 413 К у присутності оксиду цинку реакційна суміш є гомогенною і лише після охолодження до 303–313 К з неї викристалізовується



олеат цинку. Оксид нікелю (II) під час реакції естерифікації олеїнової кислоти бутан-1-олом помітних змін не зазнає.



Рис. 5 – Зразки проб, відібрані з реакційної суміші для визначення концентрації олеїнової кислоти під час кінетичних досліджень її естерифікації бутан-1-олом у присутності оксидів металів

Очевидно, що використання ZnO як каталізатора веде до його незворотного перетворення на олеат цинку. Водночас, втрата каталітичної активності не спостерігається. Відповідно, можна стверджувати, що естерифікація олеїнової кислоти в присутності оксидів цинку та міді (II) є одночасно гетерогенно- і гомогенно-каталітичною реакцією.

За допомогою кондуктометрії встановлено, що електрична провідність реакційної суміші збільшується порівняно з модельною сумішшю реагентів (0,036 мСм/м) у 6,1 (до 0,22 мСм/м) і в 1,6 рази (до 0,058 мСм/м) за умови каталізу реакції оксидом міді (II) та оксидом цинку, відповідно. Це підтверджує зроблене вище припущення про взаємодію цих оксидів з олеїновою кислотою. Необхідно зауважити також, що по завершенні реакції нестационарних умов і відділення каталізаторів (ZnO і NiO) електрична провідність продуктів реакції становила всього 0,01 мСм/м, що пояснюється відсутністю води у продуктах реакції, на відміну від реакційної суміші, одержаної в кінетичних дослідженнях.

Незважаючи на вказаний вище аспект одночасної присутності в реакційній суміші оксиду і солі цинку, визначені кінетичні характеристики реакції можна ефективно використати для моделювання технологічного процесу естерифікації

олеїнової кислоти бутан-1-олом у нестационарних умовах.

Зокрема, для бімолекулярної реакції естерифікації у присутності каталізатора оксиду металу для квазігомогенної моделі рівняння швидкості має вигляд:

$$r = kC(\text{ОлК})C(\text{БС}), \quad (4)$$

де  $k$  – ефективна константа швидкості реакції, яка включає в себе кількість (масову частку 0,25 мас. %) каталізатора,  $\text{дм}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $C(\text{ОлК})$  і  $C(\text{БС})$  – поточна мольна концентрація олеїнової кислоти та бутан-1-олу, відповідно,  $\text{моль/дм}^3$ .

Інтегрування цього рівняння дає вираз:

$$k\tau = \frac{1}{C(\text{ОлК})_0 - C(\text{БС})_0} \ln \frac{C(\text{БС})_0}{C(\text{ОлК})_0} \frac{C(\text{ОлК})_0 - C(\text{ОлК})}{C(\text{БС})_0 - C(\text{ОлК})}, \quad (5)$$

де  $C(\text{ОлК})_0$  і  $C(\text{БС})_0$  – початкова мольна концентрація олеїнової кислоти та бутан-1-олу, відповідно,  $\text{моль/дм}^3$ ;  $\tau$  – час, за який реагує олеїнова кислота концентрацією  $C(\text{ОлК})$ , с.

За значенням середньої температури реакції 399 К для каталізу оксидом цинку і 401 К для каталізу оксидом нікелю (II) розраховані константи швидкості реакції, які становили  $2,4 \cdot 10^{-5}$  і  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ дм}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Також враховано зміну вмісту каталізатора і те, що початкові концентрації реагентів встановлюються після відгонки частини бутан-1-олу в насадку Діна-Старка (за час  $\sim 20$  хв) і становлять 4,17 і 1,96  $\text{моль/дм}^3$  для бутан-1-олу і олеїнової кислоти, відповідно. За розрахованими константами і цими значеннями початкових концентрацій реагентів розрахована концентрація прореагованої олеїнової кислоти на час 360 хв. Ця концентрація становила для каталізу оксидом цинку – 1,576  $\text{моль/дм}^3$ , а для каталізу оксидом нікелю (II) – 1,074  $\text{моль/дм}^3$ . За цими значеннями концентрацій розраховані теоретичні значення конверсії олеїнової кислоти, які становлять 80,0 і 53,7 % для каталізу оксидом цинку та нікелю (II), відповідно.

Одержані розрахункові значення лише на 4,1 і 6,2 % перевищують реальні значення конверсії олеїнової кислоти, досягнутої в присутності ZnO і NiO, що свідчить про коректність розрахунків енергії активації та передекспоненційного множника за кінетичними кривими витрати олеїнової кислоти, вказує на адекватність кінетичної моделі та її придатність для опису технологічного процесу одержання бутилолеату естерифікацією олеїнової кислоти бутан-1-олом у присутності оксидів металів.

Якщо зважати, що оксиди металів виявляють достатньо високу активність у реакції трансестерифікації тригліцеридів нижчими аліфатичними спиртами [14–15], то очевидно, що високий вміст вільних жирних кислот (ВЖК) в олії впливатиме на стан каталізатора і його відділення від

продуктів реакції. Очевидно, що цей чинник певною мірою обмежує використання ряду оксидів металів як каталізаторів вказаної реакції або ставить вимогу до мінімального вмісту ВЖК в олії.

### Висновки

Встановлено, що з-поміж оксидів цинку, нікелю (II), заліза (II) та міді (II), ZnO виявляє найвищу активність як каталізатор реакції естерифікації олеїнової кислоти бутан-1-олом.

Встановлено, що кінетичне рівняння реакції естерифікації має перший порядок за олеїновою кислотою. За квазігомогенною кінетичною моделлю розраховані константи швидкості, а за їх логарифмічною залежністю від температури – значення ефективної енергії активації реакції між олеїновою кислотою та бутан-1-олом: для каталізу NiO – 97,6 кДж/моль, і для каталізу ZnO – 136,4 кДж/моль, а також передекспоненційні множники  $k_0 = 4,1 \cdot 10^7$  та  $1,4 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$  (для вмісту 0,25 % каталізатора від маси реагентів), відповідно.

Визначені кінетичні характеристики процесу використані для розрахунку теоретичного значення конверсії олеїнової кислоти під час реакції в нестационарних умовах, яке добре корелює з визначеним експериментально значенням. Ці ж дані можна використати для орієнтовного розрахунку конверсії вільних жирних кислот, присутніх в олії під час трансестерифікації її тригліцеридів бутан-1-олом у присутності вказаних каталізаторів.

Одержані результати вказують на те, що використання оксидів металів, насамперед цинку та міді (II) як каталізаторів процесу трансестерифікації рослинних олій нижчими аліфатичними спиртами можливе за умови дуже низького вмісту вищих жирних кислот у рослинній сировині.

### Список літератури

1. Зубенко С. О., Патриляк Л. К. Способи одержання бутілових естерів жирних кислот: сьогодення та перспективи. *Каталіз та нафтохімія*. 2020. № 29. С. 11–22. doi: 10.15407/kataliz2020.29.011.
2. Lilja J., Murzin D., Salmi T., Aumo J., Arvela P.M., Sundell M. Esterification of different acids over heterogeneous and homogeneous catalysts and correlation with the Taft equation. *J. Mol. Catalysis A: Chemical*. 2002. № 182. P. 555–563. doi: 10.1016/S1381-1169(01)00495-2.
3. Caetano C. S., Guerreiro L., Fonseca I. M., Ramos A. M., Vital J., Castanheiro J. E. Esterification of fatty acids to biodiesel over polymers with sulfonic acid groups. *Appl. Catalysis A: General*. 2009. № 359. P. 41–46. doi: 10.1016/j.apcata.2009.02.028.
4. Satyarthi J. K., Srinivas D., Ratnasamy P. Influence of Surface Hydrophobicity on the Esterification of Fatty Acids over Solid Catalysts. *Energy Fuels*. 2010. № 24. P. 2154–2161. doi:10.1021/ef1001452.
5. Laudani C. G., Habulin M., Knez Ž., Della Porta G., Reverchon E. Lipase-catalyzed synthesis of long-chain fatty acid esters in a bench-scale packed bed bioreactor. *14th*

*European Meeting on Supercritical Fluids (18-21 May 2014, Marseille France)* URL: <https://www.yumpu.com/en/www.isasf.net> (дата звернення 03.11.2020).

6. Aafaqi R., Mohamed A. R., Bhatia S. J. Kinetics of esterification of palmitic acid with isopropanol using p-toluene sulfonic acid and zinc ethanoate supported over silica gel as catalysts. *Chem. Technol. Biotechnol.* 2004. № 79. 1127–1134. doi: 10.1002/jctb.1102.
7. Martins F. P., Rodrigues F. A., da Silva M. J. Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>-Catalyzed Levulinic Acid Esterification: Production of Fuel Bioadditives. *Energies*. 2018. № 11. P. 1263–1274. doi:10.3390/en11051263.
8. Cardoso A. L., Neves S. C. G., da Silva M. J. Kinetic Study of Alcoholysis of the Fatty Acids Catalyzed by Tin Chloride(II): An Alternative Catalyst for Biodiesel Production. *Energy&Fuels*. 2009. № 23. P. 1718–1722. doi: 10.1021/ef800639h.
9. Мельник Ю. Р., Старчевський Р. О., Мельник С. Р. Трансестерифікація тригліцеридів етанолом у присутності оксидів металів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2019. № 5 (1330). С. 132–138. doi:10.20998/2413-4295.2019.05.17.
10. Kanda L. R. S., Corazza M. L., Zatta L., Wypych F. Kinetics evaluation of the ethyl esterification of long chain fatty acids using commercial montmorillonite K10 as catalyst. *Fuel*. 2017. № 193. P. 265–274. doi: 10.1016/j.fuel.2016.12.055.
11. Soltani S., Rashid U., Nehdi I. A., Al-Resayes S. I. Esterification of Palm Fatty Acid Distillate Using a Sulfonated Mesoporous CuO- ZnO Mixed Metal Oxide Catalyst. *Chem. Eng. & Technol.* 2017. № 40 (10). P. 1931–1933. doi: 10.1002/ceat.201700138.
12. Zubir M. I., Chin S. Y. Kinetics of Modified Zirconia-catalyzed Heterogeneous Esterification Reaction for Biodiesel Production. *J. Appl. Sc.* 2010. № 10 (21). P. 2584–2589. doi: 10.3923/jas.2010.2584.2589.
13. Jiang Y., Lu J., Sun K., Ma L., Ding J. Esterification of oleic acid with ethanol catalyzed by sulfonated cation exchange resin: Experimental and kinetic studies. *Energy Convers. Manag.* 2013. № 76. P. 980–985. doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.011.
14. Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S. Transesterification of sunflower oil triglycerides by 1-butanol in the presence of d-metal oxides. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 2019. № 4. P. 95–100. doi: 10.32434/0321-4095-2019-125-4-95-100.
15. Melnyk Y., Starchevskiy R., Melnyk S. Technological Aspects of Vegetable Oils Transesterification with Ethanol in the Presence of Metal Oxides. *Kemija u Industriji*. 2020. № 69 (7–8). P. 365–370. doi: 10.15255/KUI.2019.059.

### References (transliterated)

1. Zubenko S. O., Patrylak L. K. Sposoby oterzhannia butylovykh esteriv zhyrnykh kyslot: sohodennta ta perspektyvy [Methods of obtaining butyl esters of fatty acids: present and prospects]. *Kataliz i naftokhimiya [Catalysis and petrochemistry]*, 2020, Vol. 29, pp. 11–22, doi: 10.15407/kataliz2020.29.011.
2. Lilja J., Murzin D., Salmi T., Aumo J., Arvela P.M., Sundell M. Esterification of different acids over heterogeneous and homogeneous catalysts and correlation with the Taft

- equation. *J. Mol. Catalysis A: Chemical*, 2002, Vol. 182, pp. 555–563, doi: 10.1016/S1381-1169(01)00495-2.
3. Caetano C. S., Guerreiro L., Fonseca I. M., Ramos A. M., Vital J., Castanheiro J. E. Esterification of fatty acids to biodiesel over polymers with sulfonic acid groups. *Appl. Catalysis A: General*, 2009, Vol. 359, pp. 41–46, doi: 10.1016/j.apcata.2009.02.028
  4. Satyarthi J. K., Srinivas D., Ratnasamy P. Influence of Surface Hydrophobicity on the Esterification of Fatty Acids over Solid Catalysts. *Energy Fuels*, 2010, Vol. 24, pp. 2154–2161, doi:10.1021/ef1001452.
  5. Laudani C. G., Habulin M., Knez Ž., Della Porta G., Reverchon E. Lipase-catalyzed synthesis of long-chain fatty acid esters in a bench-scale packed bed bioreactor. *14th European Meeting on Supercritical Fluids (18-21 May 2014, Marseille France)*. Available at: <https://www.yumpu.com/en/www.isasf.net> (accessed 03.11.2020)
  6. Aafaqi R., Mohamed A. R., Bhatia S. J. Kinetics of esterification of palmitic acid with isopropanol using p-toluene sulfonic acid and zinc ethanoate supported over silica gel as catalysts. *Chem. Technol. Biotechnol.*, 2004, Vol. 79, pp. 1127–1134, doi: 10.1002/jctb.1102.
  7. Martins F. P., Rodrigues F. A., da Silva M. J. Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>-Catalyzed Levulinic Acid Esterification: Production of Fuel Bioadditives. *Energies*, 2018, Vol. 11, pp. 1263–1274, doi:10.3390/en11051263.
  8. Cardoso A. L., Neves S. C. G., da Silva M. J. Kinetic Study of Alcoholysis of the Fatty Acids Catalyzed by Tin Chloride(II): An Alternative Catalyst for Biodiesel Production. *Energy & Fuels*, 2009, Vol. 23, pp. 1718–1722. doi: 10.1021/ef800639h.
  9. Melnyk Yu. R., Starchevskiy R. O., Melnyk S. R. Transesterifikatsiia tryhlitserydiv etanolom u prysutnosti oksydiv metaliv [Transesterification of triglycerides with ethanol in the presence of metal oxides]. *Bulletin of the National technical university "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, Vol. 5, no. 1330, pp. 132–138, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.17.
  10. Kanda L. R. S., Corazza M. L., Zatta L., Wypych F. Kinetics evaluation of the ethyl esterification of long chain fatty acids using commercial montmorillonite K10 as catalyst. *Fuel*, 2017, Vol. 193, pp. 265–274, doi: 10.1016/j.fuel.2016.12.055.
  11. Soltani S., Rashid U., Nehdi I. A., Al-Resayes S. I. Esterification of Palm Fatty Acid Distillate Using a Sulfonated Mesoporous CuO- ZnO Mixed Metal Oxide Catalyst. *Chem. Eng. & Technol.*, 2017, Vol. 40, no. 10, pp. 1931–193, doi: 10.1002/ceat.201700138.
  12. Zubir M. I., Chin S. Y. Kinetics of Modified Zirconia-catalyzed Heterogeneous Esterification Reaction for Biodiesel Production. *J. Appl. Sc.*, 2010, Vol. 10, no. 21, pp. 2584–2589, doi: 10.3923/jas.2010.2584.2589.
  13. Jiang Y., Lu J., Sun K., Ma L., Ding J. Esterification of oleic acid with ethanol catalyzed by sulfonated cation exchange resin: Experimental and kinetic studies. *Energy Convers. Manag.*, 2013, Vol. 76, pp. 980–985, doi: 10.1016/j.enconman.2013.08.011.
  14. Melnyk Yu., Starchevskiy R., Melnyk S. Transesterification of sunflower oil triglycerides by 1-butanol in the presence of d-metal oxides. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii [Issues of Chemistry and Chemical Technology]*, 2019, Vol. 4, pp. 95–100, doi: 10.32434/0321-4095-2019-125-4-95-100.
  15. Melnyk Y., Starchevskiy R., Melnyk S. Technological Aspects of Vegetable Oils Transesterification with Ethanol in the Presence of Metal Oxides. *Kemija u Industriji*, 2020, Vol. 69, no. 7–8, pp. 365–370, doi: 10.15255/KUI.2019.059.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Мельник Степан Романович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри технології органічних продуктів; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0629-9723>; e-mail: [stepan.r.melnyk@lpnu.ua](mailto:stepan.r.melnyk@lpnu.ua).

**Stepan Melnyk** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, Professor at the Department of Organic Products Technology; ORCID: 0000-0002-0629-9723, e-mail: [stepan.r.melnyk@lpnu.ua](mailto:stepan.r.melnyk@lpnu.ua).

**Старчевський Роман Олегович** – аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», студент кафедри технології органічних продуктів; ORCID: 0000-0002-7458-4585; e-mail: [star\\_roma@ukr.net](mailto:star_roma@ukr.net).

**Roman Starchevskiy** – Lviv Polytechnic National University, Postgraduate student at the Department of Technology of Organic Materials; ORCID: 0000-0002-7458-4585; e-mail: [star\\_roma@ukr.net](mailto:star_roma@ukr.net).

**Мельник Юрій Романович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри технології органічних продуктів; ORCID: 0000-0003-0109-5526; e-mail: [yurii.r.melnyk@lpnu.ua](mailto:yurii.r.melnyk@lpnu.ua).

**Yurii Melnyk** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Organic Products Technology; ORCID: 0000-0003-0109-5526; e-mail: [yurii.r.melnyk@lpnu.ua](mailto:yurii.r.melnyk@lpnu.ua).

**Оржеховська Ольга Едуардівна** – Національний університет «Львівська політехніка», студентка кафедри технології органічних продуктів; ORCID: 0000-0001-9921-1972; e-mail: [Olha.Orzhekhovska.mxt.2019@lpnu.ua](mailto:Olha.Orzhekhovska.mxt.2019@lpnu.ua).

**Olha Orzhekhovska** – Lviv Polytechnic National University, Student at the Department of Organic Products Technology; ORCID: 0000-0001-9921-1972; e-mail: [Olha.Orzhekhovska.mxt.2019@lpnu.ua](mailto:Olha.Orzhekhovska.mxt.2019@lpnu.ua).

**Магорівська Галина Ярославівна** – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри хімічної технології силікатів; ORCID: 0000-0002-3609-7970; e-mail: [halyna.y.mahorivska@lpnu.ua](mailto:halyna.y.mahorivska@lpnu.ua).

**Halyna Mahorivska** – Candidate of Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor at the Department of Chemical Technology of Silicate Materials; ORCID: 0000-0002-3609-7970; e-mail: [halyna.y.mahorivska@lpnu.ua](mailto:halyna.y.mahorivska@lpnu.ua).

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Мельник С. Р., Старчевський Р. О., Мельник Ю. Р., Оржеховська О. С., Магорівська Г. Я. Кінетичні та технологічні аспекти одержання бутілолеату в присутності оксидів металів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 114–121. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.17.

*Please cite this article as:*

Melnyk S., Starchevskyy R., Melnyk Y., Orzhekhovska O., Mahorivska H. Kinetic and technological aspects of butyloleate production in the presence of metal oxides. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 114-121, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.17.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Мельник С. Р., Старчевский Р. О., Мельник Ю. Р., Оржеховская О. С., Магоривская Г. Я. Кинетические и технологические аспекты получения бутилолеата в присутствии оксидов металлов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 114-121. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.17.

**АННОТАЦИЯ** Исследовано кинетические закономерности реакции между олеиновой кислотой и бутан-1-олом в присутствии оксидов цинка, никеля (II), железа (II) и меди (II) в стационарных условиях. Установлено, что при температуре 383 К самую высокую каталитическую активность проявляет оксид цинка, а скорость реакции этерификации в присутствии других оксидов металлов ниже и примерно одинакова. Показано, что при содержании 0,25 масс. % гетерогенного катализатора в реакционной смеси и 7,6–8,0-кратного мольного избытка спирта кинетическое уравнение реакции этерификации имеет первый порядок по олеиновой кислоте. Для квазигомогенной кинетической модели реакции при условии ее катализа оксидами цинка и никеля (II) определены эффективные константы скорости, по которым рассчитана энергия активации и предэкспонентный множитель. Показано, что квазигомогенная модель реакции между олеиновой кислотой и бутан-1-олом удовлетворительно описывает процесс этерификации в нестационарных условиях. Рассчитанные по кинетическим показателям процесса и определенные экспериментально значения конверсии олеиновой кислоты в процессе ее этерификации в присутствии оксида цинка и оксида никеля (II) при условии отгонки воды составляли 80,0 и 75,9 и 53,7 и 47,5% за 360 мин реакции, соответственно. Полученные данные позволяют рассчитывать продолжительность реакции получения бутилолеата, необходимую для достижения заданной конверсии олеиновой кислоты при соответствующих температурных условиях. Установлено, что оксиды цинка и меди (II) во время реакции взаимодействуют с олеиновой кислотой с образованием соответствующих солей. С помощью кондуктометрии установлено, что электрическая проводимость реакционной смеси увеличивается по сравнению с модельной смесью реагентов в 6,1 и 1,6 раза при условии катализа реакции оксидом меди (II) и оксидом цинка, соответственно. Сделано предположение, что в присутствии этих оксидов одновременно происходит гетерогенно- и гомогенно-каталитическая этерификация олеиновой кислоты бутан-1-олом. Указано, что одним из лимитирующих факторов применения оксидов металлов в качестве катализаторов переэтерификации триглицеридов низшими алифатическими спиртами является содержание свободных жирных кислот в растительном масле.

**Ключевые слова:** бутилолеат; олеиновая кислота; бутан-1-ол; этерификация; катализатор; оксиды металлов; кинетика

Надійшла (received) 22.11.2020

УДК 621.928.37

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.18

## ОЧИЩЕННЯ НАФТОПРОМИСЛОВИХ СТИЧНИХ ВОД

В. Ф. МОЇСЄВ<sup>1</sup>, Є. В. МАНОЙЛО<sup>1</sup>, О. О. ЛЯПОЩЕНКО<sup>2</sup>, СЕЙФ ХУССЕЙН<sup>2</sup><sup>1</sup> каф. ХТПЕ, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА<sup>2</sup> каф. процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв, СДУ, Суми, УКРАЇНА

e-mail: bublikova1@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Розроблена установка для очищення нафтопромислових стічних вод. У статті представлено рішення гідроциклонних установок для очищення нафтопромислових стічних вод на основі застосування закручених потоків. За рахунок відцентрових сил в гідроциклоні та турбулентного руху води руйнуються бронюючі оболонки крапель нафти, вони збільшуються, збільшується монодисперсність. Розглянуті сили, що діють у гідроциклоні, наведено оцінку ефективності дії відцентрових сил при відділенні твердих частинок. Дано основні параметри і вимоги до якості нафтопромислових стічних вод, які рекомендовані для розрахунку при розробці нових і вдосконаленні існуючих установок очищення нафтопромислових стічних вод для заводнення нафтових пластів, що дозволяє збільшити нафтовиддачу пластів в 1,5-2 рази. Вдосконалення систем промислової підготовки продукції свердловин включає розробку нових ефективних технічних засобів, у тому числі гідроциклонів, так і вдосконалення традиційно використовуваного обладнання. Гідроциклон може бути використаний в якості основного елементу в системі очищення стічних вод, при умовах, що дотримується режим, при якому не відбувається передиспергування у воді нафти та в нафті води. Таким чином, в апараті реалізується механізм поділу легкої (нафта, газ) і більш важкої фракції (осад, вода, нафта). Для захисту навколишнього середовища від забруднення пластовими водами необхідно проведення наступних заходів: забезпечення глибокого очищення промислових стічних вод; широке застосування антикорозійних покриттів і хімічних реагентів для захисту від корозії нафтовидобувного обладнання; повне використання одержуваних на промислах стічних вод у системі підтримання пластового тиску; контроль за станом поверхневих вод та якістю стічних вод, що використовуються в системі підтримання пластового тиску.

**Ключові слова:** нафтопромислові стічні води; гідроциклон; поділ; закручений потік; відстійник; коалесценція; очищення води; гідродинамічна обробка; фільтр

## OILFIELD WASTEWATER TREATMENT

V. MOISEEV<sup>1</sup>, E. MANOILLO<sup>1</sup>, A. LIPOSHCHENKO<sup>2</sup>, SEIF HOUSSEIN<sup>2</sup><sup>1</sup> Department of Chemical techniques and industrial ecology, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE<sup>2</sup> Department of Processes and Equipment for Chemical and Petroleum Processing Industries, SDU, Sumy, UKRAINE

**ABSTRACT** Installations for the treatment of oilfield wastewater have been developed. The article presents a solution of hydrocyclone installations for the treatment of oilfield wastewater based on the use of swirling flows. Due to the centrifugal forces in the hydrocyclone and the turbulent movement of water, the armor shells of oil droplets are destroyed, they are enlarged, and the monodispersity increases. The forces acting in the hydrocyclone are considered, and the efficiency of centrifugal forces in separating solid particles is estimated. The main parameters and requirements for the quality of oilfield wastewater are given, recommended for calculation in the development of new and improving existing oilfield wastewater treatment plants for oil reservoir flooding, which allows increasing oil recovery by 1.5-2 times. Improving the systems of field preparation of products includes both the development of new effective technical means, including hydrocyclones, and the improvement of traditionally used equipment. Hydrocyclone can be used as the main element in the wastewater treatment system, provided that the regime is observed, in which there is no over-dispersion of the remaining oil in the water, (water in oil). Thus, the device implements a mechanism for separating light (oil, gas) and heavier fractions (sediment, water, oil). To protect the environment from reservoir water pollution, the following measures are necessary: ensuring deep treatment of oilfield wastewater; extensive use of anti-corrosion coatings and chemical reagents for corrosion protection of oil-producing equipment; full use of waste water obtained in the field in the reservoir pressure maintenance system; monitoring of the state of surface water and the quality of waste water used in the reservoir pressure maintenance system.

**Keywords:** oilfield wastewater; hydrocyclone; separation; vortex stream; settling tank; coalescence; water treatment; hydrodynamic treatment; filter

## Вступ

Нафтогазовидобувна галузь є однією з найбільш екологічно небезпечних галузей надрокористування і завдає величезної шкоди навколишньому середовищу. Вона відрізняється

великою енергоємністю і значним забрудненням територій. Охорона надр передбачає здійснення комплексу заходів щодо запобігання втрат нафти і газу, забезпечення безпеки населення, раціонального використання поверхневих і підземних вод, запобігання їх забруднення.

Нафтопродукти і пластові води є основними забруднювачами навколишнього середовища у даній сфері. Винесені на поверхню пластові води змінюють мікрорельєф території і є джерелами вторинного засолення ґрунтів навколо свердловин. Вони володіють високою геохімічною активністю та токсичністю. В їх складі присутні нафтові вуглеводні, різноманітні солі і механічні домішки, які, поглинаються ґрунтом і, потрапляючи у ґрунтові води, різко змінюють їх хімічні і фізико-хімічні властивості – сольовий склад, лужність, реакцію ґрунтових суспензій, ґрунтово-поглинальний комплекс, порушують водно-повітряний режим і вуглецево-азотний баланс.

Екологічні наслідки при розлитті нафти, завжди мають важко прогнозований характер, так як при забрудненні нафтою і нафтопродуктами неможливо врахувати всі екологічні наслідки, які порушують всі природні процеси і взаємозв'язки в довкіллі.

#### Мета роботи

Метою роботи є збільшення ефективності очищення нафтопромислових стічних вод шляхом їх гідродинамічної обробки у завихрених потоках, та доведенням до потрібних технологічних характеристик при закачуванні у систему підвищення тиску пластів на нафтопромислі.

#### Виклад основного матеріалу

У надрах нафтового родовища попутно з нафтою і газом присутня пластова вода. Під терміном «пластові води» (англ. Formation water; нім. Lagerstättenwasser, Flozwasser; франц. eaux de formation) розуміють підземні води, циркулюючі в пластах гірських порід.

Виходячи з [1,2] видно, що в покладах нафти і газу розподіл рідин відбувається за їх щільності. Верхню частину покладу займає вільний газ, трохи нижче залягає нафта, а самий нижній шар покладу – пластова вода, яка у своєму роді підпирає пласт нафти. У природі мінералізована пластова вода в покладах знаходиться не тільки в водній зоні, але і в інших шарах, тим самим насичуючи продуктивні шари. Іноді спостерігається надходження води в свердловини при її розробці з водоносних пластів, розташованих по всій глибині свердловини.

На нафтових родовищах у процесі видобутку нафти, добуті пластові води відокремлюються від нафти на установках підготовки нафти (УПН) і являють собою рідкі відходи із вмістом нафти. Пластові води (80 – 95 %), зливові (дощові стоки) (1 – 3 %) і виробничі стоки (4 – 15 %) утворюють нафтопромислові стічні води (НСВ). Нафта в НСВ знаходиться в розчиненому, емульсованому і вільному (плаваючому) стані. Крім нафти в НСВ містяться механічні домішки (порода, продукти

корозії, деемульгатори) і розчинені гази (азот, сірководень, метан, кисень). При очищенні НСВ видаляються механічні домішки (завислі речовини), плаваюча і емульгована нафта і речовини, застосовувані в технології видобутку нафти зі свердловини. Розчинена нафта практично не робить якого-небудь впливу на прийомні властивості нагнітальних свердловин.

Останнім часом при розробці свердловин застосовують технологію закачування видобутої води в свердловину для підтримки тиску. Більше 90 % НСВ використовується для заводнення нафтових пластів. Заводнення нафтових пластів дозволяє збільшити нафтовіддачу в 1,5 - 2 рази [3].

Існуюча в даний час на нафтопромислах схема закачування стічних вод назад в пласт з додаванням реагентів для підвищення нафтовіддачі, призводить до значної зміни хімічного складу пластових вод, що впливає на стан надр, а також створює загрозу поширення забруднення в інші водоносні горизонти.

У вирішенні цієї проблеми одним з основних завдань є очищення нафтопромислових стічних пластових вод з метою досягнення стійких характеристик природного середовища з допустимими параметрами забруднень, а також можливого вилучення з оборотних вод цінних товарних компонентів. Велика концентрація органічних компонентів дозволяє використовувати пластові води для випуску кормових добавок, харчової кухонної солі, рідини для глушіння нафтових свердловин, йоду, хлористого кальцію та інших солей і рідкісних елементів.

Застосування очищеної стічної пластової води із зниженою мінералізацією для заводнення нафтових колекторів дозволяє в ряді випадків підвищити коефіцієнт вилучення нафти. Це створює передумови для створення на нафтопромислах замкнутої системи водопостачання і веде до раціонального використання природних ресурсів (внаслідок істотного скорочення споживання води поверхневих джерел водопостачання для заводнення пластів), вирішуються проблеми ліквідації НСВ і охорони навколишнього середовища від забруднень на промислах.

Нафтопромислові стічні води мають суспензійно-емульсійний характер. Вони містять значну кількість розчинених мінеральних солей, які можуть переходити в нафтову фазу. Як показують дослідження по мінеральному складу пластових вод, що в основному серед розчинених речовин поширені хлорид натрію, кальцію і магнію. Залежно від родовищ у пластовій воді присутні солі лужних і лужноземельних металів, зокрема йодисті і бромисті, сульфід заліза, натрію, кальцію та інші.

В якості дисперсних фаз стічні води можуть служити крапельки нафти і твердої суспензії, що виносяться з пласта. Добута з надр пластова вода, що знаходиться в емульгованому стані, практично не

містить будь-які забруднення (домішки не перевищують 10 – 20 мг/л).

Після розшарування емульсії на нафту і воду, вміст диспергованих частинок в відокремлюваної воді сильно зростає – нафти до 4 – 5 г/л, механічних домішок до 0,2 г/л. Таке збільшення диспергованих частинок пов'язано зі зниженням міжфазного натягу. У свою чергу, до зниження натягу призводить введення деемульгатора і пептизація шламу з внутрішньої поверхні трубопроводів [1].

Газовміст пластової води не перевищує 1,5 – 2,0 мг/т, зазвичай вона дорівнює 0,2 – 0,5 мг/т. В якості водорозчинних газів в пластовій воді в основному представлені метан, азот, вуглекислий газ, гомологи метану, гелій і аргон [4]. Розчинність газів також залежить від мінералізації, тобто розчинність газів зменшується при збільшенні мінералізації пластової води. Розчинність газів у нафті набагато більше, ніж розчинність газів у воді. Стан бронюючих оболонок на краплях нафти зумовлює методи їх руйнування і очищення НСВ.

Більш чітко всі фізичні властивості визначають по глибинним пробам. При відсутності глибинних проб, дані фізичні властивості визначають за довідниками і графіками.

При добуванні нафти з пласта змінюються властивості і параметри флюїдів, якість пластових вод, стан нафтопромислового обладнання. Після установок підготовки нафти (УПН) нафтопромислові стічні води попередньо очищаються від нафти і механічних домішок і закачуються в нафтовий пласт через нагнітальні свердловини, не порушуючи його приймаючої здатності.

Досі найбільшою проблемою в нафтовій і газовій промисловості залишається очищення пластових вод і НСВ. Їх утилізація є актуальною проблемою для всіх виробничих об'єктів нафтової і газової промисловості. Актуальність пов'язана з тим, що пластові води як агресивний компонент викликає інтенсивну корозію обладнання, супроводжується розливом пластових вод, викликаючи засолення ґрунтового покриву і ґрунтових вод при просочуванні й загибель рослинності. В результаті розливу пластових вод, попутно надходить і деякий обсяг нафти, який може обчислюватися десятками тонн на рік. Пластові води у своєму складі мають багато токсичних компонентів. Так, пластові води крім нафти у своєму складі мають токсичні поліароматичні вуглеводні. Найбільшою активністю серед яких мають бенз(а)пірен та дибензантрацен. Очищення і повторне використання пластових вод є найбільш поширеним методом утилізації пластової води.

Складність очищення НСВ на промислах полягає в тому, що механічні домішки і нафта існують разом, а не окремо. Всі механічні домішки змочені нафтою. На кордоні розділу фаз нафта – вода утворюється висококонцентрована грубодисперсна емульсія проміжного шару, в якій концентрація механічних домішок у багато разів перевищує їх

концентрацію в нафті чи воді. При руйнуванні цього шару в залежності від щільності коагулюючого комплексу у відстійнику буде відбуватися його осадження, або спливання. При закачуванні очищеної води в нагнітальні свердловини домішки, що залишаються у воді після очищення, являють собою емульговані плівки зруйнованих структур проміжних шарів.

Таким чином, НСВ полідисперсні, багатофазні та являють собою суспензійно-емульсійну систему.

Під очищенням стічних пластових вод розуміють обробку пластових вод з метою руйнування або видалення з них шкідливих речовин. У свою чергу, процес очищення стічних мінералізованих пластових вод від забруднюючих речовин являє собою дуже складне виробництво і серйозну проблему. В даному виробництві, як і в будь-якому іншому виробництві, є сировина (мінералізовані пластові води) та готова продукція (очищена вода).

Очищення НСВ здійснюють за допомогою механічних і гідромеханічних процесів: перемішуванням, відстоюванням, центрифугуванням і фільтрацією з метою руйнування бронюючих оболонок на краплях нафти, коалесценції крапель нафти і виведення частково сконцентрованої нафтової фази і осаду (механічні домішки) [5,6]. Для очищення пластових стічних вод у нафтовій промисловості застосовують метод відстою в резервуарах-відстійниках. Але даний спосіб часто не забезпечує необхідну ступінь очищення. Тому в якості обладнання також використовують резервуари з мішалками, відстійники, сепаратори, центрифуги, гідроциклони, краплеутворювачі, флотатори і фільтри.

Для успішного очищення НСВ, тобто для швидкого зниження агрегативної і кінетичної стійкості крапель нафти, що містяться в НСВ, розробляються установки і апарати очищення НСВ, які збільшують ефект, глибину і швидкість процесу очищення [7,8]. За рахунок цього відбувається швидке укрупнення крапель нафти, тобто процес коалесценції – полідисперсна система переходить в монодисперсну.

Ці процеси здійснюються найбільш повно й інтенсивно при попередній турбулізації потоку НСВ в порожнині різних гідродинамічних краплеутворювачів з подальшим відстоюванням. Високий і стабільний ефект очищення НСВ може бути досягнуто за рахунок попередньої гідродинамічної обробки її в закрученому потоці.

З метою ефективного руйнування, зменшення полідисперсності і збільшення монодисперсності крапель нафти створюються установки очищення НСВ за рахунок гідродинамічної обробки стічних вод в закручених потоках. Одним з перспективних напрямів вдосконалення систем очищення води є застосування в них гідроциклонів [5-8].



В гідроциклонах і відстійних камерах відбувається руйнування бронюючих оболонок, роздроблення і коалесценція крапель нафти, тобто збільшення монодисперсності. За рахунок гідродинамічної обробки НСВ у закрученому потоці досягається високий і стабільний ефект очищення НСВ у всіх областях закрученого потоку, тобто розширюється течія закрутки, забезпечується правильне загасання закрученого потоку. Енергія потоку використовується з метою найбільш ефективної реалізації механізму руйнування нафтових емульсій.

Відстійники, побудовані для очищення стічних вод, як правило, не забезпечують необхідного ступеня очищення, не дивлячись на відносно великі габарити (довжина до 7,2 м). Застосування безнапірних гідроциклонів ( $D = 2,2$  м), також не призводить до бажаних результатів. Безнапірні гідроциклони [9] успішно застосовуються для очищення водних об'єктів від плаваючого шару нафти у відкритих морських акваторіях, у портах, на поверхні річок, озер поява плаваючого шару нафти як правило пов'язана з аваріями на морському і річковому транспорті, на нафтопромислах і нафтопродуктопроводах, для ліквідації наслідків викидів нафти у водойми і збору нафтопродуктів з метою їх подальшого використання.

Але слід зазначити, що безнапірні гідроциклони призначені тільки для відділення з води нафти, що знаходиться у вигляді плівки або шару на вільній поверхні, тобто вони здійснюють функції збору нафти з поверхні. Виділення з води нафтових крапель в емульгованому стані проводять в циліндричних протитечієвих гідроциклонах малого діаметра [8].

Забруднена вода, надходячи в гідроциклон через тангенціальний вхід, отримує обертовий рух. Під дією виникаючої при цьому відцентрової сили, що перевищує силу тяжіння в сотні і тисячі разів, частинки домішок відкидаються в зовнішній низхідний потік, який рухається по спіралі до нижнього розвантажувального отвору.

Використання гідроциклонів в якості ступенів для очищення стічних вод може значно підвищити компактність всієї очисної схеми і полегшити її експлуатацію. Для очищення води від нафти і зважених речовин у залежності від необхідного ступеня очищення застосовуються такі апарати [10]:

- 1) на першій стадії очищення — гідроциклони і відстійники;
- 2) на другій стадії — гідрофільні та гідрофобні фільтри;
- 3) для більш якісного очищення води — коалесцируючі фільтри.

Механізм поділу трифазної системи в гідроциклоні полягає в наступному: тверді частинки під дією відцентрової сили переміщається до стінок гідроциклоні і по гвинтовій траєкторії переміщуються вниз до нижнього впускного отвору, через який виводяться з гідроциклоні. Ефективність

очищення води від нафти залежить від конструкції гідроциклоні і змінюється від 84 до 89 %. Рекомендовані параметри гідроциклоні [5]: діаметр циліндричної частини — 75 мм; діаметр впускного отвору — 15 мм; діаметр осевого отвору патрубку — 10 мм; діаметр зливного патрубка — 20 мм; кут конусності — 10 °С; тиск рідини на вході — 0,17 МПа.

Продуктивність гідроциклоні визначається за формулою

$$Q = 28,5 d_0 d \sqrt{P/\alpha^{0.1}} \quad (1)$$

де  $d_0$ ,  $d$  — діаметри живлячої і зливного патрубків;  $P$  — тиск на вході в гідроциклоні;  $\alpha$  — кут конусності.

Гідроциклони порівняно з гравітаційними відстійниками працюють з більшим гідравлічним навантаженням, проте продуктивність їх невелика. Тому їх об'єднують в батареї або застосовують мультициклони.

Розділення рідких суспензій осадженням механічних домішок у відцентровому полі проводять у тих випадках, коли різниця щільності твердої і рідкої фаз позитивна ( $\Delta\rho = \rho_m - \rho > 0$ ). Якщо складна система містить крім рідкої (вода) і твердої фаз легкі плаваючі компоненти (нафта, масла, бульбашки газу), то для такої системи різниця густин рідкої і легкої фаз також позитивна ( $\Delta\rho = \rho - \rho_n > 0$ ). Відцентрова сила створюється або в результаті тангенціального введення суспензії (гідроциклони, вихрові сепаратори), або при розкручуванні рідини, що знаходиться в обертовому роторі (центрифуги).

На частку твердої фази, що знаходиться у відцентровому полі на поточному (вибраний) радіусі  $r$ , крім гравітаційної сили  $F_g = m_m g$  і архімедової (доцентрової)

$$F_a = m \omega^2 r = \frac{\pi d^3}{6} \rho_m \omega^2 r, \quad (2)$$

діє відцентрова сила

$$F_{a_1} = m_m \omega^2 r = \frac{\pi d^3}{6} \rho_m \omega^2 r, \quad (3)$$

Тут  $m_m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_m$  — маса твердої частинки;  $m$  — маса рідини;  $d$  — діаметр твердих частинок;  $\omega$  — кутова швидкість обертання частинки.

Причому  $\omega^2 r = a_r$  — радіальне прискорення в полі відцентрових сил.

Гравітаційна сила значно менше, ніж відцентрова, що видно зі співвідношення

$$K_p = \frac{F_{a_1}}{F_g} = \frac{m V_\tau^2}{r} : m g = \frac{V_\tau^2}{g r} = \frac{4(\pi m)^2 r}{g}, \quad (4)$$

де  $K_p$  – фактор поділу, що характеризує відношення відцентрової сили до гравітаційної;  $V_r = 2\pi nr$  – окружна (тангенціальна) швидкість частинки на радіусі обертання  $r$ ;  $n$  – частота обертання (кількість оборотів) частинки за 1 секунду навколо осі обертання.

При розрахунках систем відцентрового очищення гравітаційною силою зазвичай нехтують. Якщо прийняти, що осаджувана частка обертається з тією ж кутовою швидкістю, що і рідина, то силою Коріоліса (поворотною силою інерції) також можна знехтувати. Опір руху частинки надає сила опору, величина якої визначається (як і при гравітаційному очищенні) за законом Стокса (при ламінарному осадженні,  $Re \leq 1,6$ ;  $Ar \leq 6 \cdot 10^4$ )

$$F_i = 3\pi d\mu V_r, \quad (5)$$

або за законом Ньютона - Реттингера (при турбулентному осадженні,  $Re \geq 1,6$ ;  $Ar \geq 6 \cdot 10^4$ )

$$F_i = \lambda \frac{\pi d^2}{8} V_{r(oc)}^2 \rho_p, \quad (6)$$

де  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини.

Швидкість вільного осадження частинки в рідині знаходять з виразу

$$V_{r(oc)} = \sqrt{\frac{\pi d g \Delta \rho}{6 \psi \rho}}, \quad (7)$$

При ламінарному осадженні

$$V_{r(oc)} = \frac{\rho_m d^2 \omega^2}{18\mu}, \quad (8)$$

Для турбулентного режиму

$$V_{r(oc)} = 1,75 \sqrt{\frac{d \Delta \rho}{\rho} g}, \quad (9)$$

Максимально можливу швидкість відцентрового осадження можна знайти, прийнявши рушійну силу рівній силі опору  $F_{ви} - F_a = F$  і замінивши прискорення сили тяжіння  $g$  відцентровим прискоренням  $a_r$ ,

$$V_{r(oc)} = \sqrt{\frac{\pi d \Delta \rho}{6 \frac{\pi}{8} \lambda} \omega^2 r} = \sqrt{\frac{\pi d \Delta \rho}{6 \psi \rho} \omega^2 r}, \quad (10)$$

де  $\psi = \frac{\pi}{8} \lambda$  – фактор опору руху частинки в рідині;  $\lambda$  – коефіцієнт опору.

В залежності від режиму руху рідини в апараті вираз (8) набуде вигляду:

для ламінарного режиму

$$V_{r(oc)} = \frac{d^2 \Delta \rho}{18\mu} \omega^2 r, \quad (11)$$

для перехідного режиму

$$V_{r(oc)} = 0,1355 \frac{d^{1,2} \Delta \rho^{0,78} (\omega^2 r)^{0,73}}{\rho^{0,26} r^{0,46}}, \quad (12)$$

для турбулентного режиму

$$V_{r(oc)} = \sqrt{\frac{d \Delta \rho}{\rho} \omega^2 r}. \quad (13)$$

Якщо в рідині містяться легкі компоненти, то під дією архімедової сили вони будуть переміщатися (виштовхувати в радіальному напрямку у протилежний бік – до осі обертання. Швидкість переміщення легких частинок до осі обертання  $V_{r(сум)}$  розраховується також за рівняннями (7 - 8) з заміною  $\Delta \rho$  на  $\Delta \rho$ .

При розрахунку гідроциклону, призначеного для відділення твердих частинок, повинна бути виконана оцінка ефективності дії відцентрових сил.

Сили, що діють на частинку, що знаходиться в потоці рідини – відцентрова сила  $F_{ви}$ , яка відкидає частку до периферії, і сила опору середовища, або сила внутрішнього тертя  $F_{тр}$ , від тертя радіального потоку рідини, що діє в напрямку апарату.

Відцентрова сила, виражена через тангенціальну швидкість  $V_r$ , запишеться

$$F_{ви} = m_m \frac{V_r^2}{r}, \quad (14)$$

Сила внутрішнього тертя визначається за формулою Стокса у вигляді (5).

Напрямок руху частинок у апараті визначається співвідношенням  $F_{ви}$  і  $F_{тр}$ . Якщо відцентрова сила буде більше сили опору середовища, то частинки в апараті будуть обертатися, поки не зменшаться до малого розміру. У разі рівності зазначених сил частинка буде тривалий час циркулювати в апараті.

Для оцінки ефективності дії відцентрових сил використовуємо фактор розділення по силі тяжіння (4).

Фактор поділу по відцентровій силі – відношення відцентрових сил на мінімальному  $r_2$  і максимальному  $r_1$  радіусів обертання частинок потоку:

$$K_{ви} = \frac{F_{ви2}}{F_{ви1}} = \frac{m V_{r2}^2}{m V_{r1}^2} \cdot \frac{r_1}{r_2} = \frac{r_1 \cdot V_{r2}^2}{r_2 \cdot V_{r1}^2}. \quad (15)$$

Мультигідроциклон може бути використаний в якості основного елементу в системі очищення стічних вод, при умовах, що існує режим, при якому не відбувається передиспергування залишкової нафти

у воді, (в нафті води), тобто прискорення руху не перевищує величину 1000g. В апараті реалізується механізм поділу легкої (нафта, газ) і більш важкої фракцій (вода, нафта).

У використовуваних в даний час апаратах і пристроях очищення стічних вод на промисли окремо або в комбінації реалізуються два основних механізми - поділ в природному полі сили тяжіння або в полі відцентрових сил і флотаційний ефект.

Обидва механізми порівняно маловитратні, так як використовують природну енергію (потіку або взаємодії фаз), що особливо важливо в умовах великого обсягу оброблюваного середовища. Гідроциклони, дозволяють досягти достатнього ступеня очищення стічних вод для їх використання в системі підтримання пластового тиску.

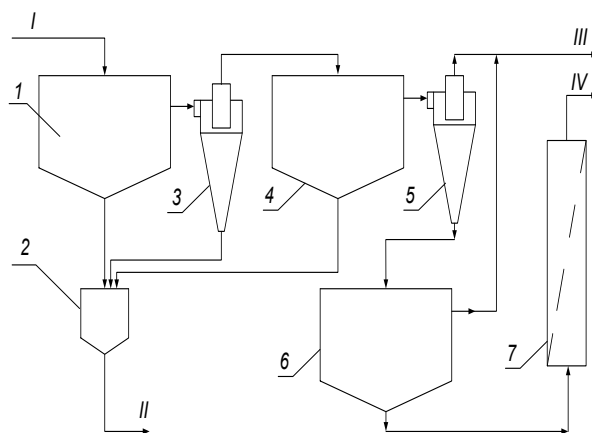
### Обговорення результатів

Розробка низькопроникних колекторів значно підвищила вимоги до якості води, використовуваної для заводнення нафтових пластів. Допустимий вміст механічних домішок становить 3 мг/дм<sup>3</sup>, а нафтопродуктів – 5 мг/дм<sup>3</sup>. [11]. Найнебезпечнішим в екологічному відношенні є зараження пластів сульфатвідновлюючими бактеріями, які виробляють сірководень, що вимагає спеціальних захисних заходів.

Необхідна глибока очистка води може бути досягнута шляхом використання багатоступеневої технології, що включає методи грубого і тонкого очищення, доочищення та знезараження. Технологічні схеми підготовки нафтопромислових вод для використання в системі підтримання пластового тиску включає наступні основні елементи: відстійники, коалесцируючі та гідрофобні фільтри, камеру дугового розряду, зернистий фільтр, електрохімічний фільтр, УФ-випромінювачі, гідрофобний фільтр [12], що говорить про велику різноманітність технічних засобів і методів. Це характеризує шляхи розвитку систем очищення, які включають розробку і впровадження нових технологій і обладнання, у тому числі конструкцій мультігідроциклонів для тонкого і грубого очищення. Мультігідроциклони дозволяють досягти глибокого ступеня очищення, і їх використання є перспективним як у системі промислової очищення стічних вод, так і в системах попереднього скидання води.

Вони мають широкі можливості використання у системі підготовки продукції свердловин в якості апаратів, інтенсифікуючих процес на стадіях первинного відділення нафти, газу і води, стабілізації та очищення нафти від розчинених газів і меркаптанів та очищення стічних вод, проте не можуть стати єдиним використовуваним апаратом. Тому вдосконалення систем промислової підготовки продукції свердловин включає розробку нових ефективних технічних засобів, у тому числі мультігідроциклонів, так і вдосконалення традиційно

використовуваного обладнання. Очищення нафтопромислових стічних вод з метою їх повторного використання доцільно проводити за наведеною схемою (рис. 1).



1 – резервуар-відстійник; 2 – збірник осаду; 3 – гідроциклон для відділення зв'язаних твердих частинок; 4 – тонкошаровий відстійник; 5 – гідроциклон для відділення нафти; 6 – відстійник; 7 – фільтр тонкого очищення. I – нафтопромислові стічні води; II – осад; III – нафтопродукти; IV – очищена вода у систему підтримання тиску

Рис. 1 – Схема очищення нафтопромислових стічних вод з метою їх повторного використання

Нафтопромислові стічні води надходять в приймальний резервуар (іноді в передвідстійник). Потім насосами стічні води направляються на очищення, зокрема в напірні циліндроконічні гідроциклони, у яких відбувається відділення великих (механічних) домішок зі скиданням їх в бункер. Пройшовши циліндроконічні гідроциклони, тонкошарові відстійники, стічні води надходять в циліндричні гідроциклони для очищення від нафтопродуктів. Після гідроциклонів очищена вода подається на флотатори, коалесцируючі або сорбційні фільтри. При необхідності можливе остаточне очищення води в сорбційному фільтрі до вмісту нафтопродуктів 0,05 мг/л (до рівня ГДК).

Очищена вода повертається у свердловину для підтримки пластового тиску. Чим чистіше вода, що закачується в пласт, тим більше прийомна здатність нагнітальної свердловини і тим менше необхідна кількість вод і менше витрати, пов'язані з системою підтримання пластового тиску. Загальні вимоги до води, що закачується у свердловину:

- обмежений вміст механічних домішок і сполук заліза;
- відсутність сірководню, вуглекислоти з метою запобігання корозії обладнання;
- відсутність органічних домішок (бактерій, водоростей);
- хімічна сумісність з пластовою водою.

Ступінь очищення НСВ визначається індивідуально для кожного родовища [13]. Як було викладено вище, складність полягає у відділенні від води емульгованої нафти і грубодисперсної емульсії. Вміст нафти і механічних домішок в очищеній стічній воді нафтових родовищ перевищує нормативи, які визначаються галузевими стандартами, в яких викладені вимоги до якості води, використовуваної для заводнення нафтових пластів, в залежності від властивостей пласта [14-16]. Підвищений вміст нафти і зважених речовин у воді, що закачується в пласт, призводить до неповного вилучення нафти з свердловини. Допустимий вміст механічних домішок становить 3 мг/дм<sup>3</sup>, а нафтопродуктів - 5 мг/дм<sup>3</sup>. Наявність механічних домішок є одним з основних факторів, що викликають зниження проникності привибійної зони пласта при використанні як прісних, так і пластових вод.

Сучасні індустріальні методи облаштування нафтових родовищ вимагають застосування нового обладнання з високим ефектом очищення і одиначною потужністю, герметичністю і зручним при заводському виготовленні і монтажі. Як показує техніко-економічні порівняння [7,17-19] при впровадженні циліндричних протитечієвих гідроциклонів можливо отримати суттєвий економічний ефект. При цьому величина капітальних вкладень на будівництво очисних споруд скорочується в кілька разів, а експлуатаційні витрати знижуються на 15%, покращуються санітарно-екологічні умови експлуатації установок.

Не менш важливою перевагою схеми з гідроциклонами є значна економія виробничих площ. В даному випадку площа, займана гідроциклонною установкою, в 10 разів менше площі, яка була б потрібна для розміщення резервуарів-відстійників аналогічного призначення. Останній показник часто є основним і визначальним при виборі того або іншого методу очищення стічних вод.

### Висновки

Таким чином, для захисту навколишнього середовища від забруднення пластовими водами необхідно проведення наступних заходів: забезпечення глибокого очищення промислових стічних вод; широке застосування антикорозійних покриттів і хімічних реагентів для захисту від корозії нафтовидобувного обладнання; повне використання одержуваних на промислах стічних вод у системи підтримання пластового тиску; контроль за станом поверхневих вод та якістю стічних вод, що використовуються в системі підтримання пластового тиску.

### Список літератури

1. Мордвинов А. А., Морозюк О. А., Жангабылов Р. А. *Основы нефтегазопромыслового дела: учеб. пособие*. Ухта: УГГУ, 2015. 161 с.

2. Самтанова Д. Э., Сангаджиева Л. Х. Химический состав пластовых вод и их влияние на загрязнение почвы. *Геология, география и глобальная энергия*, 2013. №3. С. 168-178.
3. Адельпин А. Б. *Интенсификация процессов гидродинамической очистки нефтесодержащих сточных вод.*: Дисс. на соискание ученой степени докт. тех. наук. СПб. 1998. 73 с.
4. Гребнев В. Д., Мартюшев Д. А., Хижняк Г. П. *Основы нефтегазопромыслового дела: учебное пособие*. Пермь: Перм. нац. иссл. полит. ун-т., 2013. 185 с.
5. Терновский И. Г., Кутепов А. М. *Гидроциклонирование*. М.: Наука, 1994. 408 с.
6. Yang Q., Wang Li., Liu Y., Li Z. Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations. *Separation and Purification Technology*, 2010. Vol. 74. № 3, P. 271-279.
7. Валеев С. И., Степанов Н. И., Иванов Н. В., Булкин В. А. Гидродинамика цилиндрических и цилиндроконических гидроциклонов с малым расходом через верхний слив. *Вестник Казанского технологического университета*. 1998. № 2. С. 56-59.
8. Верин Д. Ю., Валеев С. И., Булкин В. А. Гидродинамика цилиндроконического гидроциклона для разделения эмульсий. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т.15. № 15, С. 117-118.
9. Минигазимов Н. С., Расветалов В. А., Зайнуллин Х. Н.. *Утилизация и обезвреживание нефтесодержащих отходов*. Уфа: Экология, 1999. 299 с.
10. Бархатов В. И., Добровольский И. П. *Повышение эффективности переработки нефти и использования получаемых продуктов: монография*. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2013. 322 с.
11. Перекупка А. Г., Тарасов М. Ю., Семенов В. Н. Проектирование систем подготовки воды для закачки в низкопроницаемые пласты. *Нефтяное хозяйство*. 2002. №7. С. 31-33.
12. Назаров В. Д., Русакович А. А. Подготовка воды для заводнения нефтяных пластов. *Нефть и газ*. 2003. №5. С. 43-46
13. Kharoua N., Khezzar L., Nemouchi Z. Hydrocyclones for De-oiling Applications - A Review. *Petroleum Science and Technology*. 2010. Vol. 28. №. 7. P. 738-755. doi: 10.1080/10916460902804721.
14. Yu J., Fu J. Separation performance of an 8 mm mini-hydrocyclone and its application to the treatment of rice starch wastewater. *Separation Science and Technology*. 2019. Vol. 55. № 2. P. 313-320. doi: 10.1080/01496395.2019.1565772.
15. Baklouti L. S. Surface geochemical prospection for hydrocarbons in the oriental platform; the case of Guebiba oilfield. Sfax region. Tunisia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017. Vol. 159. P. 830-840. doi: 10.1016/j.petrol.2017.10.019.
16. Ding L., Wu Q., Zhang L. Application of Fractional Flow Theory for Analytical Modeling of Surfactant Flooding. Polymer Flooding, and Surfactant. *Polymer Flooding for Chemical Enhanced Oil Recovery. Water*. 2020. Vol. 12, № 8. P. 2195. doi: 10.3390/w12082195.
17. Vehmaanpera P., Safonov D., Kinnarinen T., Hakkinen A.. Improvement of the filtration characteristics of calcite slurry by hydrocyclone classification. *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 128. P. 133-140. doi: 10.1016/j.mineng.2018.08.042.
18. Ghnainia L., Eloussaief M., Zouari K., Abbas. C. Wastewater treatment in petroleum activities: example of "SEWAGE" unit in the BG Tunisia Hannibal plant. *Applied*

*Petrochemical Research*. 2016. Vol. 6. № 2. P. 155-162. doi: 10.1007/s13203-015-0143-9.

19. Liu Z. Facile method for the hydrophobic modification of filterpaper for applications in water-oil separation. *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 352. P. 313-319. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.026.

#### References (transliterated)

1. Mordvinov A. A., Morozyuk O. A., Zhangabylov R. A. *Osnovy neftegazopromyslovogo dela: ucheb. posobiye*. Ukhta: UGGU, 2015. 161 p.
2. Samtanova D. E., Sangadzhieva L. Kh. Khimicheskii sostav plastovykh vod i ikh vliyaniye na zagryazneniye pochvy. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, 2013, №3, pp. 168-178.
3. Adelypin A. B. *Intensifikatsiya protsessov gidrodinamicheskoy ochistki neftesoderzhashchikh stochnykh vod.*: Diss. na soiskaniye uchenoy stepeni dokt. tekhn. nauk. SPb, 1998. 73 p.
4. Grebnev V. D., Martuyushev D. A., Khizhnyak G. P. *Osnovy neftegazopromyslovogo dela: uchebnoye posobiye*. Perm': Perm. nats. issl. polit. un-t., 2013. 185 p.
5. Ternovskiy I. G., Kutepov A. M. *Gidrotsiklonirovaniye*. M., Hauka, 1994. 408 p.
6. Yang Q., Wang Li., Liu Y., Li Z. Solid/liquid separation performance of hydrocyclones with different cone combinations. *Separation and Purification Technology*, 2010, Vol. 74, № 3, pp. 271-279.
7. Valeyev S. I., Stepanov N. I., Ivanov N. V., Bulkin V. A. Gidrodinamika tsilindricheskikh i tsilindronicheskikh gidrotsiklonov s malym raskhodom cherez verkhniy sliv. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 1998, № 2, pp. 56-59.
8. Verin D. Y., Valeyev S. I., Bulkin V. A. Gidrodinamika tsilindronicheskogo gidrotsyklona dlya razdeleniya emul'siy. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, Vol. 15, № 15, pp. 117-118.
9. Minigazimov N. S., Rasvetalov V. A., Zaynullin X. N. *Utilizatsiya i obezvezhivaniye neftesoderzhashchikh otkhodov*. Ufa: Ekologiya, 1999. 299 pp.
10. Barkhatov V. I., Dobrovol'skiy I. P. *Povysheniye effektivnosti pererabotki nefiti i ispol'zovaniya poluchayemykh produktov: monografiya*. Chelyabinsk, Izd-vo Chelyab. gos. un-ta, 2013. 322 p.
11. Perekupka A. G., Tarasov M. Y., Semenov V. N. Proyektirovaniye sistem podgotovki vody dlya zakachki v nizkopronitsayemye plasty. *Neftyanoye khozyaystvo*, 2002, №7, pp. 31-33.
12. Nazarov V. D., Rusakovich A. A. Podgotovka vody dlya zavodneniya neftyanykh plastov. *Neft' i gaz*, 2003, №5, pp. 43-46.
13. Kharoua N., Khezzer L., Nemouchi Z. Hydrocyclones for De-oiling Applications - A Review. *Petroleum Science and Technology*, 2010, Vol. 28, № 7, pp. 738-755, doi: 10.1080/10916460902804721.
14. Yu J., Fu J. Separation performance of an 8 mm mini-hydrocyclone and its application to the treatment of rice starch wastewater. *Separation Science and Technology*, 2019, Vol. 55, № 2, pp. 313-320, doi: 10.1080/01496395.2019.1565772.
15. Baklouti L. S. Surface geochemical prospecting for hydrocarbons in the oriental platform; the case of Guebiba oilfield. Sfax region. Tunisia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, Vol. 159, pp. 830-840, doi: 10.1016/j.petrol.2017.10.019.
16. Ding L., Wu Q., Zhang L. Application of Fractional Flow Theory for Analytical Modeling of Surfactant Flooding. Polymer Flooding, and Surfactant. *Polymer Flooding for Chemical Enhanced Oil Recovery*. Water, 2020, Vol. 12, № 8, pp. 2195, doi: 10.3390/w12082195.
17. Vehmaanpera P., Safonov D., Kinnarinen T., Hakkinen A. Improvement of the filtration characteristics of calcite slurry by hydrocyclone classification. *Minerals Engineering*, 2018, Vol. 128, pp. 133-140.
18. Ghnainia L., Eloussaief M., Zouari K., Abbes. C. Wastewater treatment in petroleum activities: example of "SEWAGE" unit in the BG Tunisia Hannibal plant. *Applied Petrochemical Research*, 2016, Vol. 6, № 2, pp. 155-162, doi: 10.1007/s13203-015-0143-9.
19. Liu Z. Facile method for the hydrophobic modification of filterpaper for applications in water-oil separation. *Surface and Coatings Technology*, 2018, Vol. 352, pp. 313-319, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.026.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Моїсєєв Віктор Федорович** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3217-1467; e-mail: vmoiseev1209@gmail.com.

**Victor Moiseev** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Associate Professor of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3217-1467; e-mail: vmoiseev1209@gmail.com.

**Манойло Євгенія Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6538-0580; e-mail: bublikova1@gmail.com.

**Eugenia Manoilo** – Candidate of Technical Sciences, Docent of Department of "Chemical Technics and Industrial Ecology", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6538-0580; e-mail: bublikova1@gmail.com.

**Ляпощенко Олександр Олександрович** – доктор технічних наук, Сумський державний університет, доцент кафедри «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв», м. Суми, Україна; ORCID: 0000-0002-6657-7051; e-mail: o.liaposhchenko@pohnp.sumdu.edu.ua.

**Alexander Liaposhchenko** – Doctor of Technical Sciences, Sumy State University, Docent of the Department "Processes and Equipment for Chemical and Petroleum Processing Industries", Sumy, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6657-7051; e-mail: o.liaposhchenko@pohnp.sumdu.edu.ua.

**Хуссейн Сейф** – аспірант, Сумський державний університет, кафедра «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв», м. Суми, Україна; ORCID: 0000-0003-4975-4869; e-mail: housseinseif1@gmail.com.

**Houssein Seif** - aspirant, Sumy State University, Department "Processes and Equipment for Chemical and Petroleum Processing Industries", Sumy, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4975-4869; e-mail: housseinseif1@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Моїсєєв, В. Ф., Манойло Є. В., Ляпощенко О. О., Хуссейн Сейф. Очищення нафтопромислових стічних вод. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 122-130. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.18.

*Please cite this article as:*

Moiseev V., Maniilo E., Liaposhchenko A., Houssein Seif. Oilfield wastewater treatment. *Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 122-130, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.18.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Моисеев, В. Ф., Манойло Е. В., Ляпощенко А. А., Хуссейн Сейф. Очистка нефтепромысловых сточных вод. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 122-130. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.18.

**АННОТАЦІЯ** Розроблена установка для очистки нефтепромысловых сточных вод. В статье представлено решение гидроциклонных установок для очистки нефтепромысловых сточных вод на основе применения закрученных потоков. За счет центробежных сил в гидроциклоне и турбулентного движения воды разрушаются бронирующие оболочки капель нефти, они увеличиваются, увеличивается монодисперсность. Рассмотрены силы, действующие в гидроциклоне, приведена оценка эффективности действия центробежных сил при отделении твердых частиц. Даны основные параметры и требования к качеству нефтепромысловых сточных вод, которые рекомендованы для расчета при разработке новых и совершенствовании существующих установок очистки нефтепромысловых сточных вод для заводнения нефтяных пластов, что позволяет увеличить нефтеотдачу пластов в 1,5-2 раза. Совершенствование систем промышленной подготовки продукции скважин включает разработку новых эффективных технических средств, в том числе гидроциклонов, так и совершенствования традиционно используемого оборудования. Гидроциклон может быть использован в качестве основного элемента в системе очистки сточных вод, при условии, что соблюдается режим, при котором не происходит передиспергирование в воде нефти и в нефти воды. Таким образом, в аппарате реализуется механизм разделения легкой (нефть, газ) и более тяжелой фракций (осадок, вода, нефть). Для защиты окружающей среды от загрязнения пластовыми водами необходимо проведение следующие мероприятия: обеспечение глубокой очистки промышленных сточных вод; широкое применение антикоррозионных покрытий и химических реагентов для защиты от коррозии нефтедобывающего оборудования; полное использование получаемых на промыслах сточных вод в системе поддержания пластового давления; контроль за состоянием поверхностных и сточных вод, используемых в системах поддержания пластового давления.

**Ключевые слова:** нефтепромысловые сточные воды; гидроциклон; подол; закрученный поток; отстойник; коалесценция; очистка воды; гидродинамическая обработка; фильтр

Надійшла (received) 30.11.2020

УДК 621.35

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.19

## ФОРМУВАННЯ ПЛАЗМО-ЕЛЕКТРОЛІТНИХ КОБАЛЬТОВІСНИХ ПОКРИТТІВ НА ПОРШНЕВИХ СПЛАВАХ АЛЮМІНІЮ

М. Д. САХНЕНКО<sup>1</sup>, А. С. ГОРОХІВСЬКИЙ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup>кафедра РХБ захисту, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: gorohivskiy86@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** На основі проведеного огляду функціональних покриттів на поршневих сплавах алюмінію зроблено висновок щодо доцільності застосування оксидних покриттів для підвищення показників міцності й зносостійкості деталей поршневої групи двигунів внутрішнього згоряння. Показано, що синтез оксидного шару на сплавах системи Al-Si (силумінах) можна здійснювати плазмо-електролітною обробкою у лужних електролітах з додаванням солей металів-допантів, зокрема кобальту. Це дозволить одержувати покриття, які володіють активністю у процесах каталітичного горіння палива. Запропоновано формування кобальтовмісних оксидних покриттів на поршневих сплавах здійснювати методом плазмо-електролітного оксидування в електроліті складу 0,4 моль/дм<sup>3</sup> K<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 0,1 CoSO<sub>4</sub> за густини струму 3–5 А/дм<sup>2</sup> в режимі «спадаючої потужності». Встановлено, що в зазначених умовах протягом 15 хв оксидування на висококремністих сплавах AL30 і АК21 утворюється оксидний шар із вмістом до 4,7 ат. % кобальту. Наявність до 6,4 ат. % фосфору у складі синтезованого покриття сприятиме підвищенню теплостійкості оксидованої поверхні. При цьому вміст кремнію у поверхневих шарах зменшується у 4–5 разів порівняно із вихідним матеріалом. Показано, що морфологія та фазовий склад покриття змінюється з інкорпорацією допувального компоненту до його складу. Включення кобальту відбувається у вигляді термодинамічно стійкого оксиду Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (CoO·Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), який кристалізується у ґратці шпінелі, що поряд із високим ступенем розвинення поверхні є передумовою підвищення функціональних властивостей одержаних оксидних шарів. Розроблений спосіб було застосовано для нанесення кобальтовмісного покриття на поверхню поршня, що виготовлений зі сплаву AL30. Встановлено, що для одержання рівномірного оксидного шару слід дотримуватись визначених технологічних параметрів. Прогнозовано використання поршня з нанесеним кобальтовмісним оксидним покриттям дозволить знизити кількість токсичних речовин з відпрацьованими газами та годинну витрату палива, що є перспективним для внутрішньоциліндрового каталізу.

**Ключові слова:** плазмо-електролітне оксидування; поршневий сплав; силумін; AL30; АК21; кобальтовмісне оксидне покриття

## FORMATION OF PLASMA-ELECTROLYTIC COBALT-CONTAINING COATINGS ON ALUMINUM PISTON ALLOYS

М. САХНЕНКО<sup>1</sup>, А. ГОРОХІВСЬКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physical Chemistry National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup>Department of NBC protection of Military Institute of Armored Forces of National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Based on the review of functional coatings on piston alloys of aluminum, a conclusion was made on the feasibility of using oxide coatings to increase the strength and durability of parts of the piston group of internal combustion engines. It is shown that the synthesis of the oxide layer on alloys of the Al-Si system (silumins) can be carried out by plasma electrolyte treatment in alkaline electrolytes with the addition of salts of dopant metals, in particular cobalt. This will allow to obtain coatings that have activity in the processes of catalytic combustion of fuel. It is proposed to form cobalt-containing oxide coatings on piston alloys by plasma-electrolytic oxidation in the electrolyte of 0.4 mol/dm<sup>3</sup> K<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 0.1 mol/dm<sup>3</sup> CoSO<sub>4</sub> at current densities of 3–5 A/dm<sup>2</sup> in the "decreasing power" mode. It is established that under these conditions during 15 min of oxidation on high-silicon alloys AL30 and AK21 an oxide layer with a content of up to 4.7 at. % Co is formed. The presence of up to 6.4 at. % of phosphorus in the synthesized coating will increase the heat resistance of the oxidized surface. At the same time, the silicon content in the surface layers decreases 4–5 times compared to the source material. It is shown that the morphology and phase composition of the coating changes with the incorporation of the additive component into its composition. The inclusion of cobalt occurs in the form of thermodynamically stable oxide Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (CoO·Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), which crystallizes in the spinel crystal cell. This, along with a high degree of surface development is a prerequisite for improving the functional properties of the obtained oxide layers. The developed method was used for applying a cobalt-containing coating on the surface of a piston made of alloy AL30. It is established that in order to obtain a uniform oxide layer, certain technological parameters should be observed. The predicted use of a piston coated with cobalt-containing oxide coating will reduce the amount of toxic substances with exhaust gases and hourly fuel consumption, which is promising for intracylinder catalysis.

**Keywords:** plasma electrolytic oxidation; piston alloy; silumin; AL30; AK21; cobalt-containing oxide coating

### Вступ

Сплави алюмінію є розповсюдженими конструкційними матеріалами, що широко

застосовуються в будівництві, харчовій промисловості, машинобудуванні. Важливою галуззю їх використання є також автомобіле- та



двигунобудування [1], де сплави системи Al-Si (силуміни) слугують основним матеріалом для виготовлення деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), а саме їх поршневої групи [2]. Найбільш розповсюдженими поршневими сплавами є АК4-1 (двигуни 5 ТДФ та 6 ТД), АК12Д (двигун В-46), АЛ25 та АЛ30 (двигуни ЗМЗ-4905, ЗИЛ-131, ЯМЗ-236/238, КамАЗ-740), тощо.

В той же час з метою підвищення ресурсних та експлуатаційних характеристик двигуна застосовуються додаткові способи зміцнення деталей поршневої групи та підвищення їх теплостійкості [3]. Для цього використовують методи електрохімічної обробки, що дозволяють формувати на їх поверхні оксидні керамікоподібні покриття. Як приклад можна навести комерційні продукти Lokasil (Alusil) та Silumal або їх аналоги. У науковій літературі та відкритих джерелах поширюється інформація щодо керамікоподібних композитних (металоксидних) покриттів деталей поршневої групи ДВЗ, що формуються методом плазмо-електролітного оксидування (ПЕО). Прикладами таких інноваційних технологій є покриття SIA Microlat та ThermoSpray. Серед переваг застосування даних покриттів на денці поршня відзначається зниження його робочої температури, підвищення детонаційної стійкості за рахунок рівномірного нагрівання, підвищення потужності двигуна, а також зниження кількості токсичних шкідливих викидів з відпрацьованими газами. В той же час показано, що формування плазмо-електролітних покриттів на поршнях сприяє підвищенню показників зносостійкості та паливної економічності [4, 5]. Проте запропоновані технічні рішення опрацьовані для обмеженого кола поршневих силумінів, що ускладнює можливості їх застосування для широкого кола легованих сплавів.

Таким чином, дослідження щодо формування оксидних покриттів підвищеної функціональності на поршневих сплавах різного складу та структури є актуальними та перспективними.

### Мета роботи

Метою роботи є дослідження особливостей плазмо-електролітного оксидування поршневих сплавів алюмінію із різним вмістом кремнію з формуванням кобальтовмісних оксидних покриттів.

Для досягнення визначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

провести огляд існуючих технологій формування плазмо-електролітних покриттів на поршневих сплавах алюмінію;

розробити спосіб плазмо-електролітного формування кобальтовмісних покриттів на сплавах АК21 та АЛ30;

провести апробацію розробленого технологічного підходу для ПЕО натурного поршня двигуна.

### Матеріали і методи

Для досліджень були використані прямокутні зразки поршневих сплавів АК21 та АЛ30 [2], хімічний склад яких відповідає ГОСТ 1583. Формування покриттів здійснювали із електроліту складу моль/дм<sup>3</sup>: K<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> – 0.4, CoSO<sub>4</sub> – 0.1. рН електроліту 9,5. Покриття одержували методом плазмо-електролітного оксидування за густини струму 3–5 А/дм<sup>2</sup> протягом 15 хв. Для досліджень використовували лабораторну установку, яка містить електрохімічну комірку з охолодженням електроліту проточною водою та примусовим перемішуванням, стабілізоване джерело постійного струму Б5-50, робочі електроди. Як катод використовували пластину із нержавіючої сталі Х18Н10Т. Співвідношення площин аноду та катоду складало 10:1. Температуру електроліту підтримували проточним охолодженням електроліту в межах 20–25°C.

Крім модельних зразків покриття формували на денці поршня зі сплаву АЛ30, для чого було використано модифіковану лабораторну установку із джерелом струму підвищеної потужності. Режим формування покриттів відповідає наведеному вище.

Морфологію поверхні сформованих покриттів вивчали методом сканівної сканівної мікроскопії на мікроскопі ZEISS EVO 40XVP. Топографію одержаних шарів досліджували методом атомно-силової мікроскопії на мікроскопі NT-206. Хімічний склад покриттів визначали на енерго-дисперсійному спектрометрі Oxford INCA Energy 350 з програмним забезпеченням SmartSEM. Фазовий склад одержаних покриттів визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.

### Виклад основного матеріалу

Особливістю методу ПЕО є модифікування поверхні оброблюваного матеріалу під дією короткоживучих електричних розрядів у водних розчинах електролітів при високій напрузі [6]. Завдяки цьому реалізується перебіг електрохімічних та термохімічних реакцій, що призводить до формування покриттів, які складаються із оксидної матриці основного металу з інкорпорованими оксидами та переплавами електроліту [7]. Сформовані покриття мають широкий спектр функціональних властивостей [8], а зазначений спосіб їх формування є достатньо простим в реалізації та не вимагає проведення операцій з попередньої підготовки оброблюваної поверхні. При цьому методом ПЕО можна ефективно формувати рівномірні покриття на складно-профільованих та великогабаритних виробах.

Проте слід зауважити, що на даний час технології плазмо-електролітного формування покриттів достатньо детально опрацьовані для чистих вентильних металів, зокрема алюмінію. ПЕО легованих сплавів, в т.ч. поршневих силумінів через

неоднорідність фазового складу, наявність інтерметалідів та включень кремнію перебігають з ускладненнями, що проявляється у нерівномірності утвореного покриття та його відшаруванні через низьку адгезію [9–11]. Для нівелювання означених негативних впливів необхідно здійснювати підбір складу робочого електроліту та режиму ПЕО. Було показано, що ефективно ПЕО матеріалів даного типу може здійснюватись в електролітах на основі дифосфату калію та застосуванні режиму «спадаючої потужності» [12]. Це забезпечує видалення кремнію із поверхневого шару оброблюваного матеріалу та формування рівномірного покриття із високою адгезією. Введення до складу базового електроліту солей металів-допантів, зокрема перехідних металів, а саме – кобальту, дозволяє одержувати покриття із каталітичними властивостями, що буде сприятливо для реалізації внутрішньоциліндрового каталізу ДВЗ.

### Обговорення результатів

Плазмо-електролітним оксидуванням зразків поршневих силумінів АЛ30 та АК21 на їх поверхні одержано оксидні кобальтовмісні  $Al | Al_2O_3 \cdot CoO_x$  покриття. Аналіз формувальних залежностей  $U-t$  (рис. 1) дозволяє зробити висновок, що ПЕО означених матеріалів перебігає за класичним механізмом із розділенням процесу обробки на характеристичні області відповідно до наявних модельних уявлень [6, 7].

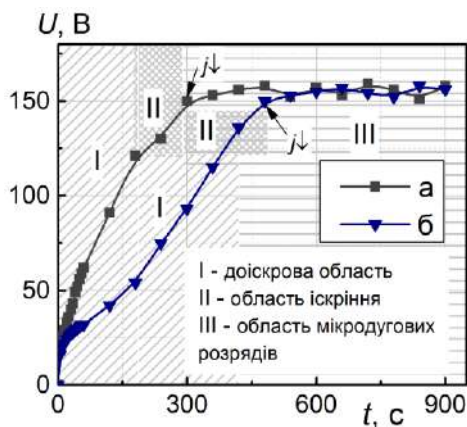


Рис. 1 – Формувальні залежності  $U-t$  плазмо-електролітного оксидування в електроліті  $0,4 K_4P_2O_7$ ,  $0,1 CoSO_4$  сплавів алюмінію: а – АЛ30, б – АК21.

Охарактеризувати зазначені області можна за показниками напруги ПЕО (табл. 1).

Початковий етап анодування з інтенсивним газовиділенням та стрімким зростанням напруги (доіскрова область) змінюється областю іскріння при досягненні  $U_i = 120-135$  В, в якій на оброблюваному зразку з'являється множина дрібних іскор, що стохастично переміщуються по поверхні.

Таблиця 1 – Параметри напруги під час ПЕО поршневих сплавів алюмінію

| Сплав Al | Напруга, В |          |         |
|----------|------------|----------|---------|
|          | $U_i$      | $U_{мд}$ | $U_{ф}$ |
| АЛ30     | 120–125    | 145–150  | 150–155 |
| АК21     | 130–135    | 145–150  | 150–155 |

Поступово іскри укрупнюються, час їх горіння збільшується, і процес переходить в область мікродугових розрядів ( $U_{мд} = 145-150$  В), що візуалізується вигином залежності  $U-t$  та практично незмінним значенням  $U$ . Даний режим оксидування при незначних осциляціях напруги в межах та  $U_{ф} = 150-155$  В є оптимальним для формування оксидного шару, оскільки забезпечує перебіг електрохімічних та термохімічних реакцій протягом достатньо тривалого часу. Під час ПЕО досліджуваних зразків протягом 15 хв перехід процесу оксидування в область дугових розрядів, що характеризується їх великою потужністю, руйнуванням утвореного оксидного шару, та різким падінням напруги, не спостерігалось.

З аналізу ділянок одержаних залежностей в кожній із характеристичних областей дозволяє оцінити кінетичні закономірності процесу оксидування. Враховуючи те, що кристали кремнію у складі досліджуваних сплавів екранують оброблювану поверхню, кількісні параметри процесу обробки будуть залежати від його вмісту. Так, кут нахилу  $U-t$ -залежності для сплаву АК21 із вмістом Si на рівні 20–22 мас.% є меншим ніж для сплаву АЛ30, що містить 11–13 мас.% Si. Тобто для виходу на режим іскріння сплаву із вищим його вмістом необхідно більше часу 6 хв для АК21 проти 2,5 хв для АЛ30, що пов'язано із етапом гомогенізації їх поверхні. Також  $U_i$  для сплаву із вищим вмістом основного легувального елементу є на 5 В більшою.

З урахуванням попередніх досліджень [12] було доведено ефективність застосування режиму «спадаючої потужності» для обробки силумінів. Тому зниження густини струму до  $j_2 = 3$  А/дм<sup>2</sup> після досягнення напруги іскріння ( $U_i$ ) для обох сплавів порівняно із початковою густиною струму ( $j_1 = 5$  А/дм<sup>2</sup>) сприяло переходу ПЕО у мікродуговий режим та формування покриття протягом 15 хв без переходу ПЕО у дуговий режим. Напруга мікродугового режиму та робоча напруга формування при використанні означеного підходу є однаковими. Втім, враховуючи різний час виходу на мікродуговий режим (різниця складає до 3 хв), можна очікувати меншу товщину утвореного оксидного покриття, а відтак і менший вміст кобальту у його складі.

Відоображенням трансформацій оброблюваної поверхні під час ПЕО є зміна морфології поверхні оксидованого матеріалу [13]. Інкorporація кобальту до синтезованого оксидного шару відбувається у вигляді синьо-фіолетових шароподібних вкраплень в місцях горіння мікродугових розрядів, що переміщуються поверхнею зразка. Встановлено, що

при ПЕО сплаву АЛ30 горіння розрядів відбувається інтенсивно по всій оброблюваній поверхні. Тому сформоване покриття є вельми рівномірним, що підтверджується даними СЕМ-аналізу (рис. 2 а). Для сплаву АК21 горіння розрядів відбувається лише на певних ділянках поверхні, але розряди є більш потужними та тривалими в часі, що ймовірно пов'язано із більшим вмістом Si. Тому за вказаний інтервал часу сформований оксидний шар (рис. 2 б) є нерівномірним. На ньому можна виділити ділянки зі сферодісними та мозаїчними утвореннями, а також, імовірно, окисдовану поверхню, що не містить допувального компоненту.

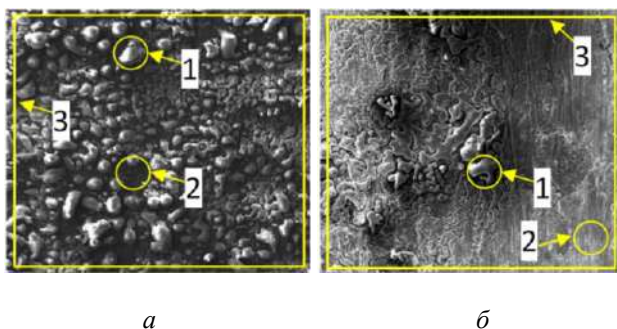


Рис. 2 – Морфологія поверхневих шарів плазмо-електролітичних покриттів, сформованих протягом 15 хв на сплавах алюмінію: а – АЛ30, б – АК21. Збільшення  $\times 1000$ .

Таким чином для аналізу елементного складу сформованих покриттів (табл. 3) на одержаних мікрофотографіях (рис. 2) були виділені ділянки різної морфології: виступ (1) та упадина (2) покриття, а також усереднений вміст (3) на дослідженій поверхні.

Таблиця 2 – Склад кобальтовмісних покриттів (відповідно до рис. 2)

| Елемент | Сплав Al |       |       |       |       |       |
|---------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         | АЛ30     |       |       | АК21  |       |       |
|         | 1        | 2     | 3     | 1     | 2     | 3     |
| Al      | 28,01    | 31,23 | 28,96 | 25,19 | 35,72 | 38,01 |
| O       | 59,90    | 62,91 | 59,73 | 62,74 | 56,53 | 51,03 |
| P       | 5,43     | 3,23  | 5,54  | 6,41  | 2,54  | 4,29  |
| Si      | 1,99     | 1,95  | 2,78  | 1,96  | 5,21  | 5,46  |
| Co      | 4,65     | 0,69  | 2,99  | 3,71  | 0     | 1,22  |

За результатами аналізу елементного складу сформованих покриттів встановлено, що оксидне покриття на сплаві АЛ30 містить більшу кількість допувального компоненту (Co) як в середньому по поверхні (ділянка 3) до 3,0 ат.%, так і на кожній із досліджених ділянок. Вищий вміст Co на виступах покриття (ділянка 1) до 4,7 ат.% підтверджує припущення про його інкорпорацію за рахунок перебігу термохімічних реакцій в місцях горіння

розрядів. Позитивним є те, що в упадинах покриття (ділянка 2) також встановлено його включення до 0,7 ат.%. Це свідчить про те, що оксидування відбувається по всій поверхні зразка. Для сплаву АК21 вміст кобальту по поверхні є у 2 рази нижчим у порівнянні із АЛ30, причому покриття є нерівномірним не лише за морфологією, а й за елементним складом. І якщо на виступі покриття (ділянка 1) вміст кобальту сягає до 3,7 ат.%, на упадинах покриття (ділянка 2) його вміст дорівнює 0.

Окремим параметром контролю є вміст кремнію в синтезованому оксидному покритті. Для обох сплавів його вміст знижується у порівнянні із вихідним матеріалом у 4–5 разів, що підтверджує доцільність використання електроліту даного типу для гомогенізації поверхні силумінів. Виявлення фосфору у складі поверхневих шарів також доводить факт інкорпорації компонентів електроліту у синтезований оксидний шар. Наявність зазначених елементів у складі покриттів є сприятливим для теплозахисних властивостей одержаного оксидного шару. Факторами впливу на елементний склад синтезованих покриттів в електроліті даного складу будуть густина струму та час ПЕО [13].

Прогнозовано одержані плазмо-електролітні кобальтовмісні покриття будуть мати високий ступінь розвинення поверхні [12]. Це підтверджується результатами досліджень топографії поверхневих шарів методом атомно-силової мікроскопії (рис. 3).

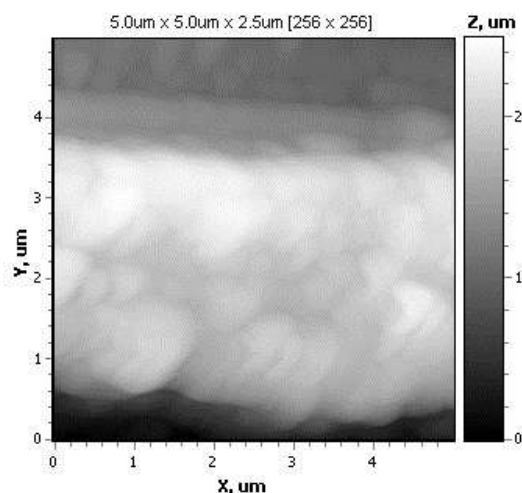


Рис. 3 – Топографія поверхні кобальтовмісного покриття на сплаві АЛ30, сформованого протягом 15 хв. Площа сканування  $5 \times 5$  мкм.

Область для дослідження була обрана на поверхні покриття, що позиціонується як виступ покриття (ділянка 1). Встановлено, що сформований кобальтовмісний шар складається з агломератів сфероподібних зерен, розмір яких коливається в межах декілька сот нанометрів, що утворюють більш розвинені структури.

Інкорпорація кобальту до складу оксидного шару підтверджується і результатами фазового

аналізу (рис. 4). Встановлено, що сформоване кобальтовмісне покриття на поршневих силумінах АЛ30 та АК21 містить значну кількість фаз термодинамічно стійкого оксиду кобальту  $\text{Co}_3\text{O}_4$  ( $\text{CoO} \cdot \text{Co}_2\text{O}_3$ ), який кристалізується у ґратці шпінелі та утворюється в результаті самодовільного розкладання оксидів  $\text{Co}_2\text{O}_3$  та  $\text{CoO}_2$  з виділенням кисню.

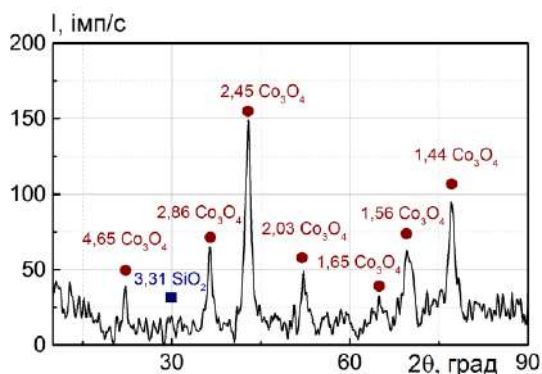


Рис. 4 – Дифрактограма покриття  $\text{Al} | \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CoO}_x$ , сформованого методом ПЕО на поршневому силуміні із вмістом  $\text{Si}$  13-20 мас.%

Одержані результати корелюють з даними для плазмо-електролітних покриттів на інших сплавах алюмінію [14]. Особливості фазової структури одержаного покриття у сукупності із розвинутою поверхнею та елементним складом є передумовою підвищення функціональних властивостей у порівнянні із вихідною поверхнею поршневих сплавів, зокрема мікротвердості, зносостійкості та каталітичної активності [15].

Розроблений технологічний підхід щодо ПЕО модельних зразків поршневих сплавів із різним вмістом кремнію був використаний для нанесення кобальтовмісного плазмо-електролітного покриття на поверхню натурального поршня, виготовленого зі сплаву АЛ30 (рис. 5).

Встановлено, що для одержання рівномірного покриття необхідно дотримуватись рекомендованих параметрів, а саме температури електроліту, густини струму та ступеневого режиму обробки [12, 13].

Враховуючи попередні результати щодо плазмо-електролітної обробки поршня двигуна зі сплаву АЛ25 [15] можна стверджувати, що сформоване кобальтовмісне покриття буде ефективним у внутрішньоциліндровому каталізі для зниження токсичності викидів ДВЗ та підвищення їх паливної економічності, зокрема для двигунів, поршні яких виготовлені зі сплавів з вмістом  $\text{Si}$  до 22 мас.%.

Принципово важливим моментом є технологічна можливість обробки (модифікування) поверхні габаритних та складних за формою деталей з одержанням суцільного рівномірного оксидного покриття.



Рис. 5 – Поршень ДВЗ зі сплаву АЛ30 з нанесеним кобальтовмісним плазмо-електролітним покриттям, сформованим в електроліті  $0,4 \text{ K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ,  $0,1 \text{ CoSO}_4$  протягом 15 хв.

Перспектива подальших досліджень пов'язані із адаптацією розробленого способу для поверхневого оксидування інших конструкційних матеріалів, а також підвищення вмісту металу-допantu (кобальту). Це дозволить підвищити функціональні властивості оброблюваних матеріалів та розширити сферу використання плазмо-електролітних оксидних систем.

## Висновки

Проведено огляд існуючих технологічних підходів до плазмо-електролітного формування покриттів на поршневих сплавах алюмінію. Показано, що застосування оксидних покриттів на деталях ДВЗ сприяє підвищенню їх функціональних властивостей, зокрема міцності та зносостійкості.

Розроблено спосіб формування на поршневих сплавах алюмінію із вмістом кремнію 13–22 мас.% оксидного покриття із вмістом до 4,7 ат.% методом плазмо-електролітного оксидування в режимі «спадаючої потужності» за густини струму 3–5  $\text{A}/\text{дм}^2$ . Встановлено, що на сплавах із меншим вмістом  $\text{Si}$  формується більш рівномірний оксидний шар з вищим вмістом допувального компонента.

Проведено апробацію використання запропонованого способу для формування кобальтовмісного плазмо-електролітного покриття на поверхні поршня зі сплаву АЛ30. Показано, що розроблений технологічний підхід може бути використаний для ПЕО деталей складної форми із синтезом рівномірних оксидних шарів.

## Список літератури

1. Fridlyander I. N., Sister V. G., Grushko O. E., Berstenev V. V., Sheveleva L. M., Ivanova L. A. Aluminum Alloys: Promising Materials in the Automotive Industry. *Metal Science and Heat Treatment*. 2002. Vol. 44. P. 365–370. doi:10.1023/A:1021901715578.
2. Glazoff M. V., Zolotarevsky V. S., Belov N. A. *Casting Aluminum Alloys*. Elsevier, Oxford, 2007. 544 p.
3. Okada A. *Innovative materials for automotive industry*. New York: Nova Science Publishers, 2010. 147 p.



4. Степанов В. А. Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей микродуговым окислением днищ поршней двигателей. *Science and world*. 2014. № 1 (5). С. 115–117.
5. Марченко, А. П., Шпаковский В. В. Влияние корундового слоя на рабочих поверхностях поршней на процесс сгорания в ДВС. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2011. № 2. С. 24–28.
6. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowe S. J. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol. 122. P. 73–93.
7. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E. O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview. *Surface and Coatings Technology*. 2007. Vol. 201, Issue 21. P. 8746–8760. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
8. Rudnev V. S., Lukiyanchuk I. V., Vasilyeva M. S., Medkov M. A., Adigamova M. V., Sergienko V. I. Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties. *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 307, Part C. P. 1219–1235. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.060.
9. Krishtal M. M. Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing. *Advanced Materials Research*. 2009. Vol. 59. P. 204–208.
10. Dudareva N., Gallyamova R. The Influence of Chemical Composition of Aluminum Alloys on the Quality of Oxide Layers Formed by Microarc Oxidation. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 11, Part 1. P. 89–94.
11. Ivashin P. V., Polunin A. V., Tverdokhlebov A. Y., Borgardt E. D., Krishtal M. M. The influence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles addition into electrolyte on the thermal conductivity of oxide layer formed on eutectic aluminum-silicon alloy by PEO. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1121*. 2018. P. 012014. doi: 10.1088/1742-6596/1121/1/012014.
12. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved M., Horokhivskiy A., Galak A. Study into formation of cobalt containing PEO-coatings on AK12M2MgN from a pyrophosphate electrolyte. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, No. 12(90). P. 19–27. doi:10.15587/1729-4061.2017.118028.
13. Каракуркчі Г. В., Сахненко М. Д., Ведь М. В., Горохівський А. С., Богданова К. Б., Степанова І. І. Морфологія та структура керамікоподібних ПЕО-покривів на сплавах Al. *Перспективні матеріали та процеси в прикладній електрохімії*: монографія / за заг. ред. В. З. Барсукова. Київ: КНУТД, 2019. С. 210–225.
14. Dudareva N. Yu., Abramova M. M. The Structure of Plasma-Electrolytic Coating Formed on Al-Si alloys by the Micro-Arc Oxidation Method. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2016. Vol. 52, Issue 1. P. 128–132. doi:10.1134/S2070205116010093.
15. Parsadanov I. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Rykova I. V., Khyzhniak V. O., Karakurkchi A. V., Gorokhivskiy A. S. Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines. *Вопросы химии и химической технологии*. 2017. Т. 52. № 6. С. 145–151.
- Science and Heat Treatment*, 2002, 44, pp. 365–370, doi:10.1023/A:1021901715578.
2. Glazoff M. V., Zolotarevsky V. S., Belov N. A. *Casting Aluminum Alloys*. Elsevier, Oxford, 2007, 544 p.
3. Okada A. *Innovative materials for automotive industry*. New York, Nova Science Publishers, 2010. 147 p.
4. Stepanov V. A. Uluchshenie ekspluatatsionnykh pokazateley avtomobiley mikrodugovym oksidirovaniem dnish porshney dvigateley [Improvement of vehicle performance by microarc oxidation of engine piston bottoms]. *Science and world*, 2014, 1(5), pp. 115–117.
5. Marchenko A. P., Shpakovskiy V. V. Vliyanie korundovogo sloya na rabochih poverhnostyakh porshney na protsess sgoraniya v DVS [The effect of corundum on the working surfaces of the pistons on the combustion process in internal combustion engines] *Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engines]*, 2011, 2, pp. 24–28.
6. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowe S. J. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface and Coatings Technology*, 1999, 122, pp. 73–93.
7. Gupta P., Tenhundfeld G., Daigle E. O., Ryabkov D. Electrolytic plasma technology: Science and engineering – An overview. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(21), pp. 8746–8760, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.11.023.
8. Rudnev V. S., Lukiyanchuk I. V., Vasilyeva M. S., Medkov M. A., Adigamova M. V., Sergienko V. I. Aluminum- and titanium-supported plasma electrolytic multicomponent coatings with magnetic, catalytic, biocide or biocompatible properties. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 307 (Part C), pp. 1219–1235, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.060.
9. Krishtal M. M. Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing. *Advanced Materials Research*, 2009, 59, pp. 204–208.
10. Dudareva N., Gallyamova R. The Influence of Chemical Composition of Aluminum Alloys on the Quality of Oxide Layers Formed by Microarc Oxidation. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 11, Part 1, pp. 89–94.
11. Ivashin P. V., Polunin A. V., Tverdokhlebov A. Y., Borgardt E. D., Krishtal M. M. The influence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles addition into electrolyte on the thermal conductivity of oxide layer formed on eutectic aluminum-silicon alloy by PEO. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1121*, 2018, p. 012014, doi: 10.1088/1742-6596/1121/1/012014.
12. Karakurkchi A., Sakhnenko M., Ved M., Horokhivskiy A., Galak A. Study into formation of cobalt containing PEO-coatings on AK12M2MgN from a pyrophosphate electrolyte. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6(12(90)), pp. 19–27, doi:10.15587/1729-4061.2017.118028.
13. Karakurkchi H. V., Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Horokhivskiy A. S., Bogdanova K. B., Stepanova I. I. Morfologiya ta struktura keramikopodobnyh PEO-pokrytyiv na splavax Al [Morphology and structure of ceramic-like PEO coatings on Al alloys] *Perspektyvni materialy ta procesy v prykladnij elektrokimiyi* [Promising materials and processes in applied electrochemistry]: monograph / for general. ed. VZ Barsukov. Kiev, KNUITD, 2019, pp. 210–225.
14. Dudareva N. Yu., Abramova M. M. The Structure of Plasma-Electrolytic Coating Formed on Al-Si alloys by the Micro-Arc Oxidation Method. *Protection of Metals and*

## References (transliterated)

1. Fridlyander I. N., Sister V. G., Grushko O. E., Berstenev V. V., Sheveleva L. M., Ivanova L. A. Aluminum Alloys: Promising Materials in the Automotive Industry. *Metal*

*Physical Chemistry of Surfaces*, 2016, 52(1), pp. 128–132, doi:10.1134/S2070205116010093.

15. Parsadanov I. V., Sakhnenko N. D., Ved' M. V., Rykova I. V., Khyzhniak V. O., Karakurkchi A. V., Gorohivskiy A. S.

Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines. *Voprosy himii i himicheskoy tekhnologii [Issues of Chemistry and Chemical Technology]*, 2017, 52(6), pp. 145–151.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Сахненко Микола Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичної хімії, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

**Mykola Sakhnenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of Department of Physical Chemistry, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

**Горохівський Андрій Сергійович** – Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри РХБ захисту, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1201-8630; e-mail: gorohivskiy86@gmail.com.

**Andrii Horokhivskiy** – Military Institute of Armored Forces of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer of Department of NBC protection, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1201-8630; e-mail: gorohivskiy86@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Сахненко М. Д., Горохівський А. С. Формування плазмо-електролітних кобальтовмісних покриттів на поршневих сплавах алюмінію. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 131-137. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.19.

*Please cite this article as:*

Sakhnenko M., Horokhivskiy A. Surface formation of plasma-electrolytic cobalt-containing coatings on piston alloys of aluminum. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 131-137, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.19.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Сахненко Н. Д., Гороховский А. С. Формирование плазменно-электролитных кобальтосодержащих покрытий на поршневых сплавах алюминия. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 131-137. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.19.

**АННОТАЦІЯ** На основі проведеного обзора функціональних покриттів на поршневих сплавах алюмінію зроблено висновок про целесообразності застосування оксидних покриттів для підвищення показників міцності та зносостійкості деталей поршневої групи двигателів внутрішнього згорання. Показано, що синтез оксидного шару на сплавах системи Al-Si (силумінах) можна здійснювати плазменно-електролітної обробкою в щелочних електролітах з додаванням солей металів-допантів, зокрема кобальта. Це дозволить отримувати покриття, які мають активність в процесах каталітичного горіння палива. Предложено формування кобальтосодержащих оксидних покриттів на поршневих сплавах здійснювати методом плазменно-електролітного оксидування в електроліті складу 0,4 моль/дм<sup>3</sup> K<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 0,1 CoSO<sub>4</sub> при щільності струму 3–5 А/дм<sup>2</sup> в режимі «падаючої потужності». Встановлено, що в зазначених умовах в течение 15 хв оксидування на висококремністих сплавах АЛ30 і АК21 утворюється оксидний шар з вмістом до 4,7 ат. % кобальта. Наявність до 6,4 ат. % фосфору в складі синтезованого покриття сприятиме підвищенню теплостійкості оксидованої поверхні. При цьому вміст кремнію в поверхневих шарах зменшується в 4–5 разів порівняно з початковим матеріалом. Показано, що морфологія і фазовий склад покриття змінюється з інкорпорацією допируючого компонента. Включення кобальта відбувається в вигляді термодинамічно стійкого оксиду Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (CoO·Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), який кристалізується в ґратку шпинелі, що поряд з високою ступенню розвитку поверхні є передумовою підвищення функціональних властивостей отриманих оксидних шарів. Розроблений спосіб був застосований для нанесення кобальтовмісного покриття на поверхню поршня зі сплаву АЛ30. Встановлено, що для отримання рівномірного оксидного шару слід дотримуватися зазначених технологічних параметрів. Прогнозується використання поршня з нанесеним кобальтосодержащим оксидним покриттям для зниження викидів токсичних речовин з відпрацьованими газами і зменшення витрати палива, що є перспективним для внутрішньопоршневого каталіза.

**Ключові слова:** плазменно-електролітне оксидування; поршневі сплави; силумін; АЛ30; АК21; кобальтосодержащее оксидне покриття

Надійшла (received) 01.12.2020

УДК 664.696.2

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.20

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОП-ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНА СОРИЗУ

Д. О. ТИМЧАК\*, С. Ю. МИКОЛЕНКО, К. А. ЧОРНЕЙ, Д. О. БУРІЙ

кафедра технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, УКРАЇНА

\*e-mail: dmytrotymchak@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Досліджено технологічні властивості зерна соризу українських сортів як сировини для виробництва поп-зерна. Доведено перспективність розширення ринку снекової продукції в Україні. У харчових продуктах використання поп-зерна може покращити його склад та харчову цінність, що вимагає нових джерел зерна українського сорту. Характеристики поп-властивостей зерна соризу визначали для п'яти сортів, а саме: Деймос, Вересень, Октан, Європа та Меркурій. Колір зерна соризу для досліджуваних сортів дещо відрізнявся: сорт Вересень мав темно-коричневий колір, у той час як інші – світло-коричневий. Насипна маса зерна соризу коливалася від 757 до 777 г/дм<sup>3</sup>, маса 1000 зерен становила від 29,3 до 36,1 г. Форма зерна всіх досліджуваних сортів була близькою до кулястої, трохи сплюсненою та витягнутою. Технологічні властивості зерна соризу для отримання поп-зерна включають вихід, об'ємну масу, коефіцієнт розширення. Мікрохвильова обробка зерна соризу українських сортів дозволила досягти виходу повітряного зерна на рівні 44–67 %, що було близьким до багатьох сортів українського сорго. Об'ємна маса поп-зерна соризу становила від 82 до 103 г/дм<sup>3</sup>. Коефіцієнт розширення зернівки для різних сортів соризу коливався від 8 до 13, що є досить високим показником, порівняно з іншими поп-культурами. Поп-зерно соризу було оцінено експертною комісією щодо органолептичних характеристик, таких як зовнішній вигляд, колір, запах, смак, текстура. Загальний бал розраховували з врахуванням коефіцієнта вагомості. Вибрані зразки поп-соризу дещо відрізнялись за кольором, але встановлена суттєва різниця в їх запаху, смаку та структурі. Найвищий вихід і коефіцієнт розширення, найменшу об'ємну масу показав сориз сорту Вересень. Поп-зерно соризу цього сорту характеризувалося найвищою загальною органолептичною оцінкою серед досліджуваних сортів.

**Ключові слова:** надвисокочастотна обробка; сориз; повітряне зерно; поп-властивості; вихід повітряного зерна; коефіцієнт розширення; органолептичні характеристики

## STUDY OF SORIZ GRAIN POPPING CHARACTERISTICS

D. TYMCHAK, S. MYKOLENKO, K. CHORNEI, D. BURIY

Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, UKRAINE

**ABSTRACT** Technological properties of soriz grain of Ukrainian varieties as a raw material for pop-grain production have been studied. The prospects of expanding Ukrainian snack market were proved. In food products, using pop-grain can be improving its composition and nutritional value requiring new sources of grain of Ukrainian variety. Popping characteristics of the soriz grain were determined for five varieties such as Deimos, Veresen, Octane, Europe, and Mercury. Color of the soriz grain of the studied varieties differed slightly: Veresen variety had a dark brown color when others light brown. Bulk grain weight of the soriz variety varied between 757 and 777 g/dm<sup>3</sup>, the weight of 1000 grains ranged from 29.3 to 36.1 g. Grain shape of all studied varieties was close to spherical, slightly flattened and elongated. Technological properties of soriz grain quality for popping purpose include popping yield, specific weigh, and volume expansion ratio. Microwave treatment of the soriz grain of Ukrainian varieties allowed achieving popping yield at 44–67 %, which was close to many varieties of Ukrainian sorghum varieties. Specific weight of the popped soriz grain ranged from 82 to 103 g/dm<sup>3</sup>. Volume expansion ratio for the different soriz varieties varied from 8 to 13, which is a fairly high compared to other pop crops. Popped soriz grain was evaluated by expert panel on sensory characteristics such as appearance, color, smell, taste, texture. Overall score was calculated taking into account the value coefficient. The popped soriz grain samples differed slightly in color, but there was a significant difference in their smell, taste and texture. The highest popping yield and volume expansion ratio, the lowest specific weight was showed by soriz grain of Veresen variety. Popped soriz grain of this variety received the highest overall organoleptic score among the studied varieties.

**Keywords:** microwave treatment; soriz; popped grain; popping characteristics; popping yield; volume expansion ratio; sensory characteristics

## Вступ

Сьогодні фахівці у галузі переробки зерна все частіше шукають шляхи вдосконалення існуючих технологій за рахунок використання нових методів оброблення зернової сировини. Дієвим рішенням даної проблеми є впровадження технології обробки зернової сировини у електромагнітному полі надвисокої частоти (НВЧ).

Надвисокочастотна обробка відноситься до ресурсоощадних технологій та дозволяє не лише

суттєво скоротити тривалість технологічних процесів, зменшити енергетичні витрати, але й уникнути утворення небажаних побічних продуктів, забезпечуючи високі органолептичні якості продукту [1]. Слід зазначити, що для українського ринку виробництво зернових продуктів із використанням НВЧ-обробки, зокрема повітряного зерна, не є поширеним. Проте закордонний досвід [2–4] свідчить про перспективність використання даної технології українськими виробниками та доцільність проведення наукових досліджень в цьому напрямку.



Глобальні зміни клімату та світова економічна криза змушують українських сільськогосподарських виробників шукати нові види сировини для виробництва звичних продуктів харчування та розробляти нові продукти для розширення ринку і забезпечення потреб населення. Зокрема, одним із таких продуктів може стати повітряне зерно, яке виробляється за простою технологією, має високу засвоюваність та низьку собівартість [1,5].

Потрібно зазначити, що зерно не всіх культур володіє здатністю до «зривання», або поп-властивостями. Для виробництва даного виду продукції в основному використовують зерно кукурудзи та рису [4,6,7]. У роботах [2,3,5,8,9] опубліковано ряд наукових досліджень, присвячених використанню зерна сорго для отримання повітряного продукту, що вказує на перспективу досліджень поп-властивостей зерна сорго.

Сориз або сорго рисоподібне – це сільськогосподарська культура, яка виведена українськими вченими шляхом селекції сорго та диких сортів рису. В результаті селекції сориз набув найкращих властивостей сорго (невибагливість до ґрунтових умов, стійкість до посухи та високих температур) і диких рисоподібних форм (хороші смакові якості, високі показники скловидності, твердість ендосперму).

Хімічний склад зерна соризу близький до рису. Зерно соризу містить 11,1 % білка, 1,1 % жиру, до 80 % вуглеводів, в т.ч. 1,5 % цукру [10,11]. Сориз характеризується достатньо високим вмістом незамінної амінокислоти лізину, якої в середньому міститься близько 0,17 %, вітамінів та мінеральних речовин [11]. Харчові волокна соризу здатні зв'язувати та виводити з організму людини шкідливі токсичні речовини та солі важких металів [12]. Такий багатий хімічний склад зерна соризу зумовлює зацікавленість серед виробників зернової продукції, але реальних шляхів використання даної культури мало.

У літературних джерелах, окрім використання зерна соризу на кормові потреби, пропонується виробництво соризової крупи [11]; композиційних сумішей соризового і пшеничного борошна для виробництва макаронних [10] і хлібобулочних [12] виробів; горілчаного спирту та пива [13].

Дані щодо поп-властивостей зерна соризу для сортів і гібридів, культивованих в Україні є відсутніми, що гальмує розширення ринку шляхом ефективного використання даної зернової культури.

### Мета роботи

Метою роботи є дослідження поп-зерна соризу української селекції та органолептичних характеристик отриманого повітряного продукту.

### Виклад основного матеріалу

Для проведення дослідження було використано зерно соризу п'яти сортів української селекції, а саме: Деймос, Вересень, Октан, Європа, Меркурій. Зерно було вирощене в умовах Синельниківської селекційно-дослідної станції ДУ «Інститут сільського господарства степової зони НААН України». Досліджувані зразки зерна незначно відрізняються між собою за зовнішнім виглядом та формою зернівки (рис. 1).



Рис. 1 – Зовнішній вигляд зерна соризу сортів:  
1 – Деймос, 2 – Вересень, 3 – Октан, 4 – Європа,  
5 – Меркурій

Як видно з рис. 1, зерно сортів Деймос, Октан, Європа, Меркурій мають світло-коричневе, ближче до кольору слонової кістки забарвлення, а сорт Вересень має темно-коричневе забарвлення оболонки. Форма зернівки у зерна всіх сортів наближається до кулеподібної, злегка приплюснута та витягнута. Також зерно досліджуваних сортів соризу відрізняється за насипною масою та масою 1000 зерен (табл. 1) показниками, які характеризують крупність і виповненість зернівки.

Таблиця 1 – Характеристика якості зерна соризу

| Сорт     | Насипна маса, г/л | Маса 1000 зерен, г |
|----------|-------------------|--------------------|
| Деймос   | 777               | 36,1               |
| Вересень | 760               | 30,5               |
| Октан    | 757               | 29,3               |
| Європа   | 772               | 34,8               |
| Меркурій | 761               | 30,8               |

Таким чином, зерно сорту Деймос є найкрупнішим з досліджуваних сортів. Найменшу насипну масу і масу 1000 зерен показав сорт Октан. Сорти Вересень та Меркурій мають однакові показники крупності зерна.

До основних технологічних показників якості зерна, придатного для виробництва повітряного продукту, відносяться вихід повітряного зерна, об'ємна маса та коефіцієнт розширення зернівки.

Вихід є основним показником ефективності процесу отримання повітряного зерна. Даний показник є як кількісною, так і якісною характеристикою зернової сировини, має велике економічне значення, оскільки обумовлює

прибутковість виробництва. Вихід повітряного зерна визначали за формулою:

$$PY = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де  $PY$  – вихід повітряного зерна, %;  $n_1$  – кількість повітряних зерен, шт;  $n_2$  – кількість частково «зірваних» зерен, шт;  $n_3$  – кількість зерен, що зберегли цілісність, шт.

Показник об'ємної маси є якісним показником при оцінюванні процесу отримання повітряного зерна. Відповідно, чим менша об'ємна маса готового продукту, тим краще зерно розкривається і, відповідно, більшим буде об'єм готової продукції. Показник об'ємної маси визначали за формулою:

$$\nu = \frac{m_{\text{сер}}}{V_m}, \quad (2)$$

де  $\nu$  – об'ємна маса повітряного зерна, г/дм<sup>3</sup>;  $m_{\text{сер}}$  – середньоарифметичне значення маси повітряного зерна, г;  $V_m$  – об'єм тари, яка використовується для вимірювання, дм<sup>3</sup>.

Коефіцієнт розширення зернівки також є важливим технологічним показником якості зерна, з якого виробляють повітряний продукт, який відображає у скільки разів збільшилася зернівка в результаті обробки. Коефіцієнт розширення визначали як відношення об'єму повітряного зерна до об'єму необробленого зерна за формулою:

$$K_p = \frac{V_{\text{п.з.}}}{V_{\text{н.з.}}}, \quad (3)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт розширення;  $V_{\text{п.з.}}$  – об'єм повітряного зерна, мл;  $V_{\text{н.з.}}$  – об'єм нативного зерна до НВЧ-обробки, мл.

Для дослідження поп-властивостей зерна соризу було проведено очищення досліджуваних зразків, зволоження їх до вмісту вологи 15 %, надвисокочастотну обробку зерна у мікрохвильовій печі (Samsung, Корея), максимальна потужність якої становить 800 Вт, а робоча частота становить 2450 МГц. Надвисокочастотна обробка проводилася у трьох повторностях відповідно до попередньо встановлених оптимальних показників процесу [14]: потужність магнетрону – 700 Вт, тривалість обробки – 150 с.

Отримані результати виходу повітряного соризу наведено на рис. 2. Найбільший вихід повітряного зерна можливо досягти при використанні зерна сорту Вересень. Найменші показники виходу повітряного соризу було зафіксовано для сортів Окταν та Меркурій – біля 44 %.

Визначені показники об'ємної маси повітряного соризу різних сортів показано на рис. 3.

За даними рис. 3 можна зробити висновок, що кращим сортом для промислового виробництва повітряного соризу є сорт Вересень, який демонструє найменшу об'ємну масу. Слід відмітити, що близькі значення цього показника отримано для ще двох

сортів Європа та Меркурій. При цьому сориз Окταν має об'ємну масу на 21 % більшу, ніж у сорту Вересень.

Результати визначення коефіцієнту розширення зернівки соризу наведено на рис. 4.

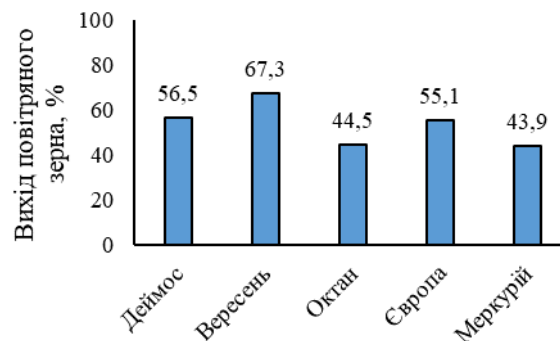


Рис. 2 – Вихід повітряного соризу

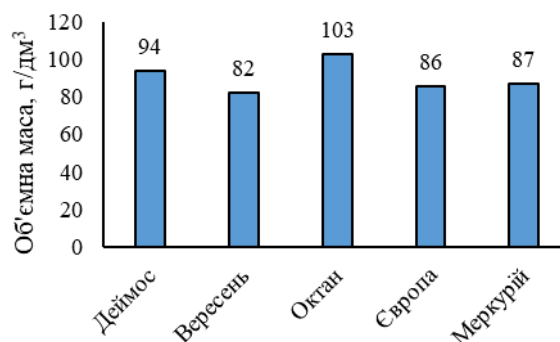


Рис. 3 – Об'ємна маса повітряного соризу

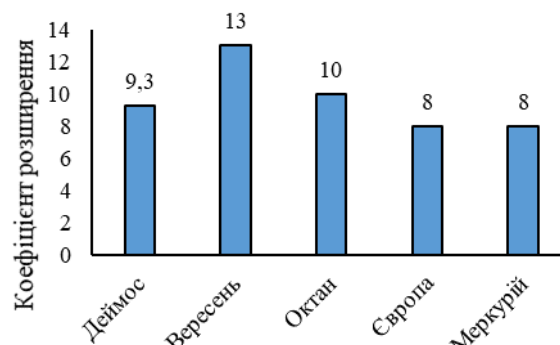


Рис. 4 – Коефіцієнт розширення зернівки соризу

Як видно з рис. 4, зерно соризу Вересень демонструє найбільший коефіцієнт розширення серед досліджуваних сортів. Високі значення даного показника також зафіксовано для сортів Окταν та Деймос, коефіцієнт розширення яких становить 10 та 9,3 відповідно. Сорти Європа і Меркурій мають найменший коефіцієнт розширення.

#### Обговорення результатів

Дослідженнями залежності виходу повітряного зерна від сортових особливостей зерна сорго займалися переважно індійські [15] та африканські [5] вчені. В своїй роботі Mishra та ін. [15] досліджували чотири сорти зерна сорго, які показали вихід повітряного зерна від 54 до 81 %. Saravanabavan та ін.

[5] для трьох сортів зерна сорго зафіксували вихід в межах 30–100 %. Отримані результати виходу повітряного соризу (рис. 2) свідчать про наявність поп-властивостей у зерна соризу вітчизняної селекції, що вказує на перспективу їх використання в харчовій промисловості. При цьому вихід повітряного соризу Вересень – 67,3 % перевищує показники більшості сортів сорго вітчизняної селекції, які демонстрували вихід від 17 до 92 % [16].

Об'ємна маса повітряного зерна є якісною характеристикою кінцевого продукту попінгу. На практиці споживач надає перевагу більш об'ємному продукту і це створює додатковий ресурс для прибутку під час реалізації продукту [17]. Результати дослідження (рис. 3) показують, що надвисокочастотна обробка зерна соризу дозволяє отримати повітряний продукт об'ємною масою від 82 до 103 г/дм<sup>3</sup>. При цьому в роботі [16] об'ємна маса повітряного сорго становила 70–116 г/дм<sup>3</sup>.

Результати визначення коефіцієнту розширення зернівки соризу різних сортів (рис. 4) знаходяться у межах 8–13, що вказує на добрі поп-властивості. Для порівняння коефіцієнт розширення зернівки сорго різних сортів в роботі [16] знаходився у межах 6,4–10,7. Найкращий показник зафіксовано для сорту Вересень, який перевищує кращий показник для досліджених сортів сорго на 21 %.

Важливою характеристикою повітряного зерна є органолептична оцінка. Кожний зразок повітряного соризу було оцінено експертною групою за п'яти основними показниками (рис. 5а) та розраховано загальну оцінку з урахуванням коефіцієнтів вагомості кожного показника (рис. 5б).

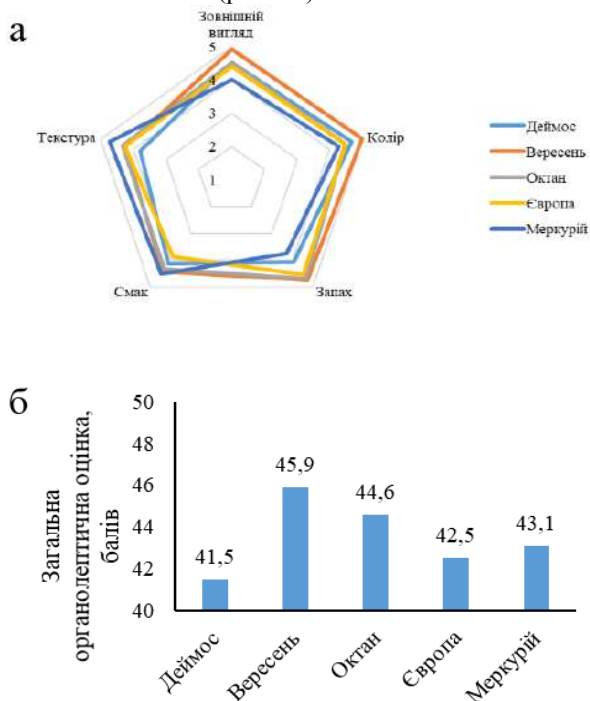


Рис. 5 – Органолептична оцінка повітряного соризу:  
а – профілограма показників органолептичної оцінки;  
б – загальна органолептична оцінка

Як видно з рис. 5а, досліджувані зразки повітряного соризу незначно відрізняються за кольором. Повітряний продукт із соризу сорту Меркурій мав найприємнішу структуру – пористу, м'яку та хрустку. Використання соризу «Вересень» дозволяє отримати снеки з кращим зовнішнім виглядом, кольором, запахом та смаком. Текстура повітряного соризу, отриманого з даного сорту є більш твердою, ніж з сорту Меркурій.

При цьому повітряний сориз сорту Вересень отримав найвищу загальну органолептичну оцінку (рис. 5б) серед досліджуваних сортів.

Отже, зерно соризу української селекції проявляє достатні поп-властивості. Високі показники виходу повітряного зерна та коефіцієнту розширення зернівки дозволяють рекомендувати використання зерна сорту Вересень для промислового виробництва повітряного продукту.

## Висновки

Сориз в Україні є недооціненою і не поширеною сільськогосподарською культурою через відсутність розроблених та дієвих технологій його переробки на харчові продукти. Відомих шляхів використання зерна соризу та невибагливість до умов його вирощування, на жаль, не достатньо для сучасних реалій ринку вітчизняної сільськогосподарської продукції. Встановлення наявності поп-властивостей у зерна даної культури може стати рушієм для збільшення посівних площ соризу та розширення асортименту снекової продукції.

Встановлено, що шляхом надвисокочастотної обробки зерна соризу, можна досягти виходу повітряного продукту на рівні 44–67 %, що перевищує показники багатьох сортів сорго вітчизняної селекції.

Об'ємна маса повітряного соризу із зерна сортів Деймос, Вересень, Октан, Європа, Меркурій становила від 82 до 103 г/дм<sup>3</sup>, що також знаходиться на одному рівні з поп-сорго.

Коефіцієнт розширення зернівки різних сортів соризу коливався в межах 8–13, що є достатньо високим показником для зерна поп-культур.

Найвищі показники виходу повітряного зерна та коефіцієнту розширення, найменша об'ємна маса характерна для сорту Вересень. Повітряний сориз, отриманий із цього сорту, мав найвищу органолептичну оцінку серед досліджуваних сортів. Тому сорт соризу Вересень доцільно використовувати для виробництва повітряного соризу.

## Список літератури

1. Черкасова Э. И. Применение СВЧ-энергии в производстве крупяной продукции. *Вестник ЮУрГУ. Серия: «Пищевые и биотехнологии»*. 2013. 1. С. 32–37.
2. Mishra G., Joshi D. C., Panda B. K. Popping and puffing of cereal grains: a review. *Journal of grain processing and storage*. 2014. Vol. 1. № 2. P. 34–46.

3. Mishra G., Joshi D.C., Mohaparta D. Optimization of pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology *Journal of food science and technology*. 2015. Vol. 52, № 12. P. 7839–7849. doi: 10.1007/s13197-015-1898-9.
4. Maisont S., Narkruga W. Effects of salt, moisture content and microwave power on puffing qualities of puffed rice. *Kasetsart Journal Natural Science*. 2010. 44(2). P. 251–261.
5. Saravanabavan S. N., Shivanna M. M., Blattacharya S. Effect of popping on sorghum starch digestibility and predicted glycemic index. *J. Food Sci. Technol.* 2013. Vol. 50. № 2. P. 387–392. doi:10.1007/s13197-011-0336-x.
6. Farahnaky A., Alipour M., Majzoobi M. Popping properties of corn grains of two different varieties at different moistures. *J. Agr. Sci. Tech.* 2013. Vol. 15. P. 771–780.
7. Joshi N. D., Mohaparta D., Joshi D. C., Sutar R. F. Puffing characteristics of parboiled milled rice in a domestic convective-microwave oven and process optimization. *Food and Bioprocess Technology*. 2014. № 7 (6). P. 1678–1688.
8. Golubanova I., Katova A., Ilieva A., Marinov-Serafimov P. Popping characteristics of sorghum genotypes (Sorghum bicolor (L.) Moench). *Food and Feed Research*. 2017. № 44 (2). P. 115–121. doi:10.5937/ffr1702115g.
9. Cabrera-Ramírez A. H., Castro-Campos F. G., Gaytán-Martínez M., Morales-Sánchez E. Relationship between the corneous and floury endosperm content and the popped sorghum quality. *Journal of Cereal Science*. 2020. Vol. 95. P. 2–9. doi:10.1016/j.jcs.2020.102999.
10. Пророчук І., Рихлівський І. П. Корисні властивості та напрями використання соризу. *Матеріали студентської науково-практичної конференції за результатами науково-дослідної роботи в 2008 р.* ПДАТУ. 2008. С. 5.
11. Макаров Л. Х., Скорий М. В. Сориз (технологія, селекція, насінництво, переробка): монографія. УАН, Ін-т землеробства Півден. регіону УАН. 2009. 324 с.
12. Моргун В. О., Жигунов Д. О., Крошко О. С. Сориз – компонент борошняних композиційних сумішей. *Хранение и переработка зерна*. 2017. № 10. С. 48–53.
13. Дремлюк Г. К. Сориз – культура третього тисячелеття. *Право на жизнь*. 2000. С. 120.
14. Tymchak D. O., Mykolenko S. Yu., Kuianov Yu. Yu. Production of popped sorghum with using microwave treatment. *Grain Products and Mixed Fodder's*. 2018. Vol. 18. № 2. P. 15–20. doi:10.15673/gpmf.v18i2.950.
15. Gayatri M., Joshi D. C., Mohaparta D., Bhushan Babu V. Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum. *Journal of cereal science*. 2015. Vol. 65. P. 19–24. doi:10.1016/j.jcs.2015.06.001.
16. Миколенко С. Ю., Тимчак Д. О. Вплив технологічних факторів на поп-властивості зерна сорго. *Харчова промисловість*. 2019. № 26. С. 14–21.
17. Wu P. J., Schwartzberg H. C. Popping behavior and zein coating of popcorn. *Cereal Chem.* 1992. № 69. P. 567–573.
- pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology *Journal of food science and technology*, 2015, Vol. 52, no 12, pp. 7839–7849. doi:10.1007/s13197-015-1898-9.
4. Maisont S., Narkruga W. Effects of salt, moisture content and microwave power on puffing qualities of puffed rice. *Kasetsart Journal Natural Science*, 2010, 44(2), pp.251–261.
5. Saravanabavan S. N., Shivanna M. M., Blattacharya S. Effect of popping on sorghum starch digestibility and predicted glycemic index. *J. Food Sci. Technol.*, 2013, Vol. 50, no 2, pp. 387–392. doi:10.1007/s13197-011-0336-x.
6. Farahnaky A., Alipour M., Majzoobi M. Popping properties of corn grains of two different varieties at different moistures. *J. Agr. Sci. Tech.* 2013, Vol. 15, pp. 771–780.
7. Joshi N. D., Mohaparta D., Joshi D. C., Sutar R. F. Puffing characteristics of parboiled milled rice in a domestic convective-microwave oven and process optimization. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, no 7 (6), pp. 1678–1688.
8. Golubanova I., Katova A., Ilieva A., Marinov-Serafimov P. Popping characteristics of sorghum genotypes (Sorghum bicolor (L.) Moench). *Food and Feed Research*, 2017, no. 44 (2), pp. 115–121, doi:10.5937/ffr1702115g.
9. Cabrera-Ramírez A. H., Castro-Campos F. G., Gaytán-Martínez M., Morales-Sánchez E. Relationship between the corneous and floury endosperm content and the popped sorghum quality. *Journal of Cereal Science*, 2020, Vol. 95, pp. 2–9, doi:10.1016/j.jcs.2020.102999.
10. Prorochuk I., Rykhlivskiy I. P. Korysni vlastyvoli ta napriamy vykorystannia soryzu [Useful properties and directions of soriz use]. *Materialy studentskoi naukovo-praktychnoi konferentsii za rezultatamy naukovo-doslidnoi roboty v 2008 r.* [Proceedings of the student scientific-practical conference based on the results of research work in 2008], PDATU, 2008, p. 5.
11. Makarov L. Kh., Skoryi M. V. Soryz (tekhnohiiia, selektsiia, nasinnnytstvo, pererobka): monohrafiia [Soriz (technology, selection, seed production, processing): monograph]. *UAAN, In-t zemlerobstva Pivden. rehionu UAAN [Inst. of Agriculture South. region UAAS]*, 2009, 324 p.
12. Morhun V. O., Zhyhunov D. O., Kroshko O. S. Soryz – komponent boroshnianykh kompozytsiinykh sumishei [Soriz - a component of flour composite mixtures]. *Khrenenye y pererabotka zerna [Grain storage and processing]*, 2017, no.10, pp. 48–53.
13. Dremlyuk G. K. Soriz – kul'tura tret'ego tysyacheletiya [Soriz is the culture of the third millennium]. *Pravo na zhizn' [The right to life]*, 2000, p. 120.
14. Tymchak D. O., Mykolenko S. Yu., Kuianov Yu. Yu. Production of popped sorghum with using microwave treatment. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 2018, Vol. 18, no 2, pp. 15–20, doi:10.15673/gpmf.v18i2.950.
15. Gayatri M., Joshi D. C., Mohaparta D., Bhushan Babu V. Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum. *Journal of cereal science*, 2015, Vol. 65, pp. 19–24, doi:10.1016/j.jcs.2015.06.001.
16. Mykolenko S. Yu., Tymchak D. O. Vplyv tekhnolohichnykh faktoriv na pop-vlastyvoli zerna sorho [Technological factors affecting popping properties of sorghom grain]. *Kharchova promyslovist [Food Industry]*, 2019, no. 26, pp. 14–21.
17. Wu P. J., Schwartzberg H. C. Popping behavior and zein coating of popcorn. *Cereal Chem.*, 1992, 69, pp. 567–573.

## References (transliterated)

1. Cherkasova E. I. Primenenie SVCh-energii v proizvodstve krupyanoi produktsii [Using of microwave energy in the production of cereals]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: «Pishchevye i biotekhnologii» [Bulletin of SUSU. Series: "Food and Biotechnology"]*, 2013, no, pp. 32–37.
2. Mishra G., Joshi D. C., Panda B. K. Popping and puffing of cereal grains: a review. *Journal of grain processing and storage*, 2014, Vol. 1, no 2, pp. 34–46.
3. Mishra G., Joshi D. C., Mohaparta D. Optimization of

### Відомості про авторів (About authors)

**Тимчак Дмитро Олександрович** – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, викладач кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0003-1216-6078; e-mail: dmytrotymchak@gmail.com.

**Dmytro Tymchak** – Dnipro State Agrarian and Economic University, Lecturer of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1216-6078; e-mail: dmytrotymchak@gmail.com.

**Миколенко Світлана Юрійвна** – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, доцент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0002-1959-1141; e-mail: svetlana.mykolenko@gmail.com.

**Svitlana Mykolenko** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Dnipro State Agrarian and Economic University, Associate Professor of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1959-1141; e-mail: svetlana.mykolenko@gmail.com.

**Чорней Крістіна Анатоліївна** – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, асистент кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0003-0800-6071; e-mail: summer90821@gmail.com.

**Kristina Chornei** – Dnipro State Agrarian and Economic University, Assistant of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0800-6071; e-mail: summer90821@gmail.com.

**Бурій Дмитро Олександрович** – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, магістрант кафедри технології зберігання і переробки сільськогосподарської продукції; м. Дніпро, Україна; e-mail: genotrof13@gmail.com.

**Dmytro Buriy** – Dnipro State Agrarian and Economic University, Master Student of Department of Agricultural Products Storage and Processing Technologies, Dnipro, Ukraine; e-mail: genotrof13@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Тимчак Д. О., Миколенко С. Ю., Чорней К. А., Бурій Д. О. Дослідження поп-властивостей зерна соризу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 138-143. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.20.

*Please cite this article as:*

Tymchak D., Mykolenko S., Chornei K., Buriy D. Study of soriz grain popping characteristics. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 138-143, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.20.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Тимчак Д. А., Миколенко С. Ю., Чорней К. А., Бурій Д. А. Исследование поп-свойств зерна сориза. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 138-143. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.20.

**АННОТАЦІЯ** Исследовано технологические свойства зерна сориза украинских сортов как сырья для производства поп-зерна. Доказана перспективность расширения рынка снековой продукции в Украине. В пищевых продуктах использование поп-зерна может улучшить состав и пищевую ценность, что требует новых источников зерна украинских сортов. Характеристики поп-свойств зерна сориза определяли для пяти сортов, а именно: Деймос, Вересень, Оксан, Европа и Меркурий. Цвет зерна сориза для исследуемых сортов несколько отличался: сорт Вересень имел темно-коричневый цвет, в то время как другие - светло-коричневый. Насыпная масса зерна сориза колебалась от 757 до 777 г/дм<sup>3</sup>, масса 1000 зерен составила от 29,3 до 36,1 г. Форма зерна всех исследуемых сортов была близка к шаровидной, немного сплюснутой и вытянутой. Технологические свойства зерна сориза для получения поп-зерна включают выход, объемную массу, коэффициент расширения. Микроволновая обработка зерна сориза украинских сортов позволила достичь выхода воздушного зерна на уровне 44-67 %, что было близко к многим сортам украинского сорго. Объемная масса поп-зерна сориза составляла от 82 до 103 г/дм<sup>3</sup>. Коэффициент расширения зерновки для различных сортов сориза колебался от 8 до 13, что является достаточно высоким показателем по сравнению с другими поп-культурами. Поп-зерно сориза было оценено экспертной комиссией по органолептическим характеристикам, таким как: внешний вид, цвет, запах, вкус, текстура. Общий балл рассчитывали с учетом коэффициента весомости. Выбранные образцы поп-сориза несколько отличались по цвету, но установлена существенная разница в их запахе, вкусе и текстуре. Самый высокий выход и коэффициент расширения, наименьшую объемную массу показал сориз сорта Вересень. Поп-зерно сориза этого сорта характеризовалось самой высокой общей органолептической оценкой среди исследованных сортов.

**Ключевые слова:** сверхвысокочастотная обработка; сориз; воздушное зерно; поп-свойства; выход воздушного зерна; коэффициент расширения; органолептические характеристики

Надійшла (received) 30.11.2020



UDC 620.179.16

doi:10.20998/2413-4295.2020.04.21

## CAPACITIVE TRANSDUCERS BASED ITO/POLYIMIDE/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> THIN FILM STRUCTURE

L. ZAITSEVA<sup>1\*</sup>, O. VODORIZ<sup>2</sup>, R. ZAITSEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Natural Science, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Physics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

<sup>3</sup> Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

\*e-mail: liliia.zaitseva@khipti.edu.ua

**ABSTRACT** It has been developed and approbated prototypes of thin-film capacitor transducers based on Al/ITO/polyimide/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> heterosystem for capacitive acoustic control in metal objects in the modes of simultaneous acoustic signal reception and generation by capacitive transducers and in certain modes of acoustic signal generating or receiving that can realize objects monitoring with sensitivity at the level of piezoelectric transducers. The developed prototype of thin film capacitive transducer for monitoring pipelines by longwave capacitive method allows increasing the maximum distance between the capacitive transducers up to 10 meters. At a substrate temperature of 300 °C and a specific power of the magnetron of 0.31 W/cm<sup>2</sup> on Upilex polyimide films were obtained layers of capacitive transducers with a thickness of 0.2-0.3 μm with a surface resistance of 8 Ωm<sup>2</sup>, while the concentration of charge carriers was 8,3·10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup> and mobility - 44 cm<sup>2</sup>/(V·s). It has been engineered the thin film capacitive transducers which by using the polyamide film with 15 microns thickness of and alumina film with 1 micron thickness allow to increase the sensitivity of such method in 7-8 times, and the additional use of thin crystalline Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films deposited on a substrate of polyimide, allows to increase the value of the dielectric constant of the layer of the capacitive transducer from 3-4 relative units to 8.5-11.5 relative units. Experimental studies of the crystal structure of the developed transducers by X - ray diffractometry and research of their dielectric properties were carried out. The device was tested and the possibility of its use was shown along with the generally accepted methods of defectoscopy. It is shown that using the magnetron sputtering technology, which provides high adhesion to polyimide substrate layers, made possible produce the capacitive transducers for objects with various shape. Proposed and patented: capacitor method for receiving acoustic signals in non-destructive control and transducer of ultrasonic acoustic wave's excitation and receiving.

**Keywords:** thin film, polyimide; ITO; transducer; capacitive method; metal defectoscopy; dielectric constant

## ЄМНІСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА ОСНОВІ ТОНКОПЛІВКОВОЇ СТРУКТУРИ ІТО/ПОЛІІМІД/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Л. В. ЗАЙЦЕВА<sup>1</sup>, О. С. ВОДОРІЗ<sup>2</sup>, Р. В. ЗАЙЦЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Кафедра природничих наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

<sup>2</sup> Кафедра фізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>3</sup> Кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

**АНОТАЦІЯ** Розроблено та апробовано дослідні зразки тонкоплівкових ємнісних перетворювачів на основі гетеросистеми Al/ITO/поліімід/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для проведення ємнісного акустичного контролю у металевих виробках у режимах одночасного прийому і генерації акустичного сигналу ємнісними перетворювачами та в окремих режимах генерації або прийому акустичного сигналу, які дають можливість реалізувати контроль об'єктів з чутливістю на рівні п'єзoeлектричних перетворювачів. Розроблено дослідний зразок тонкоплівкового ємнісного перетворювача для проведення контролю трубопроводів довгохвильовим ємнісним методом, що дає змогу збільшити максимальну відстань між ємнісними перетворювачами при контролі до 10 метрів. При температурі підкладки 300 °C та питомій потужності магнетрону 0,31 Вт/см<sup>2</sup> на поліімідних плівках фірми Upilex були отримані шари ємнісних перетворювачів завтовшки 0,2-0,3 мкм з поверхневим електроопором 8 Ом/□, при цьому концентрація носіїв заряду становила 8,3·10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>, рухливість - 44 см<sup>2</sup>/(В·с). Створені тонкоплівкові ємнісні перетворювачі, які дають змогу за рахунок використання поліімідної плівки товщиною 15 мкм та плівки оксиду алюмінію товщиною 1 мкм збільшити чутливість методу у 7-8 разів, а додаткове використання тонких кристалічних плівок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, осаджених на підкладку з полііміду, дозволяє підвищити величину діелектричної проникності прошарку ємнісного перетворювача від 3-4 відн.од., характерних для полііміду, до 8,5-11,5 відн. од. Проведено експериментальні дослідження кристалічної структури розроблених перетворювачів методом рентгендифрактометрії та дослідження їх діелектричних властивостей. Проведено апробацію приладу та показано можливість його використання поряд із загальноприйнятими методами дефектоскопії. Показано, що використання технології магнетронного розпилення, котра забезпечує високу адгезію шарів до поліімідної підкладки, дає змогу одержувати ємнісні

*перетворювачі для виробів різноманітної форми. Запропоновані і запатентовані: конденсаторний спосіб прийому акустичних сигналів при неруйнівному контролі та перетворювач збудження і прийому ультразвукових акустичних хвиль.*

**Ключові слова:** тонкі плівки; поліїмід; ITO; перетворювач; ємнісний метод; дефектоскопія металів; діелектрична стала

### Introduction

The need to simplify the control technology of metal products macrodefects in terms of industrial production has led to the further development of widely used acoustic methods [1]. They are based on piezoelectric devices that implement the acoustic method using special fluids to ensure the necessary acoustic contact. Considerable experience in the practical use of this method has identified areas in which it isn't effective [2,3]. So it is impossible to use liquid for acoustic control of the products with the polluted surface struck by corrosion, or with coverings (paint, polymeric films and other insulating coverings), hot and cold products. Thus, for the needs of practical defectoscopy it is necessary to create devices that will allow to conduct liquid-free acoustic control [4,5].

### Formulation of a problem

Promising among the devices of liquid-free acoustic control can be means created on the basis of capacitive method of generation and reception of acoustic signals, which has a fundamentally different physical mechanism of acoustic signal generation in the control object, its surface is one of the plates of the capacitive composition and itself generates a signal without the need to use liquid to ensure acoustic contact. However, the existing capacitive compositions don't allow to obtain the necessary sensitivity of the method and the task is to find, create and study the latest capacitive transducers based on thin film layers, among which are very promising layers of polyimide, ITO [6,7] (Indium Tin Oxide, mixed indium oxide and tin  $(\text{In}_2\text{O}_3)_{0,9}(\text{SnO}_2)_{0,1}$ ) and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  alumina.

### Methods of obtaining samples

The following key requirements for increasing the sensitivity and efficiency of capacitive transducers follow from the practice of using classical capacitive transducers for defectoscopy by the capacitive method, which are as follows:

- reducing the dielectric layer thickness;
- increasing the dielectric constant value of the layer.

From the view point of the requirements fulfillment, the possibility of using a polyamide film with a thickness of 15 to 125  $\mu\text{m}$  as a dielectric layer and a base for capacitive transducers, which is 10 times less than the thickness of classical dielectric layers, is quite relevant. When creating a capacitive converter with the  $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$  structure, a polyimide of the Upilex-S brand with a thickness of 15  $\mu\text{m}$  was used, the surface of which was previously cleaned. On one of the polyimide sides by the method of non-reactive magnetron sputtering on direct current on VUP-5M vacuum plant in the following technological conditions the ITO layer was obtained: the discharge gap length - 70 mm; deposition

time - 30 minutes; the initial residual pressure in the vacuum chamber was  $3 \cdot 10^{-7}$  Pa and the working pressure in the process of target spraying -  $1.5 \cdot 10^{-4}$  Pa; ITO target consisted of 90 Wt %  $\text{In}_2\text{O}_3$  and 10 Wt %  $\text{SnO}_2$  and pressed under a pressure of approximately 12 kg/cm<sup>2</sup>; the substrate temperature was 300 °C, the magnetron specific power was 0.28 W/cm<sup>2</sup>. Current-conducting tracks made of aluminum on the ITO layer surface was created by the method of thermal resistive spraying on a VUP-4 vacuum unit in the following technological conditions: spraying was carried out through a suitable mask at a vacuum of  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa, the substrate was heated to 110 °C, spraying time with tungsten evaporators was 120 s. On the other side of the polyimide film in similar technological conditions to the ITO layer was obtained a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer [8]. A schematic cross-sectional view of such a device is shown in Figure 1, a. According to the above technology, a prototype of a thin-film capacitive transducer for acoustic control of metal products was created, the physical configuration of which is shown in Figure 1, b.

### Study of the crystal structure of thin-film capacitive transducers

To achieve the maximum quality of such structures it is necessary to control the parameters of the ITO layer: its crystal structure, which determines most of its properties, including mechanical, and its dependence on deposition conditions, as well as its electrical resistance, the values of which determine the possibility of using such a structure as a plate of a capacitive transducer.

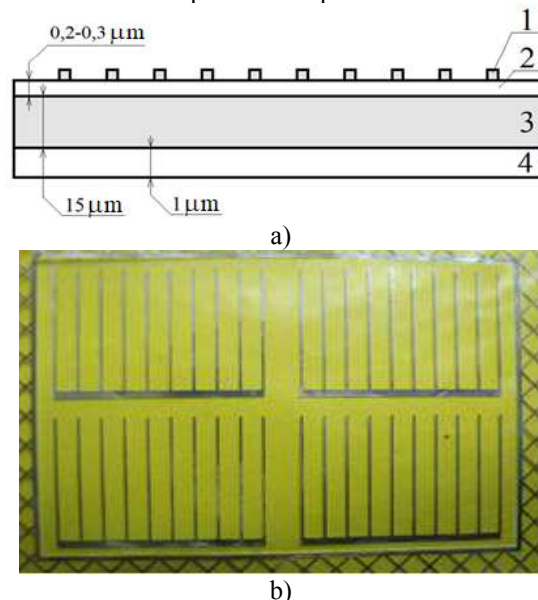


Fig. 1 - A schematic cross-sectional view (a) and the physical configuration (b) the proposed thin-film capacitive transducer: 1 – aluminum current-conducting tracks; 2 - ITO layer with a thickness of 0.2 – 0.3  $\mu\text{m}$ ; 3 - polyimide film with a thickness of 15  $\mu\text{m}$ ; 4 -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer with a thickness of 1  $\mu\text{m}$



Studies of the film layers crystal structure were carried out by the traditional X-ray diffraction method [9] on DRON-4 X-ray machine with automatic recording of the diffraction spectrum using a computer with continuous  $2\theta$ -scanning in the range of angles  $2\theta = 20 - 75$  with Bragg-Brentano focusing ( $\theta$ - $2\theta$ ) in cobalt anode radiation. The surfaces of ITO and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layers were also studied using a REM-100U scanning electron microscope. The obtained X-ray diffraction patterns and surface micrographs are shown in Fig. 2 and 3, for the ITO layer and the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer, respectively.

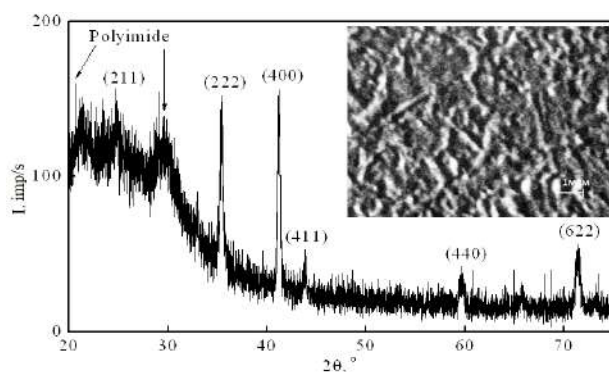


Fig. 2 - X-ray diffractogram and micrograph of the ITO layer surface deposited on the polyimide film

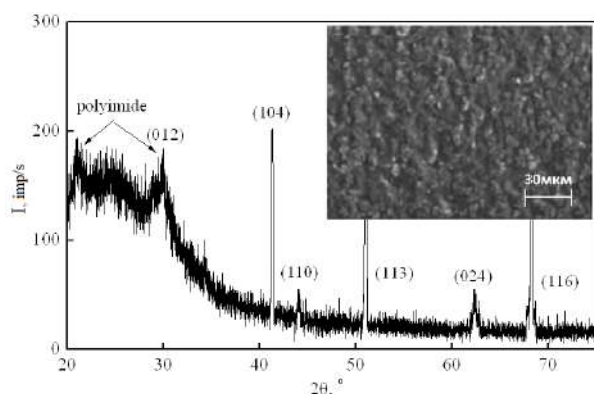


Fig. 3 - X-ray diffractogram and micrograph of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer surface deposited on the polyimide film

Analysis of X-ray diffractograms of ITO layers obtained by the nonreactive magnetron sputtering method (Fig. 2) showed that all layers have a crystal structure of  $\text{In}_2\text{O}_3$  stable cubic modification. The latter is unequivocally evidenced by the presence of reflections from the planes (221), (222), (400), (411), (332), (431), (440), (611), (622). The results of the total integral intensity ratio calculations of all peaks observed on the diffraction pattern to the thickness of the ITO layer indicate the presence of a X-ray amorphous phase small amount in the samples. It was also experimentally found that at a substrate temperature of  $300^\circ\text{C}$ , the film growth occurs with a predominant orientation in the direction  $\langle 111 \rangle$ .

The structure analysis of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer showed that all layers have a crystal structure of a stable

rhombohedral modification of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  with lattice parameters  $a = 4.759 \text{ \AA}$ ,  $c = 12.993 \text{ \AA}$ . This is clearly evidenced by the presence of reflections from the planes (012), (104), (110), (113), (024) and (116) [10]. The X-ray diffractogram analysis shows that the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  layer has a stable crystal structure, and as a consequence, has stable electrical parameters that correspond to the structure.

#### Study of the crystal structure of thin-film capacitive transducers

As already mentioned, for the manufacture of thin-film capacitive converters based on the ITO/polyimide/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  structure along with the layers crystal structure, it is also necessary to control the surface electrical resistance of the conductive layer, the values of which determine the possibility of using such a structure as a plate of the capacitive transducer without considerable losses of a useful signal, and the dielectric constant of the dielectric layer, which significantly affects the useful signal magnitude.

To control the surface electrical resistance of the ITO layer, the four-probe method was used [11], and the surface electrical resistance ( $R_s$ ) of the ITO layers determined by this method is equal to  $8\text{--}15 \text{ }\Omega/\text{m}$ . E.m.f. Hall studies indicate that the obtained resistivity value is due to the main charge carriers concentration from about  $8.3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  and the main charge carriers mobility at the level of  $44 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ .

Studies of the polyamide film dielectric constant and the polyimide/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  structure were performed for the excitation signals frequencies in the range of  $10 - 10^7 \text{ Hz}$ , which were generated by a GSS-20 signal generator type. The capacitance of the capacitor structure was measured using an RLC-meter type E318, and the data are shown in Fig. 4.

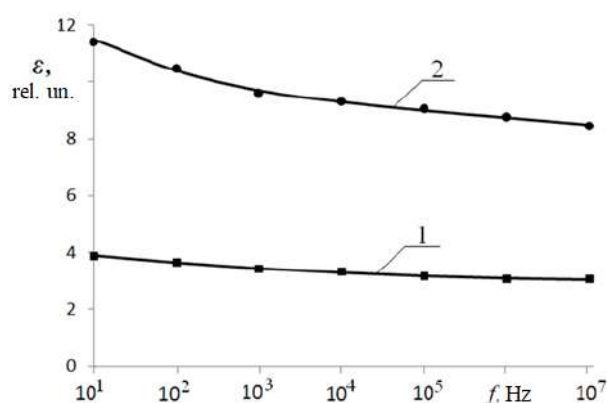


Fig. 4 - Dependence of polyimide film dielectric constant (1) and polyimide/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  structure of (2) on frequency of excitation signal

The study results show an increase in the dielectric constant of the polyimide/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  structure, which is  $8.5 - 11.5$  rel. unit, relative to the polyimide film ( $3 - 3.5$  rel. unit) approximately 3 times at frequencies of the

excitation signal in the range of 10 Hz – 10 MHz [12]. This circumstance confirms the assumption about the possibility of increasing the layer dielectric constant by applying a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin layer on the polyimide film. A 3-fold increase in the dielectric constant will lead to an additional 3-fold increase in the sensitivity of the capacitive transducer based on such a layer.

### Approbation of the device

To confirm the possibility of method sensitivity increasing due to the use of a capacitive transducer based on the  $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$  structure in comparison with classical transducers, a series of samples from aluminum was studied at an oscillation frequency of 2.5 MHz. The received signals obtained oscillograms for transducers both types with the same magnitude of the excitation signal are shown in Fig. 5.

As can be seen from Fig. 5, the received signal value in the case of using a thin-film transducer increases by 7.6 times compared to the classical transducer, which correlates well with the dielectric constant dielectric layers measurements and taking into account thickness reduction of the dielectric layer. Thus, the increase in the capacitive method sensitivity in the case of the thin-film capacitive transducers use based on the  $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$  structure is experimentally confirmed.

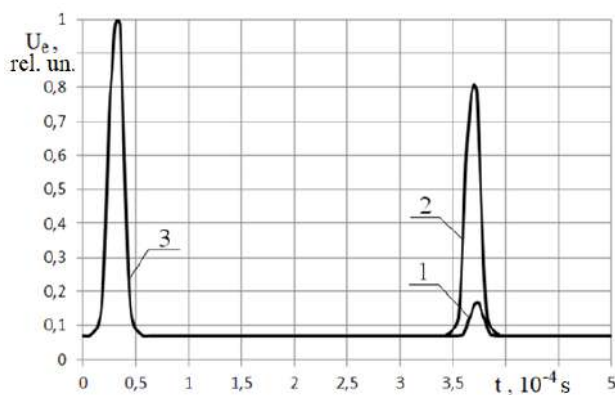


Fig. 5 - Normalized oscillograms of the received signals from the classical capacitive transducer (1) and the proposed thin-film based on the  $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$  structure (2) in comparison with the same excitation signal (3)

### Conclusions

It is proposed to use as a dielectric layer in defectoscopy of metal products by capacitive method a thin polyimide film, the thickness of which is two orders of magnitude less than the thickness of classical dielectric layers, and is 15  $\mu\text{m}$ , and the dielectric constant is 3-4 rel. units, which allows, respectively, to increase the sensitivity of the capacitive method by about 100 times. ITO layers with a thickness of 0.2 – 0.3  $\mu\text{m}$  (surface

resistance was 8 – 15  $\Omega/\text{m}$ , the charge carriers concentration was  $8.3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , mobility was  $44 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ) were obtained on polyimide films from Upilex at a substrate temperature of 300  $^{\circ}\text{C}$  and a magnetron specific power of 0.31  $\text{W}/\text{cm}^2$ . It was found that the additional use of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin crystalline films deposited on a polyimide substrate, allows to increase the dielectric constant of the capacitive transducer layer from 3-4 rel. unit characteristic of polyimide, up to 8.5 – 11.5 rel. unit. The obtained growth in the dielectric constant value allows to increase the capacitive method sensitivity by at least 3 times. A prototype of a thin-film capacitive transducer for acoustic control of metal products based on the  $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$  structure was created. An experimental study of the prototype was performed and it was found that the use of a thin-film capacitive transducer based on the  $\text{Al}/\text{ITO}/\text{polyimide}/\text{Al}_2\text{O}_3$  structure increases the sensitivity of the capacitive method by 7.6 times.

### Список літератури

1. Dwivedi S. K., Vishwakarma M., Soni A. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *MaterialsToday: Proceedings*. 2018. Vol. 5. no. 2. pp. 3690-3698. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.620.
2. Guo S., Shah L., Ranjan R., Walbridge S., Gerlich A. Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of aluminum friction stir welded joints. *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 118. pp. 150-161. doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.09.004.
3. Gorkunov B. M., Tupa I. V., Zaitseva L. V., Khrypunov G. S., Zaitsev R. V., Khrypunova A. L. Metal Defectoscopy by the Capacitive Acoustic Method: The Physical Base Development. *Journal of nano- and electronic physics*. 2018. Vol. 7. no. 1. pp. 01038.
4. Bondarenko O. G. Determination of the actual area of dry acoustic contact in the system "transducer-product" in low-frequency defectoscopy. *Methods and devices of quality control*. 2019. Vol. 43. no. 2. pp. 5-15. doi:10.31471/1993-9981-2019-2(43)-5-15.
5. Myatezh A. V., Malozyomov B. V. Defectoscopy of conductive structures. *International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering"*. Atlantis Press, 2019. pp. 435-440. doi:10.2991/aime-18.2018.83.
6. Sousa M. G., da Cunha A. F. Optimization of low temperature RF-magnetron sputtering of indium tin oxide films for solar cell applications. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 484. pp. 257-264. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.03.275.
7. Yüzüak G. D., Coşkun Ö. D. The effect of annealing on the structural, electrical, optical and electrochromic properties of indium-tin-oxide films deposited by RF magnetron sputtering technique. *Optik*. 2017. Vol. 142. pp. 320-326. doi:10.1016/j.ijleo.2017.06.016.
8. Khrypunov G., Sokol E., Kudii D., Khrypunov M. The optimization of technology ITO layers for thin-film solar cells. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Ukraine, 2018. pp. 393-398. doi:10.1109/TCSET.2018.8336227.
9. XiaoHui C., Tao X., DongBing L., QingGuo Y., BinQiang L., Mu L., XiaoYa L., Jun L. Graphical method for

- analyzing wide-angle x-ray diffraction. *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89. no. 1. pp. 013904. doi: 10.1063/1.5003452.
10. Kumar S., Mote V.D., Prakash R., Kumar V. X-ray Analysis of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles by Williamson–Hall Methods. *Materials Focus*. 2016. Vol. 5. no. 6. pp. 545-549. doi:10.1166/mat.2016.1345.
  11. Troyan P., Zhidik Yu., Zhidik E. Investigation of temperature stability of ITO films characteristics. *IV International Young Researchers Conference "Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects"*. Russia, 2018. pp. 03010. doi:10.1051/mateconf/201814303010.
  12. Acharya J., Wilt J., Liu B., Wu J. Probing the Dielectric Properties of Ultrathin Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al Trilayers Fabricated Using in Situ Sputtering and Atomic Layer Deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018. Vol. 10. no. 3. pp. 3112-3120. doi:10.1021/acsami.7b16506.
  5. Myatezh A. V., Malozyomov B. V. Defectoscopy of conductive structures. *International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering"*, Atlantis Press, 2019, pp. 435-440, doi:10.2991/aime-18.2018.83.
  6. Sousa M. G., da Cunha A. F. Optimization of low temperature RF-magnetron sputtering of indium tin oxide films for solar cell applications. *Applied Surface Science*, 2019, Vol. 484, pp. 257-264, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.03.275.
  7. Yüzüak G. D., Coşkun Ö. D. The effect of annealing on the structural, electrical, optical and electrochromic properties of indium-tin-oxide films deposited by RF magnetron sputtering technique. *Optik*, 2017, Vol. 142, pp. 320-326, doi:10.1016/j.ijleo.2017.06.016.
  8. Khrypunov G., Sokol E., Kudii D., Khrypunov M. The optimization of technology ITO layers for thin-film solar cells. *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, Ukraine, 2018, pp. 393-398, doi:10.1109/TCSET.2018.8336227.
  9. XiaoHui C., Tao X., DongBing L., QingGuo Y., BinQiang L., Mu L., XiaoYa L., Jun L. Graphical method for analyzing wide-angle x-ray diffraction. *Review of Scientific Instruments*, 2018, Vol. 89, no. 1, pp. 013904, doi:10.1063/1.5003452.
  10. Kumar S., Mote V.D., Prakash R., Kumar V. X-ray Analysis of  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles by Williamson–Hall Methods. *Materials Focus*, 2016, Vol. 5, no. 6, pp. 545-549, doi:10.1166/mat.2016.1345.
  11. Troyan P., Zhidik Yu., Zhidik E. Investigation of temperature stability of ITO films characteristics. *IV International Young Researchers Conference "Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects"*, Russia, 2018, pp. 03010, doi:10.1051/mateconf/201814303010.
  12. Acharya J., Wilt J., Liu B., Wu J. Probing the Dielectric Properties of Ultrathin Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al Trilayers Fabricated Using in Situ Sputtering and Atomic Layer Deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, Vol. 10, no. 3, pp. 3112-3120, doi:10.1021/acsami.7b16506.

### References (transliterated)

### Відомості про авторів (About authors)

**Зайцева Лілія Василівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри природничих наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-0668-711X; e-mail: liliia.zaitseva@khpi.edu.ua.

**Liliia Zaitseva** – Ph. D., Associate Professor, Department of Natural Science, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0668-711X; e-mail: liliia.zaitseva@khpi.edu.ua.

**Водоріз Ольга Станіславівна** – кандидат фізико-математичних наук, кафедра фізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-2951-4887; e-mail: olga.vodorez@gmail.com.

**Olga Vodoriz** – Ph. D., Senior Lecturer, Department of Physics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2951-4887; e-mail: olga.vodorez@gmail.com.

**Зайцев Роман Валентинович** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2286-8452; e-mail: roman.zaitsev@khpi.edu.ua.

**Roman Zaitsev** – D.Sc., Docent, Head of Department, Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2951-4887; e-mail: roman.zaitsev@khpi.edu.ua.

Please cite this article as:

Zaitseva L., Vodoriz O., Zaitsev R. Capacitive transducers based ITO/polyimide/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film structure. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 4 (6), pp. 144-149, doi:10.20998/2413-4295.2020.04.21.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Зайцева Л. В., Водоріз О. С., Зайцев Р. В. Ємнісний перетворювач на основі тонкоплівкової структури ІТО/поліімід/ $Al_2O_3$ . *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 4 (6). С. 144-149. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.21.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Зайцева Л. В., Водорез О. С., Зайцев Р. В. Емкостной преобразователь на основе тонкопленочной структуры ИТО/полиимид/ $Al_2O_3$ . *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 4 (6). С. 144-149. doi:10.20998/2413-4295.2020.04.21.

**АННОТАЦИЯ** Разработаны и апробированы опытные образцы тонкопленочных емкостных преобразователей на основе гетеросистемы  $Al/ITO/полиимид/Al_2O_3$  для проведения емкостного акустического контроля в металлических изделиях в режимах одновременного приема и генерации акустического сигнала емкостными преобразователями и в отдельных режимах генерации или приема акустического сигнала, которые позволяют реализовать контроль объектов с чувствительностью на уровне пьезоэлектрических преобразователей. Разработан опытный образец тонкопленочного емкостного преобразователя для проведения контроля трубопроводов длинноволновым емкостным методом, что позволяет увеличить максимальное расстояние между емкостными преобразователями при контроле до 10 метров. При температуре подложки 300 °С и удельной мощности магнетрона 0,31 Вт/см<sup>2</sup> на полиимидной пленке Uprilex были получены слои емкостных преобразователей толщиной 0,2-0,3 мкм с поверхностным электросопротивлением 8 Ом/□, при этом концентрация носителей заряда составляла  $8,3 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>, подвижность - 44 см<sup>2</sup>/(В·с). Созданы тонкопленочные емкостные преобразователи, которые позволяют за счет использования полиимидной пленки толщиной 15 мкм и пленки оксида алюминия толщиной 1 мкм увеличить чувствительность метода в 7-8 раз, а дополнительное использование тонких кристаллических пленок  $Al_2O_3$ , осажденных на подложку из полиимида, позволяет повысить величину диэлектрической проницаемости прослойки емкостного преобразователя от 3-4 отн. ед., характерных для полиимида, до 8,5-11,5 отн. ед. Проведены экспериментальные исследования кристаллической структуры разработанных преобразователей методом рентгенодифрактометрии и исследованы их диэлектрические свойства. Проведена апробация прибора и показана возможность его использования наряду с общепринятыми методами дефектоскопии. Показано, что использование технологии магнетронного распыления, которая обеспечивает высокую адгезию слоев к полиимидной подложке, позволяет получать емкостные преобразователи для изделий различной формы. Предложены и запатентованы: конденсаторный способ приема акустических сигналов при неразрушающему контролю и преобразователь возбуждения и приема ультразвуковых акустических волн.

**Ключевые слова:** тонкие пленки; полиимид; ИТО; преобразователь; емкостной метод; дефектоскопия металлов; диэлектрическая постоянная

Received 18.11.2020

## ЗМІСТ

## ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

|                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Батигін Ю. В., Єрьоміна О. Ф., Шиндерук С. О., Стрельнікова В. А., Чаплигін Є. О.</b> Магнітно-імпульсне притягання листових заготовок при «прямому пропусканні струму»                                                                | 3  |
| <b>Вербицький Є. В., Білий М. В.</b> Особливості проектування системи електроживлення з відновлювальними джерелами енергії в умовах ринку електроенергії                                                                                  | 14 |
| <b>Вербицький Є. В., Гарницький А. В.</b> Модульний зарядний пристрій акумулятора електромобіля з двостороннім передаванням енергії                                                                                                       | 22 |
| <b>Гогасєв К. О., Подрєзов Ю. М., Волощенко С. М., Аскеров М. Г., Мінаков М. В., Луговський Ю. Ф.</b> Вплив вмісту марганцю на кількість залишкового аустеніту та механічні властивості АДІ після різних режимів ізотермічного гартування | 28 |
| <b>Мартюхін І. А., Вербицький Є. В.</b> Система електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором                                                                                                                                  | 34 |
| <b>Некрасов С. С., Довгополов А. Ю., Жигилій Д. О., Бараненко А. В., Сидоров Ю. Є.</b> Розробка методики ідентифікації визначального рівняння пластичних сталей шляхом дослідження на стискання                                           | 40 |
| <b>Пальков І. А., Пальков С. А., Іщенко О. І., Авдєєва О. П.</b> Вдосконалення циліндра високого тиску турбіни К-1000-60/1500-2 бл. №4 Балаковської АЕС                                                                                   | 46 |
| <b>Пантєєва І. В., Глушко А. В.</b> Шляхи обмеження рівнів струмів короткого замикання в електричних мережах                                                                                                                              | 54 |

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

|                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Єгорова І. М., Коміна М. М.</b> Розробка методики ефективного застосування анімації у WEB                                                                                                                | 60 |
| <b>Знаменников Я. В., Шкиря Ю. О., Некрасов С. С., Довгополов А. Ю.</b> Визначення кута нахилу приладу до горизонту з використанням вимірювальної системи на основі мікроелектромеханічного сенсора MPU6050 | 65 |
| <b>Леонов С. Ю., Боровик О. Р.</b> Дослідження роботи електронних пристроїв з урахуванням електромагнітної сумісності                                                                                       | 71 |
| <b>Прохоренко В. А., Заволодько Г. Е.</b> Структура CMS системи                                                                                                                                             | 77 |
| <b>Становська І. І., Становський О. Л., Науменко Є. О., Саух І. А.</b> Інформаційна складова стійкості блукаючих складних систем відповідального призначення                                                | 82 |
| <b>Черняк О. М., Сороколат Н. А., Каницька І. В.</b> Застосування методу інтегрування для оцінювання якості об'єктів кваліметрії                                                                            | 93 |

## ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Кравченко К. М., Павлов Б. В., Тульський Г. Г.</b> Суміщені анодні процеси у розчинах сульфатної кислоти                                                                               | 99  |
| <b>Крижановська Я. П., Гомеля М. Д., Шаблій Т. О., Вакуленко А. К.</b> Оцінка ефективності процесів переробки концентрованих розчинів хлориду натрію з отриманням алюмінієвого коагулянту | 107 |
| <b>Мельник С. Р., Старчевський Р. О., Мельник Ю. Р., Оржеховська О. Є., Магорівська Г. Я.</b> Кінетичні та технологічні аспекти одержання бутилолеату в присутності оксидів металів       | 114 |
| <b>Мойсєєв В. Ф., Манойло Є. В., Ляпощенко О. О., Хуссейн Сейф.</b> Очищення нафтопромислових стічних вод                                                                                 | 122 |
| <b>Сахненко М. Д., Горохівський А. С.</b> Формування плазмо-електролітних кобальтовмісних покриттів на поршневих сплавах алюмінію                                                         | 131 |
| <b>Тимчак Д. О., Миколенко С. Ю., Чорней К. А., Бурій Д. О.</b> Дослідження поп-властивостей зерна соризу                                                                                 | 138 |

## СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Зайцева Л. В., Водоріз О. С., Зайцев Р. В.</b> Ємнісний перетворювач на основі тонкоплівкової структури ІТО/поліімід/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 144 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## CONTENTS

## ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Batygin Y., Yeryomina O., Shinderuk S., Strelnikova V., Chaplygin E.</b> Magnetic-pulsed attraction of sheet billets with "direct passage of current"    | 3  |
| <b>Verbytskyi I., Bilyi M.</b> Peculiarities of designing the power supply system with renewable energy sources in the conditions of the electricity market | 14 |
| <b>Verbytskyi I., Harnytskyi A.</b> Modular electric vehicle battery charger with bidirectional power flow                                                  | 22 |

|                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Gogaev K., Podrezov Y., Voloshchenko S., Askerov M., Minakov N., Lugovskoy Y.</b> Influence of manganese content on the amount of residual austenite and mechanical properties of ADI after different modes of isothermal hardening | 28  |
| <b>Martiukhin I., Verbytsky I.</b> Trolleybus power supply system with high-voltage battery                                                                                                                                            | 34  |
| <b>Nekrasov S., Dovhopolov A., Zhyhylii D., Baranenko A., Sydorov Yu.</b> Development of constitutive equations identifying methodology for steels for plastic moulding by compression testing                                         | 40  |
| <b>Palkov I., Palkov S., Ishchenko O., Avdieieva O.</b> Improvement of the high pressure cylinder of the turbine K-1000-60/1500-2 of the Balakovo NPP 4-th block                                                                       | 46  |
| <b>Pantielieieva I., Glushko A.</b> Ways to limit the levels of short circuit currents in electrical grids                                                                                                                             | 54  |
| <b>INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS</b>                                                                                                                                                                                      |     |
| <b>Iegorova I., Komina M.</b> Development of methods for effective application of animation in the WEB                                                                                                                                 | 60  |
| <b>Znamenshchykov Y., Shkyrya Yu., Nekrasov S., Dovhopolov A.</b> Determination of the angle of the device inclination relative to the horizon using a measuring system based on the MPU6050 microelectromechanical sensor             | 65  |
| <b>Leonov S., Borovyk O.</b> Research of electronic devices taking into account electromagnetic compatibility                                                                                                                          | 71  |
| <b>Prokhorenko V., Zavalodko G.</b> CMS systems structure                                                                                                                                                                              | 77  |
| <b>Stanovska I., Stanovskyi O., Naumenko I., Saukh I.</b> Information component of stability of wandering complex systems of responsible purpose                                                                                       | 82  |
| <b>Cherniak O., Sorocolat N., Kanytska I.</b> Application of the integration method for assessing the quality of qualimetry objects                                                                                                    | 93  |
| <b>CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY</b>                                                                                                                                                                                           |     |
| <b>Kravchenko K., Pavlov B., Tulsky G.</b> Combined anode processes in sulfuric acid solutions                                                                                                                                         | 99  |
| <b>Kryzhanovska Y., Gomelya M., Shabliy T., Vakulenko A.</b> Evaluating of efficiency of concentrated sodium chloride solutions conversion processes for obtaining aluminum coagulant                                                  | 107 |
| <b>Melnyk S., Starchevskyy R., Melnyk Y., Orzhekhovska O., Mahorivska H.</b> Kinetic and technological aspects of butylolate production in the presence of metal oxides                                                                | 114 |
| <b>Moiseev V., Manoilo E., Liaposhchenko A., Houssein Seif.</b> Oilfield wastewater treatment                                                                                                                                          | 122 |
| <b>Sakhnenko M., Horokhivskiy A.</b> Surface formation of plasma-electrolytic cobalt-containing coatings on piston alloys of aluminum                                                                                                  | 131 |
| <b>Tymchak D., Mykolenko S., Chornei K., Buriy D.</b> Study of soriz grain popping characteristics                                                                                                                                     | 138 |
| <b>MODERN INSTRUMENTATION TECHNOLOGY</b>                                                                                                                                                                                               |     |
| <b>Zaitseva L., Vodoriz O., Zaitsev R.</b> Capacitive transducers based ITO/polyimide/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> thin film structure                                                                                               | 144 |

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".  
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

**№ 4(6)' 2020**

Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна  
Технічний редактор: С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна  
Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна  
С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, доц. Р. С. Томашевський

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».  
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: [vestnik.nsm@gmail.com](mailto:vestnik.nsm@gmail.com)

Підп. до друку «30» грудня 2020 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 13,0. Облік.вид.арк. 8,75.  
Тираж 50 прим. Зам. № 56. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017  
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

---