

ISSN 1813-5420

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№4–2019

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ЕНЕРГЕТИКА

*економіка, технології, екологія*

Науковий журнал

№ 4 (58) - 2019

Виходить 4 рази на рік  
Заснований у березні 2000 року

Моніторинг, діагностика та керування енергетичними процесами та  
обладнанням  
Енергетичні системи та комплекси  
Енергетична ефективність та енергозбереження  
Міжгалузеві проблеми і системні дослідження в паливно-енергетичному секторі  
Екологічні проблеми в енергетиці

---

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2019

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

головного редактора – С.П. Денисюк, О.С. Яндульський, Є.М. Письменний

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: А.О. Авраменко, Б.І. Басок, О.Ф. Буткевич, О.О. Вовк,  
(Україна) А.В. Волошко, Г.О. Воропаєв, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,  
С.О. Кудря, А.В. Носовський, М.Я. Островерхов,  
С.М. Пересада, В.А. Попов, К.К. Ткачук, В.О. Туз,  
О.Ю. Черноусенко, С.П. Шевчук, В.Ф. Шинкаренко

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецькі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*), В.І. Олещук (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатий (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), Рошан Шарма (*Університет Південно-Східної Норвегії*).

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

Веб-сайт журналу <http://energy.kpi.ua>

Журнал зареєстровано Реєстраційний номер Свідоцтва про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ №22857-12775ПР від 14.06.2017 р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до рішення Атестаційної колегії МОН України від 13 грудня 2016 р., затверджене наказом МОН України № 1604 від 22 грудня 2016 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PИHЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 1 від 20 січня 2020 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка О.С. Іщенко.

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Адреса редакції 03056, Україна, м.Київ, вул.Борщагівська, 115, к.315,  
тел. (38-044) 406-85-14, e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)

Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського Видавництво «Політехніка»,  
м.Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.

**Увага!** Передрукування матеріалів іншими виданнями можливе лише з дозволу редакційної колегії журналу **ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія**

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE  
“IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

# POWER ENGINEERING

*economics, technique, ecology*

*ENERHETYKA:*  
*ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya*

**The Scientific Journal**

**№ 4 (58) – 2019**

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Monitoring, diagnostics and management of energy processes and equipment  
Energy systems and complexes  
Energy efficiency and energy savings  
Cross-sectoral problems and system studies in the fuel and energy sector  
Environmental problems in energy

---

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2019

*Editor-in-chief* Yu.I. Yakymenko

*Deputy editors-in-chief* S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskyi, E.M. Pysmennyi

*Deputy* O.O. Zakladnyi

EDITORIAL BOARD: (Ukraine) A.O. Avramenko, B.I. Basok, O.F. Butkevych, O.O. Vovk, A.V. Voloshko, G. Voropaiev, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov, S.O. Kudrya, A.V. Nosovsky, M.Ya. Ostroverkhov, S.M. Peresada, V.A. Popov, K.K. Tkachuk, V.O. Tuz, O. Yu. Chernousenko, S.P. Shevchuk, V.F. Shinkarenko

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD: E. Handschin (*Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany*), Richard Strzelecki (*Electro technical Institute, Warsaw, Poland*), P.Y. Ekel (*Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil*), A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*), V. Oleschuk (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), O. Kuznetsov (*University of Applied sciences, Germany*), Carlos F. Pfeiffer (*University College of Southeast Norway*), A. Baskys (*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*), Opitz H. Joachim (*EIH Energy Institute Hamm, Germany*), V. Postolati (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), Roshan Sharma (*University of South-Eastern Norway*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

Website of the journal <http://energy.kpi.ua>

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775IIP dated 14 June 2017

The Journal was registered by decision Attestation commission MES of Ukraine of December 13, 2016, approved by order of MES of Ukraine № 1604 of December 22, 2016 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, RSCI, Djerele, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 1 on January 20, 2020).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing O. Ishchenko.  
Responsible for the publication N.O. Kravchuk.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Address of editorial office 03056, Ukraine, Kyiv, 115 Borschagivska str., office 315  
tel. (38-044) 406-85-14, e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)

The publisher Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ.hous "Politehnika", Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

**Attention!** Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology**  
© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019

## ЗМІСТ

### МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

<b>С.П. Шевчук, С.В. Зайченко.</b> Забезпечення надійності та обґрунтування терміну служби електромеханічного обладнання групи ліфтів багатопверхового будинку.....	7
<b>В.Б. Нізімов, В.І. Хоменко.</b> Техніко-економічні показники автономного синхронного генератора середньої потужності.....	14
<b>В.П. Калінчик, В.В. Калінчик.</b> Оцінювання параметрів виробничого середовища при дискретному представленні інформації.....	21
<b>Н.В. Зуєвська, Л.В. Шайдецька, В.Є. Губашова.</b> Вплив виконання елементів струменевої цементації на фізико-механічні характеристики навколишнього ґрунтового масиву.....	27
<b>М.А. Коваленко, О.Л. Тимощук, О.О. Самойленко.</b> Розробка експериментального стенду для дослідження малопотужних машин постійного струму з електромагнітним збудженням.....	35
<b>М.О. Логвинюк, Є.В. Новаківський.</b> Підвищення надійності роботи котла шляхом розподілення теплового навантаження по висоті топки.....	42
<b>О.С. Іщенко.</b> Застосування засобів R Studio для аналізу факторів які впливають на енергоспоживання.....	48

### ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

<b>В.В. Кирик, В.А. Халіков.</b> Модернізація універсальної розрахункової моделі енергосистеми УРМЕС-2.....	54
<b>Г.Г. Панченко.</b> Огляд стану і перспектив розвитку енергетичного аналізу.....	60
<b>Я.М. Демчик, В.П. Розен.</b> Оцінки похибки прогнозних моделей та прогнозів спожитої електричної енергії на об'єктах енергетичного ринку.....	69
<b>П.В. Соколовський.</b> Аналіз взаємодії віртуальних електричних станцій та активних споживачів у рамках ієрархічної системи при обмеженнях лібералізованих енергоринків.....	79

### ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<b>Г.В. Мельничук.</b> Енергоменеджмент населених пунктів та територій на основі інтелектуальних систем керування електроживленням.....	88
<b>О.О. Закладний.</b> Енергетична ефективність вентиляного двигуна.....	99
<b>П.О. Барабаш, А.С. Соломаха, В.В. Серeda, М.В. Совінський.</b> Дослідження гідродинаміки при течії плівки рідини вертикальною поверхнею з повздовжнім оребренням.....	106

### МІЖГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ І СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ

<b>Г.Г. Стрелкова, М.Т. Стрелков, І. Данго.</b> Індикаторний аналіз передумов розгортання інноваційних рішень для розширення доступу до електроенергії в країнах на південь від Сахари.....	113
<b>Ч. Вейце, Г. Варламов, С. Ронгфенг, Л. Сусянг.</b> Експериментальне вивчення особливостей виробництва біогазу піролізом кукурудзяних пелет.....	121

### ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ

<b>Н.С. Ремез, В.О. Броницький.</b> Оцінка ризиків при освоєнні природо-техногенних середовищ.....	128
<b>Т.В. Гребенюк, О.Я. Тверда, М.В. Репін.</b> Визначення раціонального показника вологості при спалюванні твердих побутових відходів.....	134
<b>В.Д. Погребенник, А.А. Нестер.</b> Очищення стічних вод гальванічних виробництв: екологічні та економічні аспекти.....	142
Вимоги до оформлення статей.....	148

## CONTENTS

### MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

<b>S. Shevchuk, S. Zaichenko.</b> Securing reliability and justification of service life of electromechanical equipment for elevator group of a multi floor building.....	7
<b>V. Nizimov, V. Khomenko.</b> Technical and energy indicators of mean power autonomous synchronous generator .....	14
<b>V. Kalinchyk, V. Kalinchyk.</b> Production environment assessment with discrete presentation.....	21
<b>N. Zuiivska, L. Shaidetska, V. Gubashova.</b> Influence of performance of elements of jet grouting on the physical and mechanical characteristics of the surrounding soil massif .....	27
<b>M. Kovalenko, O. Tymoshchuk, O. Samoylenko.</b> Development of an device for small power direct current motors testing with electromagnetic excitation.....	35
<b>M. Lohvyniuk, Y. Novakivskyi.</b> Increasing of reability of work of boilers by equal distribution of the heat load over the height of firebox .....	42
<b>O. Ishchenko.</b> Application of R Studio tools for analysis of factors affecting energy consumption .....	48

### ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

<b>V. Kyryk, V. Khalikov.</b> Modernization of the universal analog model of the energy system YPMEC-2 .....	54
<b>G. Panchenko.</b> Review of the state and prospects of energy analysis development .....	60
<b>Ya. Demchik, V. Rozen.</b> Estimations of error of prognosis models and prognoses of the used electric energy are on objects of power market .....	69
<b>P. Sokolovskyi.</b> The virtual power plan interaction and active consumers analysis, in the framework of the hierarchical system with the liberalized limitations .....	79

### ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

<b>H. Melnychuk.</b> Energy management of settlements and territories based on intellectual systems of power supply control.....	88
<b>O. Zakladnyi.</b> Quality of electricity conversion brushless electric motor.....	99
<b>P. Barabash, A. Solomakha, V. Sereda, M. Sovinskyi.</b> Study of the hydrodynamics of the liquid film flow on a vertical surface with longitudinal finning .....	106

### CROSS-SECTORAL PROBLEMS AND SYSTEM STUDIES IN THE FUEL AND ENERGY SECTOR

<b>H. Strelkova, M. Strelkov, I. Dango.</b> Indicator-based analysis of preconditions for deployment of innovative solutions for expanding access to electricity in sub-Saharan countries .....	113
<b>Z. Weijie, G. Varlamov, S. Rongfeng, L. Suxiang.</b> Experimental study of features biogas production by pyrolysis of corn pellets .....	121

### ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

<b>N. Remez, V. Bronytskyi.</b> Estimation of risks for development of naturally technogenic environments .....	128
<b>T. Hrebenuik, O. Tverda, M. Repin.</b> Definitions of a rational indicator of humidity at combustion of municipal solid waste.....	134
<b>V. Pohrebennyk, A. Nester.</b> Purification of sewages galvanic productions: ecological and economic aspects.....	142
Requirements for the articles .....	148

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

---

S. Shevchuk, Prof. Dr., ORCID 0000-0002-7517-0501  
S. Zaichenko, Prof. Dr., ORCID 0000-0002-8446-5408  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## SECURING RELIABILITY AND JUSTIFICATION OF SERVICE LIFE OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT FOR ELEVATOR GROUP OF A MULTI FLOOR BUILDING

**Abstract.** *Elevators belong to the high risk mechanisms, so their reliable and safe operation is an important task in the construction of various real estate objects, especially multi-storey buildings. Ensuring for the reliable operation of elevators can be done in different ways. This is first of all the use of modern highly reliable electromechanical equipment and technologies for the manufacture and installation of elevator installations, the use of non-traditional kinematic circuits of the structural device of elevators, which allow to reduce the number of units of equipment in the elevator installation. And in the period of operation is the use of effective systems of technical diagnostics, maintenance and repair in order to prevent equipment failures and timely and quality updating. The booking of elevators number, in more than 2 or 3 installations in the group of elevators of a single building gives a significant result in improving of the reliability of the operation of elevators of multi-storey buildings, that simultaneously contributes to reducing the period of time for applications for the carriage of passengers. For countries such as Ukraine, the problem of operating an elevator system is the outdated fleet of existing elevators, exceeding of the regulatory terms of their operation with the simultaneous mass growth of new buildings, in addition, further complicated by the lack of a sufficient number of qualified maintenance staff with sufficient material incentives and outflow. Therefore, the urgent problems of the present are the establishment of reasonable operating times of single elevator installations, reliability indicators of the group of elevators, the optimal amount of their reservation, ensuring their diagnostics and reforming of the maintenance and repair system in accordance with the features of today's requirements of operation of a complex elevator economy as an important component of high-functioning infrastructure cities. These studies are carried out with the application of queuing theory and reliability of reserved passenger transportation systems, analytical methods for investigating of the technical reliability of the operation for elevator installations.*

**Key words:** *elevator group, indicators of reliability, failure rate, renewal rate, status graph, readiness function, readiness factor, service life.*

**Introduction.** The most common of all types of elevators are passenger elevators, which are found in every high-rise building. 20.3 million elevators are operated worldwide, China is the leader in the number of elevators - 4.67 million elevators (23% of the world). There are 6.1 million elevators operating in Europe, 1 million elevators in the United States, 9% of them are in New York. There are 86,000 elevators in Ukraine, of which 60% have been in operation for over 25 years. There are 22,428 elevators operated in Kyiv, of which 10,404 elevators (46.4%) have been in operation for over 25 years (in the year 2017). The most powerful elevator manufacturers are: OTIS, Swiss-based Schindler, Asian companies Toshiba, Hyundai, Mitsubishi, Thyssen Krupp - Germany, KONE - Finland; in the post-soviet area - Mogilev, Karacharovsky and Shcherbinsky elevator plants.

There is a tendency of mass growth of the elevator park with a simultaneous insufficient number of qualified service personnel to date, which requires the creation of the more modern system for routine preventive works, maintenance, diagnosis and repair.

The main qualitative indicators of the functioning of passenger lifts is the safety and reliability of their



operation. There are some contradictions between these indicators. Thus, more sophisticated designs, control circuits and elevator protection are achieved by increasing safety, which, on the other hand, causes a decrease in the reliability of the installation. The elevator installation is a complex mechatronic system [1], reliable operation of which is determined not only by the reliability of the equipment, the system of maintenance and repair, but also by a number of factors of external influence- change of temperature, which promotes the appearance of condensate, dust, vibration, vandalism and more. Single reliability indicators of elevators can serve: probability of failure-free operation, intensity of failures, intensity of updates, term of time to failure and others. Complex reliability indicators include: the readiness function and the readiness factor.

An elevator is a complex electromechanical system with serially connected elements (Fig. 1). Failure of any elements cause the entire installation to fail. The reducing of the number of nodes will lead to increased reliability, so the progressive directions of creating modern lifting installations are [2-5]: gearless winch with frequency-controlled motor, endless lift with the use of a linear motor on the elevator cabin (Mitsubishi Electric Corporation). Advantages of such installations: absence of ropes, reducer, counterweights. The downside is the high power of the drive, which reduces safety.

Reserving of the number of elevators (group of elevators) in multi-story buildings significantly increases the functional reliability for passenger transportation, but leads to more expensive buildings. Finding a compromise between cost and reliability indicators is unlikely, but at least quantifying the values of reliability indicators for their future legislative approval is an urgent scientific and technical challenge today.

On the other hand, the growth of the elevator park, their unit price and the limited working capital make it impossible for them to be dismantled and replaced in timely manner, which facilitates the operation of the elevators by exceeding the regulatory terms of their operation and reducing the reliability and safety indicators.

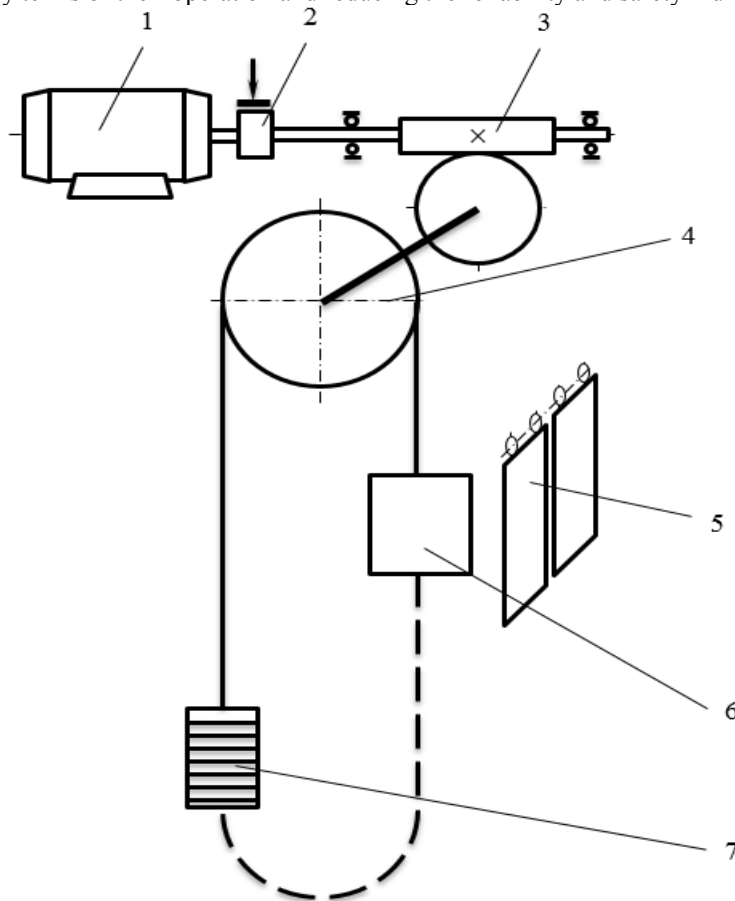


Fig. 1 Elevator installation scheme:

- 1- electric motor; 2- clutch with brake; 3 - gear; 4 - a friction pulley; 5 - door block; 6 - a cabin for passengers; 7 – counterweight

Today there is no justification for the lifespan of elevators with specified reliability and safety indicators. Technical regulations of the Customs Union [6] set the total lifespan of all types of elevators in 25 years, which cannot be considered justified.

**The goal of the work.** To obtain quantitative values for the reliability of the elevator group, depending on the number of elevators in the group, and justify their lifespan.

**The idea of the work** is to establish in a statistical way the dependence of the reliability of the elevator group on the number of elevators in this group, as well as to justify the end-of-life of the elevator group, based on the criterion of performance of at least one elevator from the group. It was proposed to take the group of elevators as considered functionally operable to the operating time to failure of at least one elevator from the group exceeds the renewal time of other elevators after their simultaneous failure.

**Materials and methods.** According to State standards DSTU 2860-94, a group of elevators in a multi-story building should be classified as a variable-reserve facility, the bulk of the equipment operating in a loaded reserve for the purpose of faster passenger service. Therefore, the main research method is the theory of reliability of redundant systems with elements of the theory of probability and the analytical method of studying the reliability indicators of elevators.

A quality maintenance and repair system (MRS) is of particular importance in ensuring the reliable operation of elevators. We should bear in mind that due to the limited availability of qualified service personnel of the elevators for MRS is carried out by the mass service system (MSS) with expectation, and more specifically - by the MSS with unlimited expectation, when there are successive periods of time for normal operation of the elevator, exit it is out of order, waiting periods and repairs.

**Research results.** As each elevator in the group consists of consecutively connected nodes, so the trouble-free operation of the elevator is possible with the trouble-free operation of each node. Assuming that the possible failures of the nodes are independent, then the failure rate of the elevator  $\lambda(t)$  is equal to the sum of the intensity of its nodes  $\lambda_i(t)$  at any distribution of the output of the nodes before the operation time to failure.

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \tag{1}$$

Figure 2 shows a typical failure rate function, which shows three periods of I - flushing; II - normal operation; III - aging. In the period of III, there has been an over-standard operation of elevators for more than 25 years. Time to failure (in case of exponential random of distribution law) will be

$$T_f = 1 / \lambda. \tag{2}$$

The dependence of this indicator of the reliability of the elevator on the operating time is shown by the dashed line in Fig. 2.

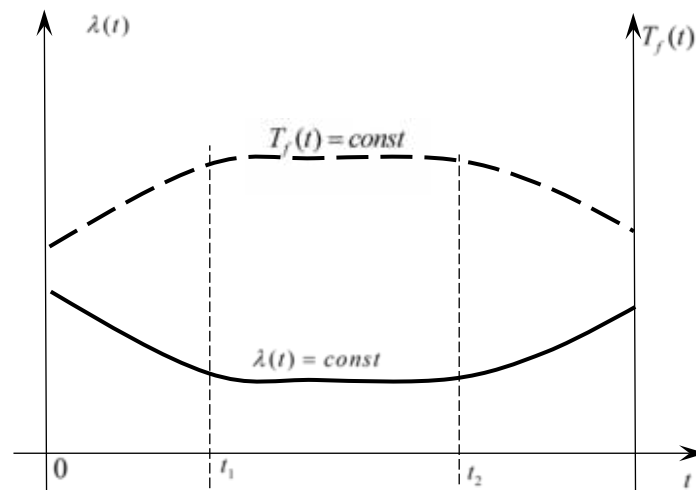


Fig. 2 Dependence of average intensity and time of work before the average period of exploitation

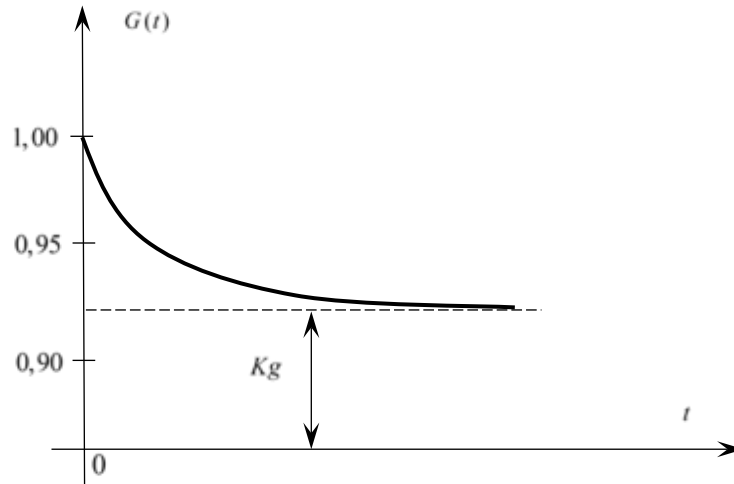
Intensity of renewal of work of the elevator  $\mu$  for troubleshooting of its work - inversely proportional to the period of renewal  $T_r$

$$\mu = 1 / T_r ; T_r = T_w + T_{rep} \tag{3}$$

where  $T_w$  - the period of waiting time from the moment of failure of the lift and before its repair (according to the theory of QMS with expectation);  $T_{rep}$  - period of time of repair of the lift.

The readiness function  $G(t)$  is a complex index of reliability because it depends on the characteristics of renewal and uptime. As a rule, the ready function has the form shown in Fig. 3. The coefficient of readiness  $K_g$  represents the asymptotic (constant) value of the function of readiness with unlimited time growth -  $t \rightarrow \infty$  (fig. 3).

Fig. 3 Readiness function



Readiness function and readiness factor for a single lift from a group of elevators will be written:

$$G_o(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (4)$$

$$K_g^o = \lim_{t \rightarrow \infty} G_o(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}.$$

To obtain the dependence of the readiness function for a group of elevators, we use the differential equation method for the possible variants of the technical states of such a system, as shown by the corresponding state graphs in Fig. 4 (in case for two lifts).

The system of differential equations, for example, for the case of the state of a group of elevators according to the graph in Fig. 4, is written in the form

$$\begin{aligned} P_0(t) &= \lambda \cdot P_0(t) + \mu \cdot P_1(t), \\ P_1(t) &= \lambda \cdot P_0(t) - \lambda \cdot P_1(t) - \mu \cdot P_1(t) - 2\mu \cdot P_2(t), \\ P_2(t) &= \lambda \cdot P_1(t) - 2\mu \cdot P_2(t), \end{aligned} \quad (5)$$

To solve the system of differential equations (5) it is necessary to consider that  $P_0 + P_1 + P_2 = 1$  and initial conditions at  $t=0$ :  $P_0(0)=1, P_1(0)=P_2(0)=0$ .

Using the forward and reverse Laplace transforms, we will obtain:

$$G_c(t) = 1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda + \mu)^2 + \mu^2} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + 4\lambda\mu}} \cdot (y_2 \cdot e^{y_1 t} - y_1 \cdot e^{y_2 t}) \right], \quad (6)$$

$$K_g^c = \frac{(1 + \lambda / \mu)}{(1 + \lambda / \mu)^2 + 1}, \quad (7)$$

where  $y_{1,2} = -\frac{2\lambda + 3\mu \pm \sqrt{\mu^2 + 4\lambda\mu}}{2}$ .

The reliability indicators for the other service options are solved analytically, they are shown in Fig. 4, *a, b, c* –  $G_a(t)$ ,  $K_g^a$ ,  $G_b(t)$ ,  $K_g^b$ .

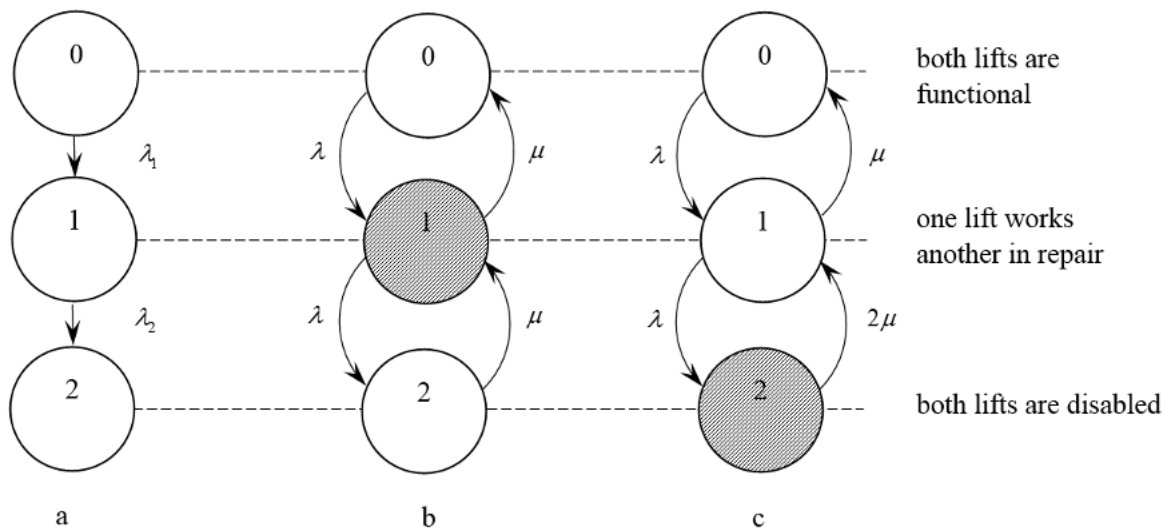


Fig. 4 status graphs of the elevator group : *a* - without updating; *b* - with renewal; *c* - with unlimited updates

The group of elevators must function smoothly between the repairs of each of the elevators. To determine the conditions for the probability of such trouble-free operation state 2 on the graphs of Fig. 4, *a, b* must be absorbing, which is reflected by the risks. Performing actions similar to (5), (6), we will obtain

$$P_{a,b}(t) = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \cdot (Z_2 \cdot e^{Z_2 t} - Z_1 \cdot e^{Z_1 t}), \quad (8)$$

where  $Z_{1,2} = -\frac{\mu + 2\lambda \pm \sqrt{\mu^2 + 4\lambda\mu}}{2}$ .

The result (8) allows us to determine the average uptime of a group of elevators

$$T_f = \int_0^\infty P(t) dt; \quad T_f^a = \frac{3}{2\lambda}; \quad T_f^b = \frac{\mu + 2\lambda}{\lambda^2}. \quad (9)$$

The time increasing to failure will be:

$$\frac{T_f^b}{T_f^a} = \frac{2(\mu + 2\lambda)}{3\lambda}. \quad (10)$$

Thus, at values  $\lambda = 0,051h^{-1}$ ,  $\mu = 0,11h^{-1}$  the average uptime of (10) is increased three times, which shows the significant advantages of the reliability index of the redundant system of two elevators when their working time (quality system of MR) is renewed.

Fig. 5 shows the dependences of the readiness functions  $G(t)$  determined for the states according to Fig. 4, *a, b, c*, as well as for a single elevator  $G_o(t)$  by (4) at the same values  $\lambda$  and  $\mu$  to compare the different renewal options and the number of lifts in the group. The readiness coefficients are:  $kg^0 = 0.67$ ,  $kg^a = 0.72$ ,  $kg^b = 0.85$ ,  $kg^c = 0.92$ .

The refore, the highest reliability rates are found for a group of 2 or more elevators with an after-failure system without restriction (function  $G_c$ , coefficient of readiness  $Kg^c = 0,92$ ).

Taking into account the possibility of secondary and multiple failures, as well as the possibility of irreversible functional damage of the elevators during their wear during operation, there is a gradual irreversible reduction to the cutting to the failures of  $T_f(2)$ , (9) and the increase of periods of renewal after failures of  $T_f(3)$ . Changes in these indicators are shown in Fig. 6 for two and three lifts in the group.

In this case, the coefficient of readiness  $Kg$  through these indicators with (3) is expressed

$$K_g = \frac{T_f}{T_f + T_r} = \frac{T_f}{T_f + T_w + T_{rep}}. \quad (11)$$

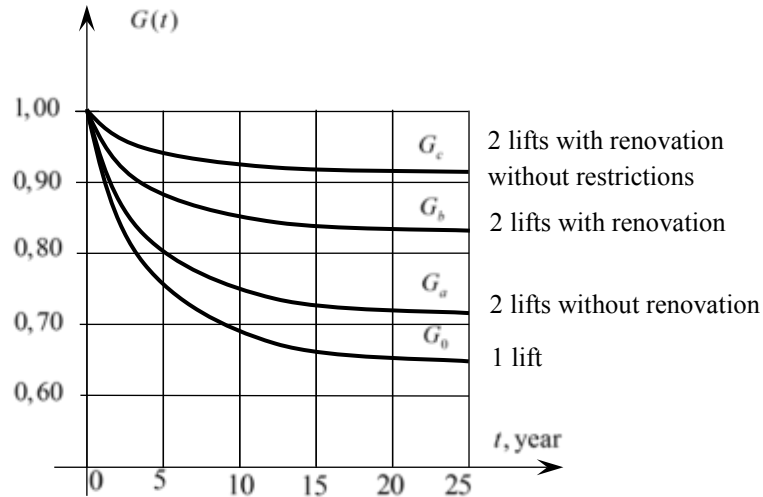


Fig. 5. Function graphs of the elevators readiness for various upgrade options

$K_g$  decreases at considerable periods of operation of elevators, especially more than 25 years, at the expense of the numerator (decrease of  $T_f$ ), and at the expense of the denominator (increase of  $T_{rep}$ ).

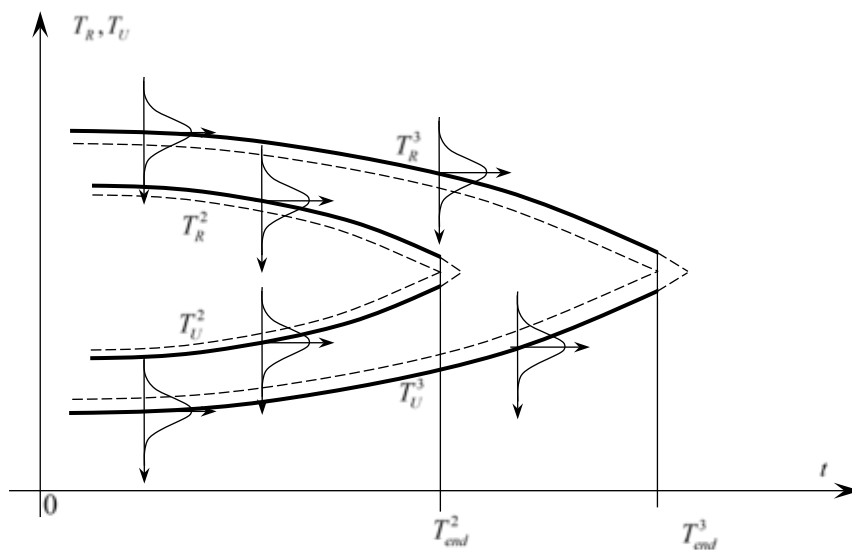


Fig. 6. Trends in changing of probable trial periods for  $T_f$  and failure refurbishment  $T_r$  for groups of two and three elevators

There is a trend of changes of the indicators of  $T_f$  and  $T_r$  (Fig. 6), their equality is critical when the working time for failure of one lift becomes equal to or less than the period of repair of the damaged elevator, and the group of elevators becomes functionally disabled. The periods  $T_{end}^2$ ,  $T_{end}^3$  should be considered as the end-of-life of a group of elevators, followed by their replacement.

**Conclusions.** Reserving up of two or three elevators in a group provides a significant increase in reliability if maintenance and repair is quality with unrestricted upgrade. At the same time, there is a rather high coefficient of readiness  $K_g = 0,92$ , which is advisable to be fixed in the Technical Conditions as a standard set of reliability indicator with the possibility of differentiating its values for different types of elevators and features of their operation.

Supposing the technical condition of the elevators group remains safe for the carriage of passengers, then the deadline for their service should be considered to be the point in time when the period of renewal of the damaged elevator exceeds the period of failure of another working elevator. There is a period of time when the repair periods of both elevators overlap, and the functional purpose of the whole group of elevators is lost.

#### References

1. Arkhangelsky, G.G., Volkov, D.P., Gorbunov, E.A., Ionov, A.A., Tkachenko, V. Ya., & Chutchikov, P.I. (1999). Lifts. / Ed. DP Volkova. Publishing house DIA.
2. Stepanov, M.A., & Mechiev, A.V. (2014). Failure analysis during the operation of elevators. Mechanization of construction, (8), 44-46.
3. Stepanov, M.A., & Mechiev, A.V. (2016). Modeling of the system of maintenance of the lift park. Scientific Review, (3), 27-31.
4. Stepanov, M.A., & Mechiev, A.V. (2016). Determination of the optimal structure of the elevator fleet using the criterion of technical and economic efficiency. Mechanization of construction, 77 (7), 49-51.
5. Mechiev, A.V., Sevryugin, N.S., & Stepanov, M.A. (2017). General methodological approach to assessing the risk of ensuring the structural safety of elevators. Mechanization of construction, 78 (4), 24-29.
6. Technical regulations of the Customs Union (TR CU 011/2011). "Safety of elevators."

УДК 621.823

С.П. Шевчук, проф. д-р, ORCID 0000-0002-7517-0501  
С.В. Зайченко, проф. д-р, ORCID 0000-0002-8446-5408  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ГРУПИ ЛІФТІВ БАГАТОПОВЕРХОВОГО БУДИНКУ

*Ліфти належать до механізмів підвищеної небезпеки, тому надійна та безпечна їх експлуатація є важливим завданням при зведенні різних об'єктів нерухомості, особливо багатоповерхових будівель. Забезпечення надійної експлуатації ліфтів може здійснюватися різними шляхами. Це перш за все застосування сучасного високонадійного електромеханічного обладнання і технологій виготовлення та монтажу ліфтових установок, застосування нетрадиційних кінематичних схем конструктивного влаштування ліфтів, які дозволяють зменшити кількість одиниць обладнання в ліфтовій установці. А в період експлуатації – це застосування ефективних систем технічного діагностування, обслуговування і ремонту з метою упередження відмов обладнання та своєчасного і якісного його поновлення.*

*Суттєвий результат в підвищенні надійності експлуатації ліфтів багатоповерхових будівель надає резервування їх кількості, до більше ніж 2,3 установки в групі ліфтів окремої будівлі, що одночасно сприяє скороченню терміну часу виконання заявок на перевезення пасажирів. Для таких країн, як Україна, проблемою експлуатації ліфтового господарства являється застарілість парку існуючих ліфтів, перевищення нормативних термінів їх експлуатації з одночасним масовим ростом новобудов, що крім того додатково ускладнюється відсутністю достатньої кількості кваліфікованого обслуговуючого персоналу з їх достатнім матеріальним заохоченням та відтоком працездатного населення. Тому нагальними проблемами сьогодення є встановлення обґрунтованих термінів експлуатації одиночних ліфтових установок, показників надійності експлуатації групи ліфтів, оптимальної кількості їх резервування, забезпечення їх діагностування та реформування системи технічного обслуговування і ремонту у відповідності з особливостями сьогоденних вимог експлуатації складного ліфтового господарства як важливої складової інфраструктури функціонування високонаселених міст. Ці дослідження в роботі проводяться із застосуванням теорії масового обслуговування та забезпечення надійності резервованих систем обслуговування пасажироперевезень, аналітичних методів дослідження технічної надійності функціонування ліфтових установок.*

**Ключові слова:** група ліфтів, показники надійності, інтенсивність відмов, інтенсивність поновлення, граф стану, функція готовності, коефіцієнт готовності, термін служби.

Надійшла 03.10.2019

Received 03.10.2019

УДК 621.313.322

В.Б. Нізімов, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4580-5262  
Дніпровський державний технічний університет, м Кам'янське  
В.І. Хоменко, канд. техн. наук, викладач вищої категорії, ORCID 0000-0003-0722-2573  
Придніпровський державний металургійний коледж, м Кам'янське

## ТЕХНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ

*Покращення енергетичних показників збуджувачів вмиканням нульових діодів та конденсаторів призводить до суттєвої зміни гармонічного складу напруги збудження. В роботі проведено дослідження гармонічного складу напруги збудження синхронних генераторів (СГ) із несиметричними мостовими збуджувачами із застосуванням вузлів примусової ємнісної комутації. Результати зробленого спектрального аналізу свідчать про те, що напруга збудження при номінальному режимі роботи генератора містить значну третю гармоніку, яка складає 66 відсотків від амплітуди першої гармоніки. Значна величина третьої гармоніки обумовлена великими кутами керування тиристорами збуджувача в номінальному режимі роботи синхронного генератора. Через значну третю гармоніку вторинна обмотка випрямного трансформатора повинна бути з'єднана у трикутник. Присутність парних гармонік викликана несиметрією напруги по відношенню до осі абсцис. Виконано дослідження режимів гасіння поля при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора СГ з використанням вузлів примусової ємнісної комутації. Наведено розрахункові залежності та експериментальні режими процесів гасіння поля СГ.*

**Ключові слова:** автономна генеруюча установка, синхронний генератор, вузли примусової ємнісної комутації.

### Вступ

Основним режимом роботи синхронних генераторів автономних генеруючих установок (АГУ) є режим близький до номінального. Однак, при підключенні до АГУ споживачів співставної потужності, для стабілізації вихідної напруги генератора застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження впливом на кути керування тиристорами збуджувача. Оскільки коефіцієнт форсування за напругою лежить в межах 3...5 відносних одиниць (в.о.) в залежності від потужності СГ, це призводить до значних кутів керування тиристорами збуджувача в номінальному режимі та викликає споживання значної реактивної потужності збуджувачем і зниження енергетичних показників.

Для підвищення енергетичних показників мостових збуджувачів, особливо несиметричних, застосовують конденсатори в силових колах збуджувального трансформатора [1], або використовують два нульових діоди, які з'єднані послідовно і підключені до виходу збуджувача. Загальна їх точка підключена через конденсатор до нуля живильного трансформатора [2]. Суттєве покращення енергетичних показників може бути отримане з використанням вузлів примусової ємнісної комутації [3].

Однак, покращення енергетичних показників вмиканням нульових діодів, конденсаторів та вузлів примусової комутації призводить до суттєвої зміни гармонічного складу напруги збудження.

Крім того, у випадку короткого замикання (КЗ) в мережі, яку живить АГУ, аварійний режим ліквідується максимальним струмовим захистом. При внутрішніх коротких замиканнях обмотки статора генератора для обмеження обсягу руйнування необхідне форсоване гасіння поля. Форсоване гасіння поля може бути виконано з вмиканням розрядного резистора автоматом гасіння поля (АГП), переведенням збуджувача в режим інвертування або застосуванням імпульсно-дугових комутаторів. Використання АГП в тиристорних системах збудження є недоцільним через можливість виникнення перенапруг, а режим інвертування збуджувача принципово є неможливим при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора синхронного генератора. Характерною рисою несиметричних збуджувачів є те, що при знятті керуючих імпульсів останні продовжують жити обмотку збудження. Тому форсування гасіння поля у випадку короткого замикання може бути забезпечено вузлом примусової ємнісної комутації.

### Постановка задачі

Метою роботи є дослідження впливу вузла примусової ємнісної комутації на гармонічний склад напруги збудження та режимів гасіння поля при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора СГ.

### Результати досліджень

Експериментальне дослідження енергетичних показників виконано для несиметричних мостових збуджувачів із застосуванням вузлів примусової ємнісної комутації [3]. При цьому не розглянуто вплив вузлів примусової ємнісної комутації на гармонічну складову напруги збудження та не визначено можливі режими гасіння поля при внутрішніх КЗ обмоток статора СГ.

© В.Б. Нізімов, В.І. Хоменко, 2019

Принципова схема дослідженої системи збудження наведена на рис.1.

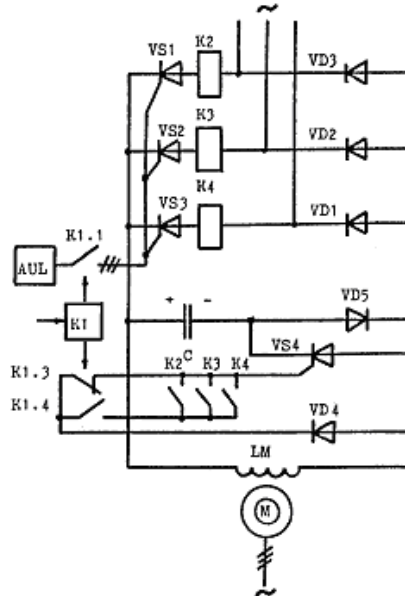
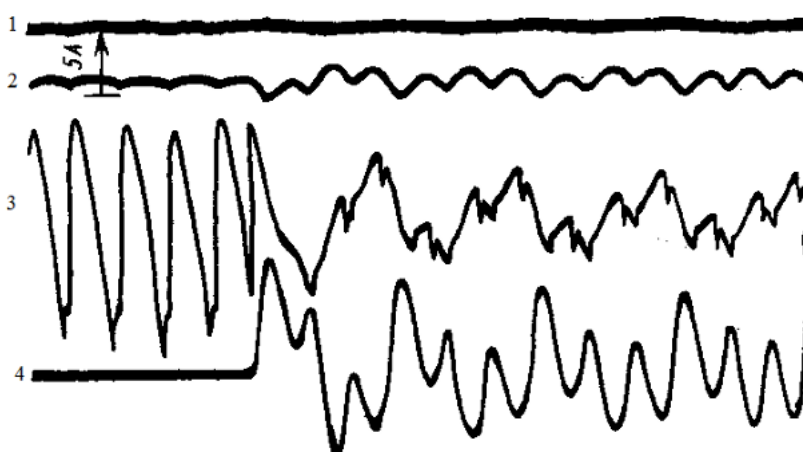


Рисунок 1 – Принципова схема несиметричного мостового збуджувача з примусовою ємнісною комутацією

При несиметричному збуджувачі керуючі сигнали на тиристри катодної групи подаються від блоку імпульсно-фазового керування AUL через ключ K1.1.

Під час комутації тиристорів катодної групи тиристорного збуджувача (ТЗ) по черзі спрацьовують герконові реле K2, K3, K4. Своїми ключами вони замикають коло керування комутуючим тиристором VS4 і послідовно через ключ K1.4 діод VD4 підмикає її до обмотки збудження LM, яка в цій схемі є автономним джерелом енергії. Якщо миттєве значення електрорушійної сили (е.р.с.) ТЗ стає менше, ніж напруга конденсатора С, то вмикається комутуючий тиристор VS4, і конденсатор С розряджається на ОЗ LM, що призводить до зменшення пульсацій напруги на обмотці збудження. Якщо ж миттєве значення е.р.с. ТЗ вище, ніж початкова напруга на конденсаторі С, то останній заряджається. При негативному значенні миттєвої е.р.с. ТЗ, що зазвичай має місце в режимі номінального збудження СГ, накопичена в індуктивності ОЗ LM електромагнітна енергія виводиться по контуру: ОЗ LM – комутуючий тиристор VS4 – конденсатор С – ОЗ LM, а не повертається в мережу, зменшуючи тим самим встановлену потужність збуджувального трансформатора.

Для дослідження гармонічного ряду використовується експериментально отримана крива напруги збудження [3], яка розкладається в ряд Фур'є (рис.2).



1 – струм обмотки збудження; 2 – струм мостового ТЗ;  
3 – е.р.с. мостового ТЗ; 4 – струм комутуючого конденсатора

Рисунок 2 – Осцилограма номінального збудження СГ при підключенні вузла примусової ємнісної комутації

Вираз для напруги  $u(t)$  представлений рядом Фур'є



$$u(t) = U_0 + \sum_{\nu=1}^n U_{\nu m} \sin(\nu \omega t + \psi_{\nu}), \quad (1)$$

де  $U_0$  – постійна складова;  $U_{\nu m} \sin(\nu \omega t + \psi_{\nu})$  – гармоніки  $\nu$ -го порядку з амплітудою  $U_{\nu m}$  і початковою фазою  $\psi_{\nu}$ ;  $n$  – порядок (номер) останньої з вищих гармонік, що враховуються.

Амплітуди і початкові фази гармонік можуть бути знайдені через ортогональні проекції  $U_{\nu a}$  і  $U_{\nu p}$ :

$$U_{\nu m} = \sqrt{U_{\nu a}^2 + U_{\nu p}^2}. \quad (2)$$

Крива напруги, яка експериментально отримана, наведена на рис. 3.

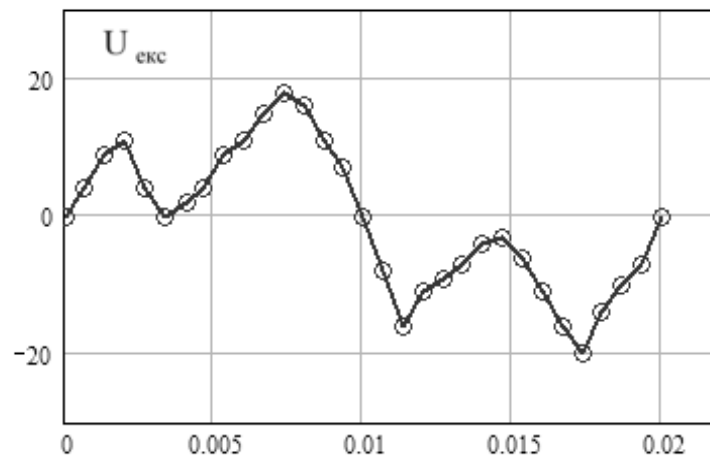


Рисунок 3 – Експериментальна крива напруги збудження СГ

При розкладанні в ряд Фур'є враховані 15 гармонік. Гармонійний склад напруги збудження наведений на рис. 4. Причому є присутніми як парні, так і непарні гармоніки, оскільки напівперіоди початкової кривої на рис. 3 несиметричні по відношенню один до одного.

$$(U_{\nu m} / U_{1m}) \cdot 100\%$$

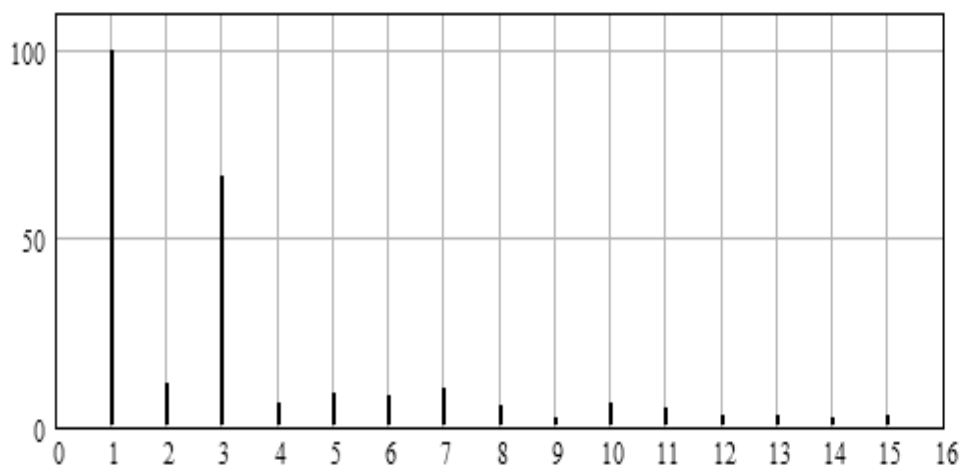


Рисунок 4 – Амплітудний спектр напруги збудження СГ

Після обчислень сума п'ятнадцяти гармонік ряду прийме вигляд:

$$\begin{aligned}
 u(t) = & 11,89 \sin(\omega t - 12,7^\circ) + 1,33 \sin(2\omega t - 166,4^\circ) + 7,89 \sin(3\omega t + 31,5^\circ) + \\
 & + 0,74 \sin(4\omega t + 108,3^\circ) + 1,02 \sin(5\omega t - 72,2^\circ) + 0,97 \sin(6\omega t - 121,01^\circ) + \\
 & + 1,24 \sin(7\omega t - 96,7^\circ) + 0,68 \sin(8\omega t + 116,4^\circ) + 0,29 \sin(9\omega t - 58,9^\circ) + \\
 & + 0,77 \sin(10\omega t + 64,2^\circ) + 0,57 \sin(11\omega t + 92,6^\circ) + 0,36 \sin(12\omega t + 23,2^\circ) + \\
 & + 0,37 \sin(13\omega t + 142,7^\circ) + 0,286 \sin(14\omega t - 107,6^\circ) + 0,32 \sin(15\omega t + 78,1^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

У координатних осях побудований графік за даними експериментальної кривої (рис. 3) та розрахований за виразом (3). Результати побудови показані на рис. 5, які підтверджують якість апроксимації.

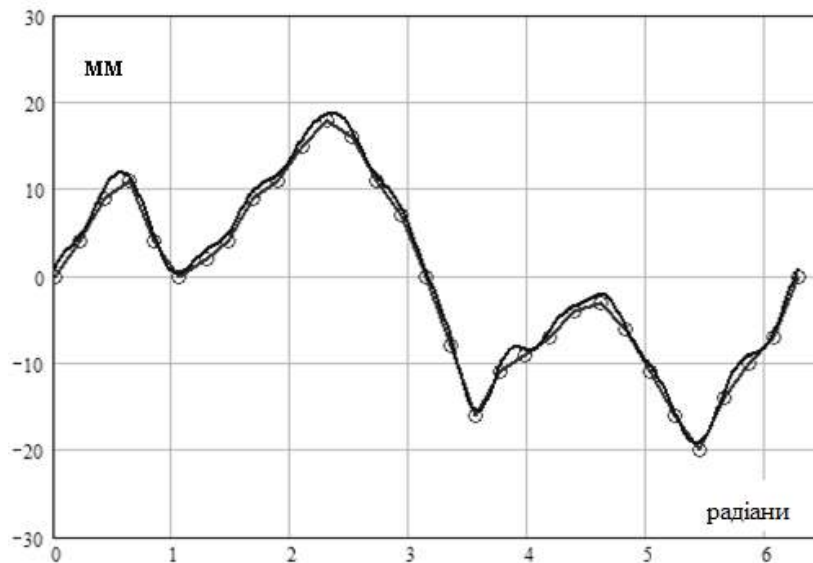


Рисунок 5 – Експериментальна крива напруги та її апроксимація п'ятнадцятьма гармоніками тригонометричного ряду

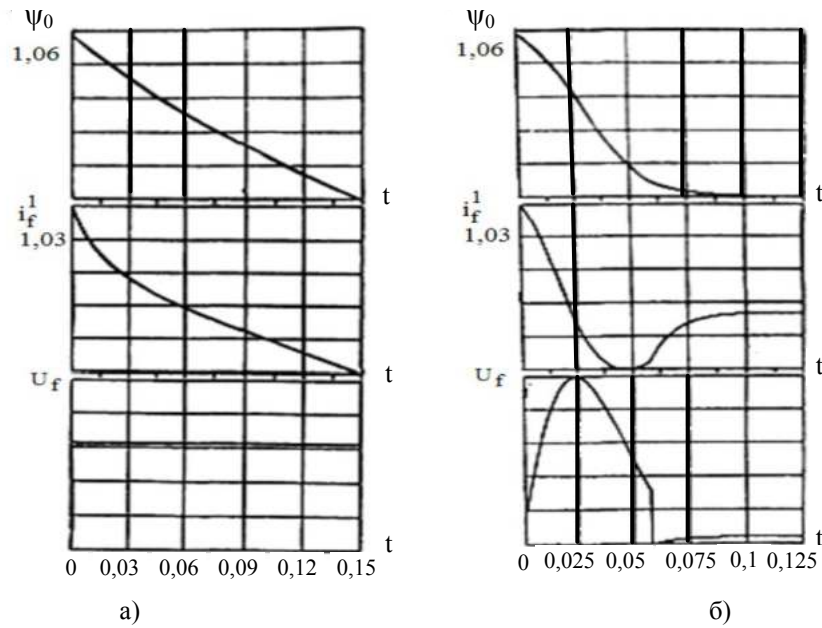
Форсоване гасіння магнітного поля СГ здійснюється наступним чином. Блоком К1 за сигналом максимально-струмового або нульового захистів (впливають також на комутаційний вимикач статора) розмикається ключ К1.4, а потім з витримкою часу, відповідно 1 ... 3 періодам живлячої напруги, знімаються керуючі сигнали з ТЗ ключами К1.1 і К1.2 і замикається ключем К1.3. При повному зникненні живлення збуджувального трансформатора напруга на ЄНЕ буде вище е.р.с. ТЗ, а при частковій посадці напруги мережі згаданий конденсатор С за 1 ... 3 періоди живлячої напруги зарядиться через діод VD5 до максимального значення миттєвої е.р.с. ТЗ. Ключ К1.3 замикаючись вмикає тиристор VS4 через діод VD4 від е.р.с. обмотки збудження. Далі попередньо заряджений конденсатор С вмикає тиристри ТЗ та розряджається у контурі, утвореному плюсовою обкладкою конденсатора С – ОЗ LM – тиристор VS4 – мінусовою обкладкою конденсатора С. Тиристор VS4 вмикається в момент досягнення струмом нульового значення, після чого перезаряджений у процесі гасіння поля конденсатор С розряджається на ОЗ LM через діод VD5, змінюючи напрямок струму в останній.

Енергетика розробленої схеми була досліджена експериментально на синхронній машині типу ЕСС-52 – 4У2, потужністю 5 кВт, 1500 об/хв. В якості статичного збуджувача застосовувався серійний тиристорний перетворювач типу ВУК-50/500 з живленням силового мосту від узгоджувального трансформатора 1,5 кВА, 220/20 В. Функції комутуючої ємності виконував конденсаторний фільтр ФСТ – 0,75–300У2, 300 мкФ, 0,75 кВ. Енергетичні показники збуджувачів розраховувалися на підставі експериментальних даних для номінального і форсованого збудження СГ у відповідності з методикою, наведеною в [4].

Для порівняльної оцінки різних пристроїв збудження отримані розрахункові залежності режиму гасіння поля СГ для таких даних: момент статичного опору  $m = 0,1$  в.о.;  $K_u = 1,7$ ;  $C = 250$  мкФ (рис. 6).

Аналіз розрахункових залежностей показує, що найбільш інтенсивне гасіння поля СГ відбувається при включенні електричної ємності в ОЗ.

З метою підтвердження основних теоретичних положень були проведені експериментальні дослідження модельного СГ.



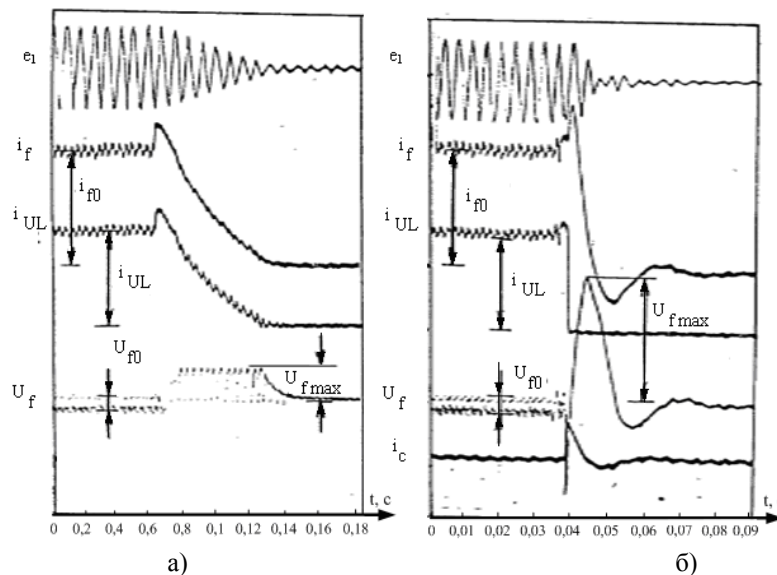
а) при інвертуванні збуджувача,  $K_u=1,7$ ; б) при вмиканні в ОЗ з електричною ємністю  $K_c=8,3$

Рисунок 6 – Розрахункові залежності процесів гасіння поля модельного СГ

На рис. 7, а наведена осцилограма процесу гасіння поля СГ при переводі збуджувача в режим інвертування з форсуванням напруги рівної  $K_u=2,2$ . Час досягнення струмом збудження нульового значення склав 0,154 с.

На рис. 7, б наведена осцилограма процесу гасіння поля СГ з електричною ємністю і зворотним розрядом перезарядженої останньої у процесі гасіння поля. Кратність максимального значення перехідної напруги на обмотці збудження склала  $K_u=8,0$ . Час досягнення струмом збудження нульового значення склав 0,05 с.

Таким чином, найбільш ефективним є пристрій з вузлом примусової ємнісної комутації, що забезпечує високу швидкість режиму гасіння поля при відносно низькому рівні перенапруг на обмотці збудження синхронного генератора, незалежно від наявності та величини напруги живлення збуджувача.



а) при інвертуванні збуджувача при живленні останнього від незалежного джерела;  
б) при використанні вузла примусової ємнісної комутації

Рисунок 7 - Осцилограми процесу гасіння поля СГ

#### Висновки

1. Результати розкладання в ряд Фур'є напруги збудження мостового несиметричного збуджувача синхронного генератора свідчать, що третя гармоніка складає 66% від амплітуди першої гармоніки. Значна величина третьої гармоніки обумовлена великим кутом керування тиристорами збуджувача при номінальному режимі роботи синхронного генератора. Через значну третю гармоніку вторинна обмотка випрямного трансформатора повинна бути з'єднана у трикутник. Несиметрія напруги збудження по відношенню до осі абсцис викликає присутність парних гармонік.

2. Найбільш ефективним режимом гасіння поля при внутрішніх коротких замиканнях обмоток статора є пристрій з використанням вузлів примусової ємнісної комутації.

#### Список літератури

1. Баев А.В. Вентильные преобразователи с конденсаторами в силовых цепях / А.В., Баев, Ю.К. Волков, В.П. Долинин, В.Я. Корнеев. – М.: Энергия, 1969. – 236 с.
2. Кашкалов В.И. Улучшение энергетических показателей управляемых вентилях / В.И. Кашкалов, Б.И. Половинкин. – К.: Техника, 1988. – 159 с.
3. Низимов В.Б. Влияние принудительной емкостной коммутации на энергетические показатели мостовых возбудителей / В.Б. Низимов, С.В. Колычев, П.С. Розумный // *Электротехника*, 1990, №4.
4. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

V. Nizimov, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-4580-5262

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

V. Khomenko, Cand. Sc. (Eng), lecturer, ORCID 0000-0003-0722-2573

Prydniprovsky State Metallurgical College, Kamianske

## TECHNICAL AND ENERGY INDICATORS OF MEAN POWER AUTONOMOUS SYNCHRONOUS GENERATOR

The energy performance improving of the exciter by switching on the zero diodes and capacitors leads to a significant change in the harmonic composition of the excitation voltage. The study investigates the harmonic composition of the excitation voltage of synchronous generators with asymmetrical bridge exciters using the units of forced capacitive switching. To determine the harmonic composition of the excitation voltage, we decompose the experimental curve into a Fourier series and expressions for calculating the harmonic components. The results of the spectral analysis indicate that the excitation voltage at the rated mode of the generator contains a significant third harmonic, which is 66 percent of the amplitude of the first harmonic. The significant value of the third harmonic is due to the large angles of control of the exciter thyristor in the nominal mode of operation of the synchronous generator. Due to the significant third harmonic, the secondary winding of the rectifier transformer must be connected to a triangle. The presence of even harmonics is caused by the voltage asymmetry with respect to the abscissa. A non-symmetrical bridge exciter with a forced capacitance switching unit for a synchronous generator has been developed, which provides improved energy performance during its nominal operation. The scheme of control of the bridge asymmetrical exciter of the synchronous generator with the node of forced capacitive switching for the rated mode of operation, as well as in the mode of the field suppression at short circuits of the stator windings has been described. The comparative estimation of the suppression modes of the field at a short circuit of the windings of the generator stator with the possible mode of inverting the exciter and using the node of forced capacitive switching has been carried out. Experimental studies have confirmed the calculated dependences of the modes of the magnetic field suppression. The analysis of experimental dependencies shows that the units of forced capacitive switching provide a higher speed of the field suppression modes, regardless of the presence and magnitude of the supply of voltage the exciter.

**Key words:** autonomous generating unit, synchronous generator, nodes of forced capacitive switching.

#### References

1. Baev A.V. Ventil'nye preobrazovateli s kondensatorami v silovykh tsepiakh / A.V. Baev, YU.K. Volkov, V.P. Dolinin, V.YA. Korneyev. – М.: Energiya, 1969. – 236 s.
2. Kashkalov V.I. Ulucheniye energeticheskikh pokazateley upravlyaemykh ventilyey / V.I. Kashkalov, B.I. Polovinkin. – К.: Tekhnika, 1988. – 159 s.
3. Nizimov V.B. Vliyaniye prinuditel'noy emkostnoy kommutatsii na energeticheskiye pokazateli mostovykh vozбудiteley / V.B. Nizimov, S.V. Kolychev, P.S. Rozumnyy // *Elektrotehnika*, 1990, № 4.
4. Maevskiy O.A. Energeticheskie pokazateli ventil'nykh preobrazovateley. – М.: Energiya, 1978. – 320 s.

**В.Б. Низимов**, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-4580-5262  
Днепропетровский государственный технический университет, г. Камянское  
**В.И. Хоменко**, канд. техн. наук, преподаватель высшей категории, ORCID 0000-0003-0722-2573  
Приднепровский государственный металлургический колледж, г. Камянское

## **ТЕХНИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

*Улучшение энергетических показателей возбудителей включением нулевых диодов и конденсаторов приводит к существенному изменению гармоничного состава напряжения возбуждения. В работе проведено исследование гармоничного состава напряжения возбуждения синхронных генераторов (СГ) с несимметричными мостовыми возбудителями с применением узлов принудительной емкостной коммутации. Результаты сделанного спектрального анализа свидетельствуют о том, что напряжение возбуждения при номинальном режиме работы генератора содержит значительную третью гармонику, которая составляет 66 процентов от амплитуды первой гармоники. Значительная величина третьей гармоники обусловлена большими углами управления тиристорами возбудителя в номинальном режиме работы синхронного генератора. Через значительную третью гармонику вторичная обмотка выпрямительного трансформатора должна быть соединенная в треугольник. Присутствие парных гармоник вызвано несимметрией напряжения по отношению к оси абсцисс. Выполнено исследование режимов гашения поля при внутренних коротких замыканиях обмоток статора СГ с использованием узлов принудительной емкостной коммутации. Приведены расчетные зависимости и экспериментальные режимы процессов гашения поля СГ.*

**Ключевые слова:** автономная генерирующая установка, синхронный генератор, узлы принудительной емкостной коммутации.

Надійшла 08.10.2019  
Received 08.10.2019

В.П. Калінчик, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4028-0185  
 В.В. Калінчик, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3931-646X  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЧОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ДИСКРЕТНОМУ ПРЕДСТАВЛЕННІ ІНФОРМАЦІЇ

В роботі розглядаються принципи побудови систем контролю фізичних факторів виробничого середовища, які засновані на застосуванні аналогових датчиків і перетворювачів аналог-частота для передачі інформації. Сукупність джерел інформації контролю шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища розглядається як набір датчиків випадкових процесів. Формування дискретних повідомлень в динаміці відбувається з частотою, що відбиває в часі процес зміни фізичного параметру. При цьому точність вихідної інформації залежить від частоти надходження імпульсів і від інтервалу часу, за який подається інформація. Представлена узагальнена структура системи контролю небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища

**Ключові слова:** небезпечні та шкідливі фактори, виробниче середовище, датчики, перетворювачі.

**Вступ.** У системах контролю параметрів виробничого середовища важливим є оперативне отримання достовірної інформації, що значною мірою обмежується функціональними можливостями датчиків і пропускнуною спроможністю каналів зв'язку. На практиці, як правило, використовуються аналогові датчики як більш прості і набагато дешевші цифрових [1-3]. Проте, в існуючих системах передачі даних за принципом фіксованого розподілу пропускнуною спроможності каналу застосування таких датчиків для створення систем контролю малоефективне.

**Метою роботи** є побудова системи контролю шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища, в основу якої покладено застосування аналогових первинних вимірювачів, підключених до каналів передачі даних через перетворювачі аналог-частота.

### Викладення основного матеріалу.

При автоматизованому контролі джерелами інформації (датчиками) є первинні вимірювачі фізичних небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища.

Формування дискретних повідомлень в динаміці відбувається з частотою, що відображає в часі процес змін контрольованого параметру. При цьому точність вихідної інформації залежить від частоти надходження імпульсів і від інтервалу часу, за який подається інформація.

Очевидно, що підвищення точності досягається шляхом збільшення частоти вихідних імпульсів.

Проте, максимальна частота вихідних імпульсів обмежена пропускнуною спроможністю каналу зв'язку.

При дискретному представленні інформації (рисунк 1) накопичене значення контрольованого параметру визначається шляхом підрахунку числа імпульсів у цьому проміжку.

$$E'_i = K_i N_i, \quad (1)$$

де  $K_i$  - коефіцієнт порогового значення контрольованого процесу на один імпульс.

Реальне значення контрольованого параметру відрізняється і визначається за формулою

$$E_i = K_i N_i - \Delta E_{i-1} + \Delta E_i, \quad (2)$$

де  $\Delta E_{i-1}$  і  $\Delta E_i$  помилки вимірювань відповідно в  $(i-1)$ -му та  $i$ -му інтервалах.

Середнє значення контрольованого процесу за час  $T_i$  дорівнює  $P_i = E_i / T_i$ .

Необхідно відмітити, що зазначені помилки істотно впливають на поведінку прогнозуючої системи.

Знаючи оцінку реальну оцінку контрольованого процесу в моменти часу між інформаційними імпульсами датчика, можна зменшити похибку представлення інформації.

Вимірювальний тракт даної системи включає в себе первинні аналогові вимірювачі фізичних факторів і перетворювачі аналог - частота. Тоді узагальнена модель такого вимірювального тракту може бути описана рівнянням

$$\frac{d}{dt} \omega(t) + K_1 \omega(t) = K_2 p(t), \quad (3)$$

де  $\omega(t)$  - швидкість зміни контрольованого процесу;  $p(t)$  - поточне значення контрольованого параметру;  $K_1, K_2$ -коєфіцієнти моделі

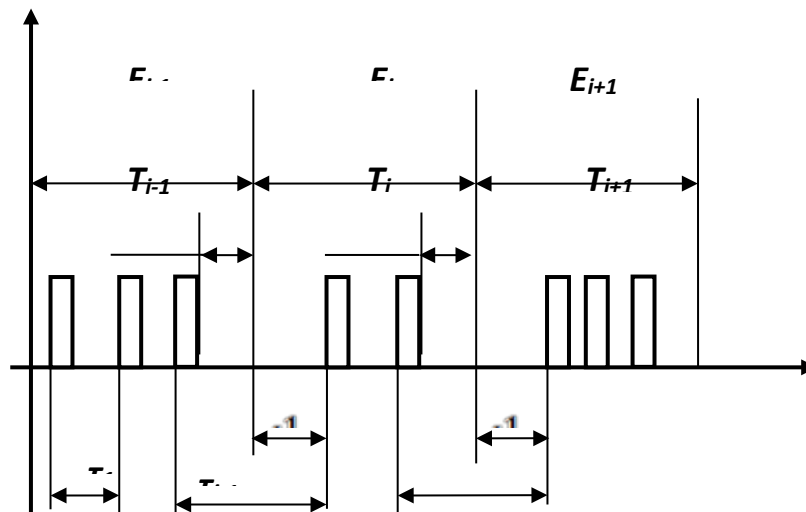


Рисунок 1- Принцип вимірювання фізичних факторів при дискретному представленні інформації

Датчик в такій системі вимірів працює за принципом порогового інтегратора, і кожен черговий імпульс надходить після досягнення величиною  $p(t)$  порогового значення. Тоді співвідношення паузи між імпульсами пов'язано із швидкістю наступним співвідношенням

$$\int_{t_i}^{t_{i+1}} \omega(t) dt = K_i \quad (4)$$

Для оцінки поточного значення контрольованого параметру  $p(t)$  в деякій точці  $t_i$  скористаємося наступною процедурою.

Розглядаючи поточне значення контрольованого параметру як деякий випадковий нестационарний процес [4,5] проаналізуємо характер перетворення його ймовірнісних характеристик при проходженні через ланки (3) і (4) вимірювального тракту.

При проходженні випадкового процесу  $p(t)$  через лінійну динамічну ланку (3) справедливі наступні залежності [4,5].

$$m_\omega(t) = \int_0^t m_p(t-\tau)g(\tau)d\tau, \quad (5)$$

$$r_\omega(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} r_p(t_1-\tau_1, t_2-\tau_2)g(\tau_1)g(\tau_2)d\tau_1d\tau_2,$$

де  $m_\omega(t)$ ,  $m_p(t)$  - математичні очікування процесів  $p(t)$  і  $\omega(t)$ ;

$r_\omega(t_1, t_2)$ ,  $r_p(t_1, t_2)$  - кореляційні функції випадкових процесів  $p(t)$  і  $\omega(t)$ ;

$g(\tau) = e^{-\tau}$  - імпульсна характеристика ланки.

Виходом датчика є дискретний випадковий процес з елементів

$$\omega_i = \frac{1}{\tau_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \omega(t) dt \quad (6)$$

де  $\tau_i = t_{i+1} - t_i$  - інтервал між  $(i+1)$ -м та  $i$ -м імпульсами.

Іншими словами, згідно з (4) вихідний дискретний сигнал складається з сходинок виду (6), що мають однакову площу, але різні тривалості. Математичне сподівання  $i$ -ї сходинки дорівнює

$$M_i = M\{\omega_i\} = \frac{1}{\tau_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} M\{\omega(t)\} dt = \frac{1}{\tau_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} m_\omega(t) dt, \quad (7)$$

а кореляція між  $i$ -ю та  $(t+k)$ -ю сходинками дорівнює

$$M_i = M\{\omega_i\} = \frac{1}{\tau_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} M\{\omega(t)\} dt = \frac{1}{\tau_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} m_\omega(t) dt. \quad (8)$$

Представимо оцінку поточного параметру у вигляді

$$\tilde{p}(t) = \sum_{i \in I} a_i \omega_i, \quad (9)$$

де  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ .

В якості критерію оцінки приймемо відомий критерій середньоквадратичного відхилення (СКВ)

$$\varepsilon^2(t) = M\left\{[\tilde{p}(t) - p(t)]^2\right\}. \quad (10)$$

Запишемо (9) у вигляді

$$\tilde{p}(t) = \vec{\omega}^T \vec{a}. \quad (11)$$

Мінімізуючи (11) методом найменших квадратів, приходимо до необхідності вирішення системи лінійних рівнянь

$$K \vec{a}_{opt} = \vec{K}_p(t), \quad (12)$$

де  $K$  - кореляційна матриця, що складається з елементів (8),  $\vec{K}_p(t)$  - вектор, що складається з елементів  $K_{pr}(t) = M\{\omega_{ir} p(t)\}$ .

Формально записавши

$$\vec{a}_{opt} = K^{-1} \vec{K}_p(t) \quad (13)$$

приходимо до оптимальної лінійної оцінки

$$\tilde{p}(t) = \vec{\omega}^T K^{-1} \vec{K}_p(t). \quad (14)$$

Розглянемо вектор  $\vec{K}_p(t)$ . Його компонента  $\vec{K}_r(t)$  представляє собою кореляцію між сходинкою  $\omega_{ir}$  і значеннями випадкового процесу  $p(t)$  в точці  $t$ . Процес  $p(t)$  формально можна представити у вигляді

$$p(t) = D_t[\omega(t)], \quad (15)$$

де  $D_t = \frac{1}{k_2} \frac{d}{dt} + \frac{k_1}{k_2}$  - лінійний диференціальний оператор першого порядку.

Використовуючи властивості лінійних операторів, виконаємо перетворення

$$\begin{aligned} K_{pr}(t) &= M\{\omega_{ir} p(t)\} = M\{\omega_{ir} D_t[\omega(t)]\} = \frac{1}{\tau_{ir}} D_t \left[ \int_{t_{ir}}^{t_{ir+1}} M\{\omega(\tau) \omega(t)\} d\tau \right] = \\ &= D_t \left[ \frac{1}{\tau_{ir}} \int_{t_{ir}}^{t_{ir+1}} r_\omega(\tau, t) d\tau \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Відмітимо, що

$$K_{\omega r}(t) = \frac{1}{\tau_{ir}} \int_{t_{ir}}^{t_{ir+1}} r_\omega(\tau, t) dt \quad (17)$$

представляє собою кореляцію між сходинкою  $\omega_{ir}$  і значеннями випадкового процесу  $\omega(t)$  в точці  $(t)$ .

Тоді

$$\tilde{p}(t) = D_t \left[ \vec{\omega}^T K^{-1} \vec{K}_\omega(t) \right] = D_t[\tilde{\omega}(t)] \quad (18)$$

де  $\tilde{\omega}(t)$  - оцінка реалізації процесу  $\omega(t)$ .



Таким чином, оцінка випадкового процесу  $p(t)$  складається з двох етапів (рис.3): побудова оцінки  $\tilde{\omega}(t)$  і застосування до неї диференціального оператора  $D$ . Оцінка  $\tilde{\omega}(t)$  - це відновлене з-під інтеграла (4) значення  $\omega(t)$ . Така оцінка носить суто статистичний характер.

Відповідно до (18):

$$\tilde{\omega}(t) = \bar{\omega}^T K^{-1} \bar{K}_\omega(t). \quad (19)$$

її математичне очікування

$$\tilde{m}_\omega(t) = \bar{m}_\omega K^{-1} \bar{K}_\omega(t) \quad (20)$$

і кореляційна функція

$$\tilde{r}_\omega(t_1 t_2) = M\{\omega(t_1)\omega(t_2)\} = \bar{K}_\omega^T(t_1) K^{-1} \bar{K}_{10}. \quad (21)$$

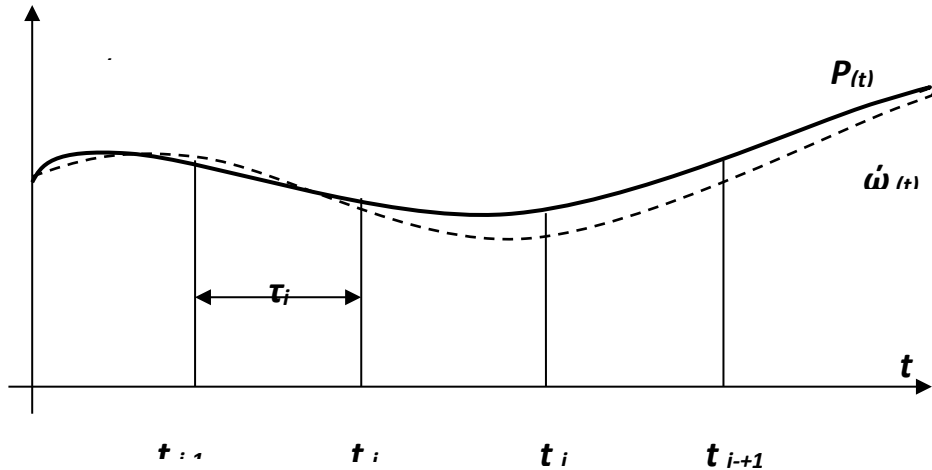


Рисунок 2- Зміна  $\dot{\omega}(t)$  і  $P(t)$  у часі

При осередненні  $\tilde{\omega}(t)$  на деякому інтервалі  $\Delta = [t_1 t_2]$

$$\omega_\Delta = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \tilde{\omega}(t) dt = \bar{\omega}^T K^{-1} \bar{K}_\Delta, \quad (22)$$

де  $r$ -а компонента представляє собою кореляцію сходинок  $\omega_{ir}$  і  $\omega_\Delta$ .

Якщо інтервал  $\Delta$  збігається з інтервалом однією зі сходинок  $\omega_i$ ,  $i \in I$ , то  $\omega_\Delta = \omega_i$ .

Розглянемо можливість побудови квазіоптимальної оцінки  $\tilde{\omega}(t)$ . З огляду на те, що компоненти вектора  $\bar{a}_{opt}(t) = K^{-1} \bar{K}_\omega(t)$  є ваговими функціями для вектора сходинок  $\bar{\omega}^T = (\omega_{i1}, \dots, \omega_{in})$ , то для зменшення витрат на обчислення  $\bar{a}(t)$  можна використовувати апріорну інформацію про випадкові процеси  $\omega(t)$  і  $p(t)$ .

Так, наприклад, якщо процес зміни параметрів має кореляційну функцію близьку до експоненційної, то можна прийняти

$$r_\omega(t_1 t_2) \approx e^{-a|t_1 - t_2|}, \quad (23)$$

де параметр  $a$  вибирається з апріорних міркувань і може коригуватися в темпі процесу. Компоненти вектора  $\bar{a}(t)$  визначаються із виразів (8) і (17) за вихідними даними тривалостей інтервалів між імпульсами  $[t_{ir} t_{ir+1}]$ .

Таким чином, запропонований підхід дозволяє здійснити поточну оцінку контрольованого параметру для довільного моменту часу за вихідною послідовністю імпульсів.

Виходячи з поставленого завдання і на підставі проведених досліджень, розроблена узагальнена структура системи контролю небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища [6], яка представлена на рис. 3.

В цій системі:

$D_1, D_2, \dots, D_n$  - датчики контрольованих параметрів (первинні вимірювачі фізичних небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища);

$U/f_1, U/f_2, \dots, U/f_n$  – перетворювачі аналог-частота;

Мікросервер WEB – блок попереднього збору і накопичення даних;

Центр обробки та аналізування даних – сервер комунікацій та бази даних.

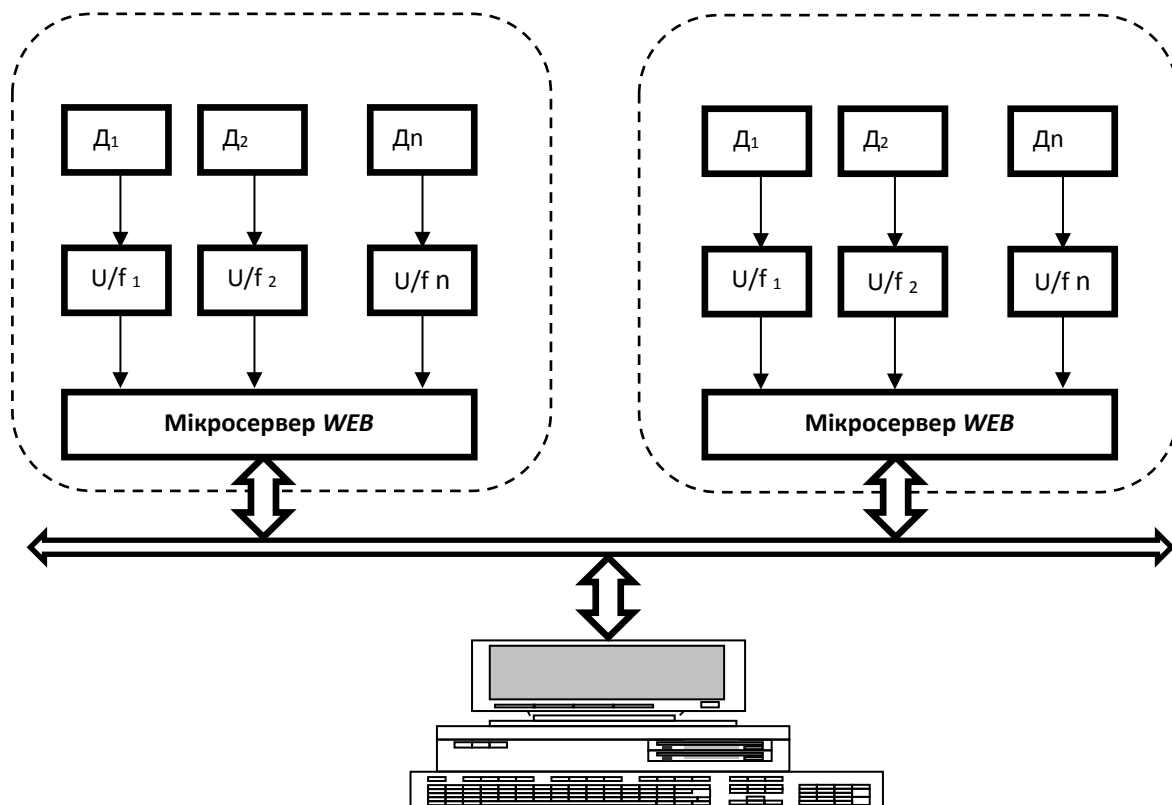


Рисунок 3 - Узагальнена структура системи контролю факторів виробничого середовища

До складу первинних вимірювачів входять вимірювачі шуму та вібрації, вимірювачі запиленості, освітленості, мікроклімату, іонізуючих та електромагнітних випромінювань, інші. Первинні вимірювачі повинні мати достатню чутливість у всіх діапазонах нормованих фізичних величин, а також повинні забезпечити можливість подальшого перетворення вихідного аналогового сигналу в цифровий код.

Всі первинні прилади представляються як сукупність первинних вимірювачів (датчиків), підключених через перетворювачі аналог-код (аналог-частота) до блоків попереднього збору і накопичення даних (мікросервери WEB). Управління периферійними комплексами та здійснення загального моніторингу здійснюється центром обробки та аналізування даних, що являє собою сервер комунікацій та бази даних.

**Висновок.** Запропоновано процедуру оцінювання параметрів виробничого середовища при дискретному представленні інформації, що забезпечує підвищення точності їх контролю за рахунок оцінки параметру в моменти часу між інформаційними імпульсами.

#### Список літератури

1. Посудін Ю.І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища [Текст] /Посудін Ю.І. /.— Київ: Світ, 2003. —288 с.
2. Посудін Ю.І. Фізика і біофізика навколишнього середовища[Текст] /Посудін Ю.І. / — Київ: Світ, 2000. - 303 с.
3. Федин С.И. Автоматизированный мониторинг физических опасных и вредных производственных факторов: дис. канд. техн. наук: 05.26.01 «Охрана труда». – С.-Петербург, – 2004. – 229 с.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники [Текст] / Левин Б.Р./ - М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
5. Липкин И.А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования [Текст] / Липкин И.А./-М.: Вузовская книга, - 2002. — 216 с.

6. Калінчик В.В. Вибір принципів побудови системи контролю шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища/ Енергетика: економіка, технології, екологія – 2016. - № 1. – С. 116 – 121.

V. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000-0003-4028-0185  
V. Kalinchyk, Ph.D., ORCID 0000-0003-3931-646X  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## PRODUCTION ENVIRONMENT ASSESSMENT WITH DISCRETE PRESENTATION

*The paper describes the principles of physical factors control systems construction that are based on the use of analog sensors and analog-frequency converters for the transmission of information. The assembly of monitoring hazards factors of the working environment information sources is regarded as a set of random processes. The discrete messages formation in the dynamics occurs with a frequency that reflects the process of changing the physical parameter in time. In this case, the accuracy of the output information depends on the pulse frequency and the time interval over which the information is supplied. It is shown that the maximum frequency of the output pulses is limited by the bandwidth of the communication channel, which leads to significant errors in the physical factors control system. It is shown that the maximum frequency of the output pulses is limited by the bandwidth of the communication channel, which leads to significant errors in the physical factors control system. These errors significantly affect the behavior of the forecasting system. The actual evaluation of the controlled process at moments between sensor information pulses allows to reduce the information representations error. The measuring path of the control system includes primary analog physical factor meters and analog - frequency converters. The current value of the controlled parameter is considered to be some random non-stationary process. The sensor in such measurement system operates on the threshold integrators principle and each regular pulse is received after reaching the threshold value. The procedure of estimation of parameters of a production environment at a discrete presentation of information provides increase of accuracy of their control at the expense of estimation of a parameter in the moments of time between information pulses. The general structure of the control of dangerous and harmful factors of the production environment system is presented.*

**Key words:** dangerous and harmful factors, hazards factors, the production environment, sensors, converters.

### References

1. Posudin Y.I. Methods of Measurement of the Environmental Parameters [text] / Posudin Y.I. - Kyiv: Svit, 2003. – 288 p.
2. Posudin Y.I. Physics and Biophysics of the Environment [text] / Posudin Y.I. - Kyiv: Svit, 2000. – 303 p.
3. Fedin S.I. Automated monitoring of physical hazards and harmful production factors: Ph.D.Thesis 05.26.01 «Occupational safety and health» - Saint Petersburg: 2004. - 229 p.
4. Levin B.R. Theoretical fundamentals of statistical radio engineering [text] / Levin B.R. - M.: Radio i sviaz, 1989. – 656 p.
5. Lipkin I.A. Statistical radio engineering. Information and coding theory [text] / Lipkin I.A. - M.: Vuzovskaya kniga, 2002. – 216 p.
6. Kalinchyk V.V. Selection guidelines for creating hazard environment factors control systems / Kalinchyk V.V. / Energetica: ekonomika, tehnologiya, ekologiya – 2016. - № 1. – p. 116 – 121.

Надійшла 13.10.2019  
Received 13.10.2019

Н. В. Зуєвська, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-1716-1447  
Л. В. Шайдецька, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-6593-0255  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
В. Є. Губашова, ORCID 0000-0003-4235-4440  
провідний інженер проектного відділу Департаменту  
спеціальних та гідротехнічних робіт  
ТОВ СП «Основа-Солсіф»

## ВПЛИВ ВИКОНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМЕНЕВОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАВКОЛИШНЬОГО ҐРУНТОВОГО МАСИВУ

*Технологія струменевої цементациї використовується для досягнення різних будівельних і геотехнічних цілей, оскільки дозволяє створити елементи різної конфігурації та протяжності в різній складності інженерно-геологічних умовах. З цього випливає, що сучасні процедури проектування фундаментів, огороджувальних та утримуючих конструкцій, гідроізоляційних бар'єрів та екранів, тунелів і т.ін. повинні бути адаптовані до альтернативи заміни жорстких елементів, таких як бурові і забивні палі на струменево-цементацийні елементи. До звичайного процесу проектування необхідно додати специфічні аспекти, пов'язані зі струменевою цементациєю: вибір типу струменевої цементациї, оцінка параметрів обробки ґрунту, прогнозування розмірів і міцності струменево-цементацийних елементів, аналіз можливого небажаного впливу на навколишні будівлі та споруди. До одного з таких специфічних аспектів відноситься вплив виконання ґрунтоцементних елементів, виконаних за струменевою технологією, на оточуючий ґрунтовий масив та зміна його фізико-механічних показників. В даній статті проаналізовано результати дослідження фізико-механічних характеристик ґрунтів, що розташовані поміж двох ґрунтоцементних колон, що виконані за струменевою технологією. Виділені зони із покращеними параметрами ґрунтів. Виконано аналіз чисельних змін показників фізико-механічних характеристик і визначено зони максимального впливу. Запропоновано використання дослідних даних наявності зони покращеного ґрунту для моделювання та дослідження зміни напружено-деформованого стану масиву ґрунту з ґрунтоцементними елементами підсилення, при включенні в розрахунок покращених зон ґрунту, що в майбутньому дозволить зменшити кількість ґрунтоцементних елементів при виконанні підсилення ґрунтових масивів.*

**Ключові слова:** струменева цементация, ґрунтоцементні колони, джет-колони, напружено-деформований стан, зона впливу

### Вступ

Технологія струменевої цементациї заснована на високошвидкісній ін'єкції однієї або декількох рідин (розчин, повітря, вода) в ґрунт. Рідини ін'єктуються через форсунки малого діаметра, розташовані на гідромоніторі, який при звичайному застосуванні спочатку бурить свердловину до низу майбутнього ґрунтоцементного елемента, а потім піднімається до поверхні ґрунту, виконуючи постійну його обробку [1, 2, 3, 4].

Тип і фізико-механічні властивості ґрунтів, в яких виконується струменево-цементацийний елемент, будуть одними з основних чинників які впливають на геометричний розмір елементів і міцність ґрунтоцементного матеріалу.

Струмінь розчину, руйнуючи і перемішуючи ґрунт, в межах свого можливого радіуса впливу формує ґрунтоцементний елемент.

Дія високонапірного струменя, що володіє великим гідродинамічним тиском, завдаючи удари по ґрунту, призводить до руйнування його вихідної структури.

Канематцу в своїй роботі [2] наводить характеристики струменя води, що викидається в повітря (рис. 1). Зона 1 являє собою ядро, гідродинамічний тиск в якому постійний. Зона 2 являє собою проміжну зону і, як правило, відстань до кінця зони 2 дорівнює 300 діаметрів сопла. За межами даного радіуса впливу зони 3 потік води втрачає фокусування, стає переривчастим, і починають переважати кавітаційні ефекти. Розподіл гідродинамічного тиску в зоні 3 уздовж осі струменя зменшується з відстанню по експоненті.

Високий тиск призводить до змішування ґрунту і безперервного руйнування ґрунту в межах радіусу

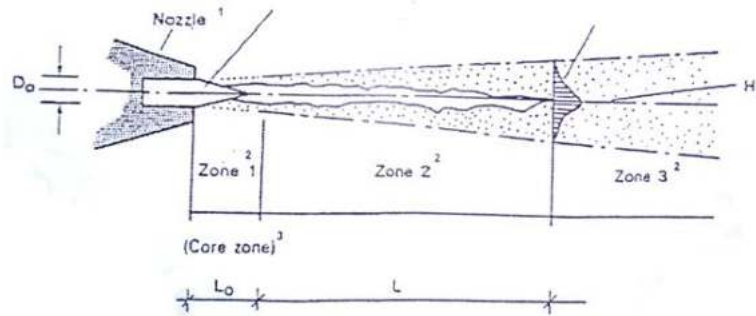


Рисунок 1 – Характеристики водного струменя по Канематцу: 1 - сопло, 2 - зона, 3 - зона ядра

ґрунтуючись на своїх висновках, Канематцу припустив, що застосування струменевої цементації не впливає на напружено-деформований стан в ґрунті за межами радіуса впливу, фактично, навіть при роботі з дуже високим тиском, процес ін'єкції призводить тільки до збільшення тиску в межах області руйнування (зона 1 і 2). Таку ж думку підтримують в своїх роботах С.С. Ковил і А.Є. Скіннер [3].

У той же час практикуючі організації, ґрунтуючись на дослідних даних, показали, що виконання струменево-цементацийних елементів круглого перетину впливає на навколишній їх ґрунтовий масив.

Компанією Consolidamenti e Pali [4] в Італії були виконані ряд лабораторних тестів ґрунтів, що оточують колодязь, виконаний з пересічних колон струменевої ін'єктування (рис. 2).

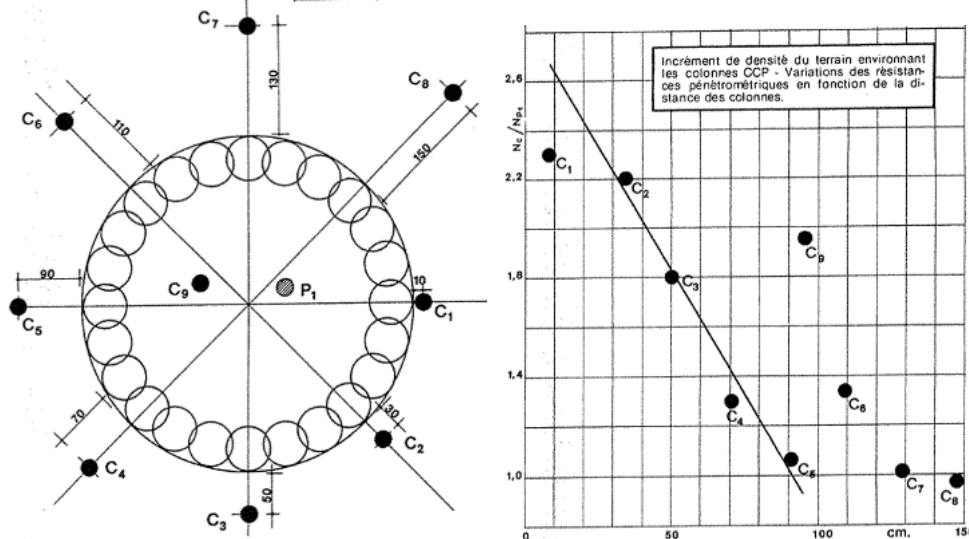


Рисунок 2 – Зміна щільності ґрунту, що оточує колони струменевої цементації в залежності від віддаленості від колони [4]

Максимальний вплив високонапірного струменя на навколишній ґрунтовий масив спостерігається на відстані 10 і 30 см (зразки C<sub>1</sub> і C<sub>2</sub>), граничний вплив на фізико-механічні характеристики ґрунту спостерігаються на відстані 110 см (C<sub>6</sub>).

### Мета роботи

Проаналізувати фізико-механічні властивості ґрунтів в зоні впливу струменевої цементації, а також визначити геометричні параметри зони із покращеними характеристиками, що в майбутньому дозволить використовувати отримані дані в моделюванні напружено-деформованого стану ґрунтового масиву підсиленого ґрунтоцементними елементами

### Матеріал і результати дослідження

Для вивчення впливу виконання елементів струменевої цементації на навколишній масив розглянемо 2 об'єкти, де виконувалося підсилення основи фундаментів струменево-цементацийними колонами на території України:

#### 1. Реконструкція будівлі ресторану «Лейпциг» в м.Києві

Досліджувана ґрунтова основа - підвалини будівлі, що реконструюється, ресторану «Лейпциг» на перетині вул. Володимирської та Прорізної. Будівля (колишній дохідний будинок) побудовано в 1900 р. Будівля і фундаменти цегляні. У зв'язку з різницею відміток рельєфу будівля має різну поверховість (5-6 поверхів). Під усім будинком розташовані підвали.

В геоморфологічному відношенні досліджувана ділянка розташована на схилі корінного лесового плато, що знижується в напрямку Хрещатицької балки. Потужність супіску лесовидного - 6-13 м. Підземні води розкриті на глибинах 9-11,6 м.

Проект підсилення основи фундаментів будівлі "Лейпциг" був розроблений і виконаний в 2004 році СП "Основа-Солсиф". Згідно з проектом під усіма несучими стінами будівлі по обидва боки цегляного фундаменту були виконані колони струменевого ін'єктування діаметром 600 мм, під кутом 3°, глибиною 13,0 м і з кроком від 1,2 м до 2,4 м (рис. 3 а, б).

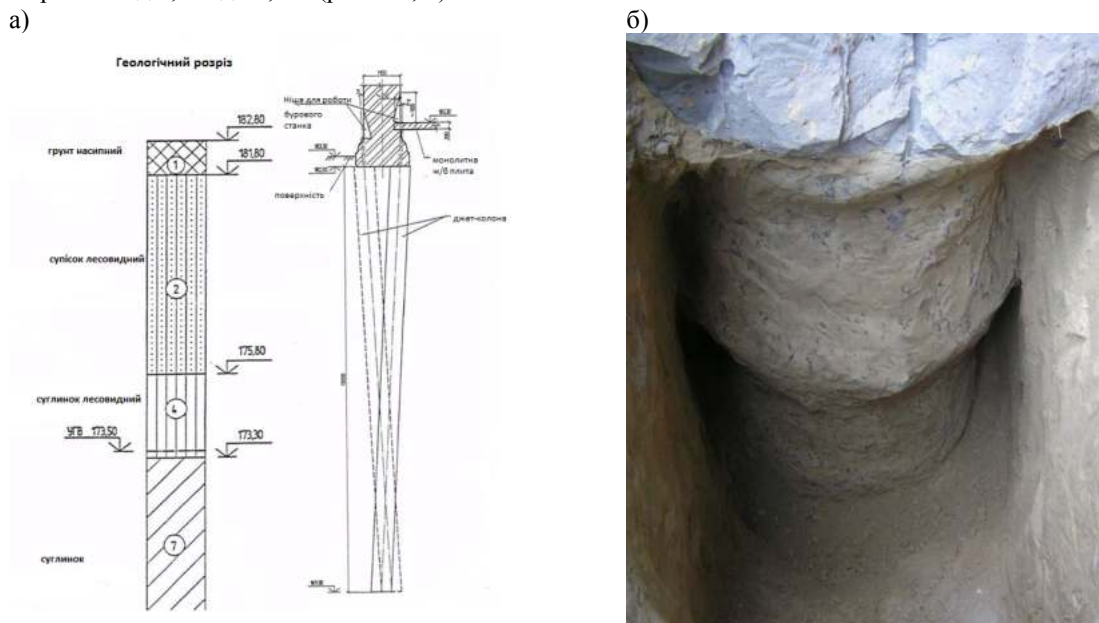


Рис. 3 – Виконання колон струменевого ін'єктування: а - схема підсилення фундаментів; б - колона струменевого ін'єктування

В кінці 2010 року були проведені роботи з дослідження навколишнього ґрунтового масиву. З внутрішнього двору будівлі були розкриті 3 струменево-цементацийні колони (№ 166, 167, 168). У горизонтальній площині між №167 і №166 були відібрані 20 кільцевих зразків ґрунту (рис. 4)

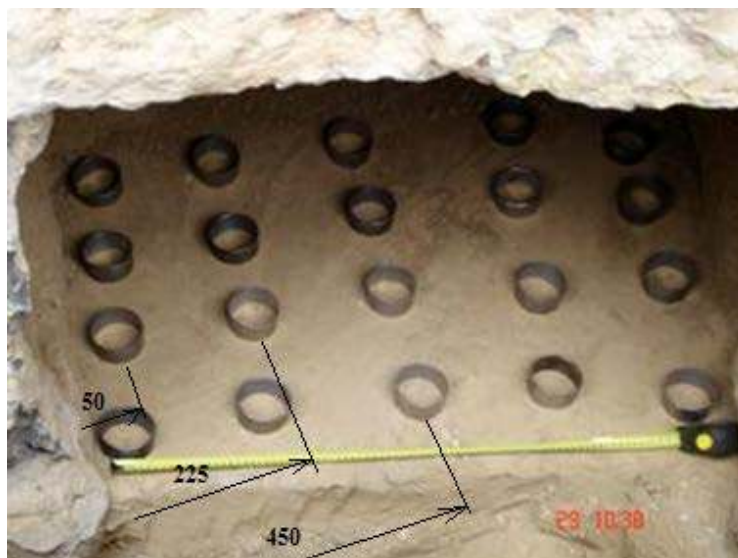


Рис. 4 – Схема відбору проб ґрунту.

Зразки відібраних з позицій 2 і 4 (225 і 450 мм від бокової поверхні колони) не мали суттєвих відмінностей між собою. Характеристики зразків 1 і 5 (50 мм від поверхні колони) показали зміну в бік поліпшення в порівнянні із зразками 2 і 4.

Досліджуваний ґрунт - супісок лесовидний, світло-коричневий, легкий пілуватий, в водонасиченому стані текучий, макропористий, просідний.

Результати лабораторних досліджень внесені до таблиці 1.

Таблиця 1 - Фізико-механічні характеристики ґрунтів відібраних зразків

<i>Характеристики ґрунтів</i>	<i>ІГЕ-2 (2 та 4)</i>	<i>ІГЕ-2* (1 та 5)</i>
Природна вологість	$W = 0,12$	$W = 0,135$
Вологість на межі текучості	$W_L = 0,24$	$W_L = 0,28$
Вологість на межі розкочування	$W_p = 0,20$	$W_p = 0,21$
Число пластичності	$I_p = 0,04$	$I_p = 0,075$
Показник текучості	$I_L < 0$	$I_L < 0$
Показник текучості при коефіцієнті водонасичення	$S_r = 0,9, I_L > 1$	$S_r = 0,9, I_L > 1$
Щільність частинок ґрунту	$\rho_s = 2,66 \text{ г/см}^3$	$\rho_s = 2,66 \text{ г/см}^3$
Щільність ґрунту	$\rho = 1,52 \text{ г/см}^3$	$\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$
Щільність сухого ґрунту	$\rho_d = 1,36 \text{ г/см}^3$	$\rho_d = 1,355 \text{ г/см}^3$
Коефіцієнт пористості	$e = 0,96$	$e = 0,96$
Ступінь вологості	$S_r = 0,33$	$S_r = 0,37$
Початковий просадний тиск	$p_{sl} = 86 \text{ кПа}$	$p_{sl} = 175 \text{ кПа}$
Кут внутрішнього тертя	$\varphi_{II} = 26,5^\circ$	$\varphi_{II} = 29,5^\circ$ ;
Питоме щеплення ґрунту	$C_{II} = 7,5 \text{ кПа}$	$C_{II} = 8,5 \text{ кПа}$
Кут внутрішнього тертя	$\varphi_I = 23,5^\circ$	$\varphi_I = 26^\circ$
Питоме щеплення ґрунту	$C_I = 5 \text{ кПа}$	$C_I = 5,5 \text{ кПа}$
Модуль деформації ґрунту в природному стані	$E = 4 \text{ МПа}$	$E = 6 \text{ МПа}$
Модуль деформації ґрунту в водонасиченому стані	$E = 3 \text{ МПа}$	$E = 5 \text{ МПа}$

Необхідно відзначити, що час між виконанням колон струменевої цементації і проведенням досліджень ґрунтів склав 6 років, отже, інженерно-геологічні дані часу виконання підсилення основи не розглядалися. Всі порівняння характеристик зроблені тільки між отриманими зразками в міжколонному просторі.

За отриманими результатами, можна зробити висновок, що:

- максимальна зона впливу на навколишній ґрунтовий масив - 10 см;
- ґрунт зразків 1 і 5 - супісок (ІГЕ-2, число пластичності  $I_p = 0,04$ ) придбав деякі властивості глинистого ґрунту, тобто перейшов в легкий пілуватий суглинок (ІГЕ-2 \*, число пластичності  $I_p=0,075$ );
- питоме зчеплення збільшилася на 12% (8,5 кПа для зразків 1 і 5 і 7,5 кПа для зразків 2 і 4);
- кут внутрішнього тертя збільшився на 10% ( $26^\circ$  і  $23,5^\circ$ );
- модуль деформації ґрунту збільшився на 33% (6 МПа для зразків ІГЕ-2 - 1 і 5, 4 МПа для ІГЕ-2 \* - 2 і 4);
- знизилися значення просідання ґрунту - початковий просадний тиск збільшився з  $p_{sl} = 86 \text{ кПа}$  до  $p_{sl} = 175 \text{ кПа}$ .

## 2. Реконструкція пам'ятника архітектури Андріївська церква в Києві.

Андріївська церква - пам'ятник архітектури XVIII ст., побудована в 1747-1762 рр. І.Ф. Мічуріним за проектом італійського архітектора Ф.-Б. Растреллі. З 1968 р Андріївська церква - музей, філіал Національного заповідника «Софія Київська».

З кінця 2008 року СП «Основа-Солсіф» почала виконання робіт з протиаварійних та ремонтно-реставраційних робіт, що включали в себе і закріплення схилу, і посилення фундаментів будівлі, і реставраційні роботи церкви і навколишніх елементів.

Ґрунтами основи фундаментів південного, західного і північного фасадів є еолово-делювіальні супіски. Основою фундаментів східного фасаду є моренні суглинки.

Проектне рішення з підсилення фундаментів Андріївської церкви являло собою виконання джет-колон в основі загальною кількістю 259 штук, довжиною від 10,8 до 13 5 м з кутами нахилу від  $7^\circ$  до  $13^\circ$  і діаметром 600 мм з розширенням 800 мм, крок 1,0 -2,7 м. Принципова схема підсилення фундаментів церкви показана на рисунку 5.

У червні 2010 року було проведено дослідження фізико-механічних характеристик ґрунтів в міжколонному просторі для підтвердження впливу виконання струменево-цементацийних елементів на навколишній ґрунтовий масив (супісок пілуватий).

Ґрутуючись на отриманих результатах, можна зробити такі висновки:

- на відстані 100 і 150 мм від поверхні 1-ї і другої колон при інженерно-геологічних вишукуваннях відзначено зростання щільності на 4 і 5% відповідно. При відборі зразків на відстані 60 мм від поверхні 3-ї колони було виміряне збільшення щільності на 5% і 8% (по обидві сторони від колони).

- при усередненні отриманих значень щільності ґрунтових зразків в міжколонному просторі простежується ущільнення ґрунту на значення в діапазоні від 1% до 7%. Коефіцієнт відносного ущільнення у всьому міжколонному ґрунтовому просторі дорівнює 1,03;



- зони максимального впливу на навколишній ґрунтовий масив 15 і 30 см відповідно від поверхні другої і першої ґрунтоцементної колони.

а)



б)

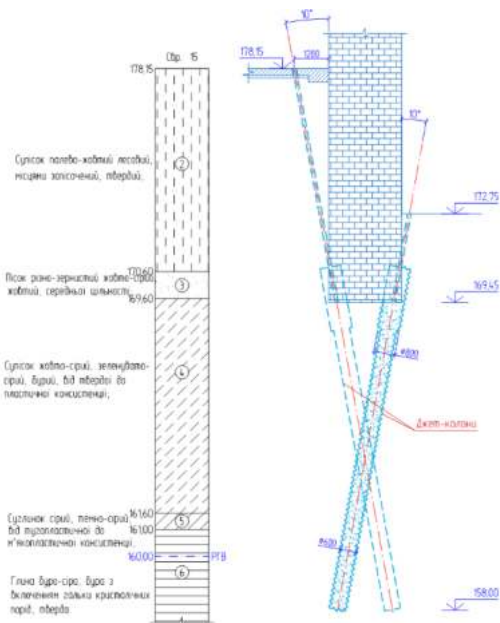


Рис. 5 – Андріївська церква. Схема підсилення фундаментів

Всі дослідження були проведені в Геотехнічній лабораторії СП "Основа-Солсіф". Результати досліджень внесені до таблиці 2.

Таблиця 2 - Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Розташування зразків (глибина, м)	Номер зразка*	Відстань від бокової поверхні, мм	Щільність вологого ґрунту $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Вологість W, д.о.	Щільність сухого ґрунту $\gamma_d$ , т/м <sup>3</sup>
2,2	1	100 (від 1-ї до 2-ї)	1,66	0,130	1,47
	2	200 (від 1-ї до 2-ї)	1,66	0,130	1,43
	3	300 (від 1-ї до 2-ї)	1,66	0,130	1,47
	4	400 (від 1-ї до 2-ї)	1,64	0,130	1,45
	5	700 (від 1-ї до 2-ї)	1,67	0,138	1,47
	6	800 (100 від поверхні 2-ї)	1,67	0,147	1,46
2,5	7	60 (від 2-ї до 3-ї)	1,68	0,141	1,47
	8	60 (від 3-ї)	1,69	0,152	1,47
	9	60 (від 3-ї)	1,72	0,133	1,52
Зразок непорушеної структури	10		1,60	0,130	1,42

Виходячи з того, що на двох об'єктах ґрунт, що був досліджений, - супісок, зробимо загальний графічний аналіз для визначення зони впливу на оточуюче ґрунтове середовище при виконанні струменевих елементів.

Для побудови графіку розрахуємо відносне значення для щільності ґрунту:  $\gamma' = \gamma / \gamma_d$ , де  $\gamma$  - щільність ґрунту, відібраного із зони впливу,  $\gamma_d$  - щільність часток ґрунту. Та відносне значення розташування зразку ґрунту в залежності від міжколонної відстані:  $b' = b / B$ ,  $b$  - відстань розташування ґрунтового зразку від поверхні ґрунтоцементної колони,  $B$  - міжколонна відстань.

На графік на рисунку 6 нанесені крива для супіску лесовидного та дві гілки, в залежності від поверхні двох колон, для супіску пилуватого твердого.



Згідно графіку точка перетину А для кривих двох видів супіску:  $b' = 0,118$  та  $\gamma' = 1,139$ , тобто для відстані між двома ґрунтоцементними колонами 900 мм (що відповідає відстані на цих двох об'єктах) – зона покращеного ґрунту буде:  $b = b' \cdot B = 0,118 \cdot 900 = 106$  мм.

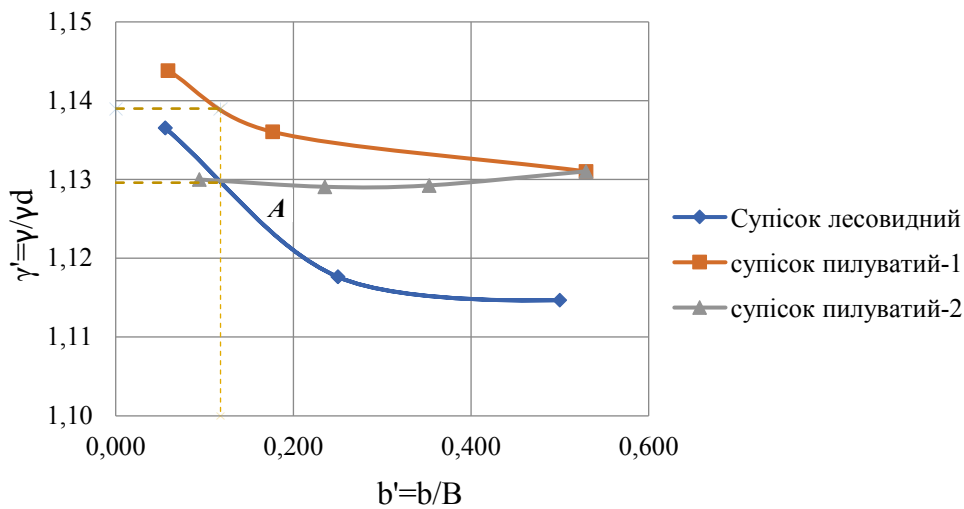


Рис. 6 – Залежність приведеної відстані міжколонного простору та приведеної щільності ґрунтів

Не дивлячись на припущення деяких авторів, що застосування струменевої цементації не впливає на напружено-деформований стан в ґрунті за межами радіуса впливу, на підставі результатів випробування на двох будівельних об'єктах, виконаних на території України, де застосовувалися струменево-цементаційні елементи, було доведено зворотнє.

### Висновок

1. В процесі обробки результатів фізико-механічних властивостей ґрунту лесовидного супіску, що знаходився в зоні впливу виконання ґрунтоцементної колони, було відмічено, що на відстані 10 см від поверхні колони змінилися значення щільності (+2%), питомого зчеплення (+12%), кута внутрішнього тертя (+10%) та модуля пружності (+33%) по відношенню до зразків, розташованих далі від поверхні.

2. За результатами інженерно-геологічних вишукувань зразків супіску пилюватого твердої консистенції відзначено зростання щільності ґрунту від 4 до 7%. Коефіцієнт відносного ущільнення у всьому міжколонномуґрунтовому просторі дорівнює 1,03. Зони максимального впливу на навколишній ґрунтовий масив становить 15 і 30 см відповідно від поверхні другої і першої ґрунтоцементної колони.

Використовуючи дослідні дані зміння фізико-механічних властивостей ґрунту, що оточує струменево-цементаційний елемент, та доведеної практично та графічно наявності зони покращеного ґрунту, можна дослідити зміння напружено-деформованого стану масиву ґрунту з елементами підсилення, виконаними за струменевою технологією, з включенням в розрахунок покращених зон ґрунту, що в майбутньому дозволить зменшити кількість ґрунтоцементних елементів при виконанні підсилення ґрунтових масивів.

Найкращим варіантом для інженера має бути поєднання теоретичних і технологічних знань, для того щоб на практиці можливими рішеннями забезпечити безпеку, функціональність і економічну доцільність.

### Література

1. Бройд И.И. Струйная геотехнология: Учебное пособие / Бройд Исаак Йосифович. –М.: Издательство ассоциации Строительных вузов, 2004. – 448 с
2. Малинин А.Г. Струйная цементация ґрунтов: монография / Малинин Алексей Генрихович. – Пермь: Пресстайм, 2007. – 168 с.
3. Croce P. Analysis of single-fluid jet grouting / Croce P., Flora A. // Géotechnique. – Vol. 50. – No. 6. – December, 2000. – Pp. 739-748.
4. P. Croce, A. Flora, G. Modoni., Jet Grouting. Technology, Design and Control. NW: SRS Press Taylor & Francis Group, 2014, p. 9
5. Kanematsu H. High pressur jet grouting method / Kanematsu H. // Doboku Sekoh (Civil Construction). – Vol. 21. – No. 13. – 1980.

6. Covil C.S. Jet grouting: a review of some of the operating parameters that form the basis of the jet grouting process / Covil C.S., Skinner A.E. // Grouting in the ground. – London: Thomas Telford, 1994. – pp. 605-629.

7. Technologiebrevetée pour consolidation et colonnes au moyend'injections à très haute pression // Compagnia Consolidamenti e Pali, Italia – material of company.

**УДК 624.138**

**Н. В. Зуевская**, д-р.техн. наук, проф., **ORCID 0000-0002-1716-1447**  
**Л. В. Шайдецкая**, канд. техн. наук, доц., **ORCID 0000-0002-6593-0255**  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**  
**В. Е. Губашова**, **ORCID 0000-0003-4235-4440**  
Ведущий инженер проектного отдела Департамента  
специальных и гидротехнических работ  
**ООО СП «Основа-Солсиф»**

## **ВЛИЯНИЕ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕГО ГРУНТОВОГО МАССИВА**

*Технология струйной цементации используется для достижения различных строительных и геотехнических целей, так как позволяет создать элементы различной конфигурации и протяженности в разной сложности инженерно-геологических условиях. Из этого следует, что современные процедуры проектирования фундаментов, ограждающих и удерживающих конструкций, гидроизоляционных барьеров и экранов, тоннелей и т.д. должны быть адаптированы к тому, чтобы к альтернативе замены жестких элементов, такие как буровые и забивные сваи на струйно-цементационные элементы. К обычному процессу проектирования необходимо добавить специфические аспекты, связанные со струйной цементацией: выбор типа струйной цементации, оценка параметров обработки грунта, прогнозирования размеров и прочности струйно-цементационных элементов, анализ возможного нежелательного воздействия на окружающие здания и сооружения. К одному из таких специфических аспектов относится влияние выполнения грунтоцементных элементов, выполненных по струйной технологии, на окружающий грунтовый массив и изменение его физико-механических показателей. В данной статье проанализированы результаты исследования физико-механических характеристик грунтов, расположенных между двухгрунтоцементных колонн, выполненных по струйной технологии. Выделены зоны с улучшенными параметрами грунта. Выполнен анализ многочисленных изменений показателей физико-механических характеристик и определены зоны максимального воздействия. Предложено использование опытных данных наличия зоны улучшенного грунта для моделирования и исследования изменения напряженно-деформированного состояния массива грунта с грунтоцементными элементами усиления, при включении в расчет улучшенных зон грунта, что в будущем позволит уменьшить количество грунтоцементных элементов при выполнении усиления грунтовых массивов.*

**Ключевые слова:** струйная цементация, грунтоцементных колонны, джет-колонны, напряженно-деформированное состояние, зона влияния

**N. Zuiavska**, Dr. Eng. Sc., **ORCID 0000-0002-1716-1447**  
**L. Shaidetska**, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID 0000-0002-6593-0255**  
**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**  
**V. Gubashova**, **ORCID 0000-0003-4235-4440**  
Lead engineer of project department of Department of special and hydraulic works of  
**LLC JV Osнова-Solsif**

## **INFLUENCE OF PERFORMANCE OF ELEMENTS OF JET GROUTING ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SURROUNDING SOIL MASSIF**

*The technology of jet grouting is used to achieve various construction and geotechnical goals, as it allows you to create elements of different configurations and lengths of varying complexity in engineering and geological conditions. It follows that modern procedures for designing foundations, enclosing and holding structures, waterproofing barriers and screens, tunnels, etc. must be adapted to the alternative of replacing rigid elements such as drilling and driven piles with jet grouted elements. Specific aspects related to jet grouting must be added to the usual design process: selection of the type of jet grouting, estimation of soil treatment parameters, prediction of the*

*size and strength of the jet grouted elements, analysis of possible undesirable effects on the surrounding buildings and structures. One of these specific aspects includes the effect of the implementation of soil grouted elements made by jet grouting technology on the surrounding soil massif and the change in its physical and mechanical properties. This article analyzes the results of a study of the physical and mechanical characteristics of soils located between two soil-cement columns made using jet grouting technology. Areas with improved soil parameters are highlighted. The analysis of numerous changes in the indicators of physical and mechanical characteristics is carried out and the zones of maximum impact are determined. It is proposed to use the experimental data on the presence of an improved soil zone for modeling and studying the changes in the stress-strain state of an massif of soil with jet grouted reinforcing elements, when including improved soil zones in the calculation, which will make it possible to reduce the number of soil-cement elements in the future when reinforcing soil masses.*

#### References

1. Бройд И.И. Струйная геотехнология: Учебнопособие / БройдИсаак Йосифович. –М.: ИздательствоассоциацииСтроительныхвузов, 2004. – 448 с
2. Малинин А.Г. Струйнаяцементациягрунтов: монография / Малинин АлексейГенрихович. – Пермь: Пресстайм, 2007. – 168 с.
3. Croce P. Analysisof single-fluid jetgrouting / Croce P., Flora A. // Géotechnique. – Vol. 50. – No. 6. – December, 2000. – Pp. 739-748.
4. P. Croce, A. Flora, G. Modoni., JetGrouting. Technology, DesignandControl. NW: SRS PressTaylor&FrancisGroup, 2014, p. 9
5. Kanematsu H. Highpressurjetgroutingmethod / Kanematsu H. // DobokuSekoh (CivilConstruction). – Vol. 21. – No. 13. – 1980.
6. Covil C.S. Jetgrouting: a reviewofsomeoftheoperatingparametersthatformthebasisofthejetgroutingprocess / Covil C.S., Skinner A.E. // Groutingintheground. – London: ThomasTelford, 1994. – pp. 605-629.
7. Technologiebrevetée pour consolidation et colonnes au moyend'injections à très haute pression // CompagniaConsolidamenti e Pali, Italia– material of company.

Надійшла 15.10.2019  
Received 15.10.2019

М.А. Коваленко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-5602-2001  
О.Л. Тимошук, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-1863-3095  
О.О. Самойленко, магістр-професіонал, ORCID 0000-0002-6540-8109  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

## РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОПОТУЖНИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

*Матеріали статті представляють собою результат практичної розробки, що присвячена розробці експериментального стенду для дослідження параметрів та характеристик машин постійного струму малої потужності. За результатами роботи розроблено принципову схему для дослідження даних машин на основі мікроконтролера. Традиційні засоби вимірювання струму, напруги, швидкості обертання замінені сучасними давачами. Фіксування та обробка результатів дослідження виконується на персональному комп'ютері в напівавтоматичному режимі. Також розроблено програмне забезпечення для реалізації необхідної програми випробувань: неробочий хід, коротке замикання і т.ін. за допомогою розробленого стенду можливо проводити випробування машин постійного струму як в режимі двигуна так і в режимі генератора, що суттєво підвищує його універсальність при незначних габаритних розмірах. Апаратна частина стенду є мобільною, тобто за допомогою одного блоку можливо забезпечити випробування різних машин. Застосування в якості регуляторів постійної напруги ШІМ дозволило знизити габаритні розміри та підвищити надійність експериментального стенду в цілому за рахунок відмови від масивних реостатів.*

**Ключові слова:** експериментальний стенд, машина постійного струму, параметри та характеристики, електромагнітне збудження

**Вступ** Машини постійного струму з електромагнітним збудженням широко застосовуються в різних галузях промисловості, побуті, техніці, науці і т. ін. Їх значне використання та популярність пояснюється наявністю експлуатаційних параметрів та характеристик, таких як: високий пусковий і перевантажувальний момент, висока швидкість, широкий діапазон плавного регулювання частоти обертання.

Електричні машини постійного струму потужністю від десятка до сотень ват мають широке застосування в електроприводах гнучких виробничих систем, промислових роботів, систем автоматки і транспортних засобів. Вони також застосовуються в навчальному процесі для студентів енергетичного та електромеханічного профілю.

В роботі проведено аналіз існуючих стендів для випробування машин постійного струму. Основні вимоги до таких стендів були сформовані ще за радянського союзу і регламентуються відповідними ГОСТ, на основі яких сформовані основні етапи та процедури випробування таких машин [1-3]. Це класичні системи, що представляють собою сам досліджуваний агрегат та навантаження/привідний двигун. Для навантаження генераторів та двигунів постійного струму використовувались багатоступінчаті реостати великої потужності. Для регулювання струму збудження в обмотці збудження таких машин використовувались дротяні реостати. Програмою таких випробувань передбачено отримання робочих характеристик  $P_1$ ,  $I_a$ ,  $\eta$ ,  $n = f(P_2)$ , регульовальних характеристик для двигунів  $n = f(I_a)$  та генераторів  $I_a = f(I_a)$ .

Відомо і сучасні засоби та методи для проведення випробувань малопотужних машин постійного струму. В загальні вони представлені в роботах [4-7]. В основу даних стендів покладено сучасні мікропроцесорні системи в сукупності із ШІМ, цифровими вимірювальними пристроями та комп'ютеризованими засобами обробки та візуалізації отриманих результатів. Подальший аналіз результатів проводиться в ручному або автоматичному режимі. Однак, основним недоліком таких систем є їх висока вартість та необхідність у висококваліфікованому обслуговуючому персоналі, складність пуску та налагодження таких систем.

На сьогоднішній день матеріально-технічна база більшості навчальних закладів, особливо технічних спеціальностей, суттєво застаріває. Це пов'язано як із бурхливим розвитком науки і техніки в цілому так і з слабким державним фінансуванням. Тому стоїть актуальне завдання оновлення матеріально-технічної бази вищих начальних закладів та розроблення сучасних компактних, недорогих та багатофункціональних стендів, що стануть основою для проведення лабораторних робіт, практичних занять, науково-дослідних робіт і т.ін. З іншого боку зростають вимоги до енергоресурсозбереження, що вимагає зниження встановле-

ної потужності досліджуваних агрегатів. Нові стенди мають бути достатньо надійними і містити мінімальну кількість небезпечних в експлуатації предметів (наприклад реостатів, навантажувальних тумб, відкритих контактних

з'єднань). Основою таких стендів повинні бути сучасні цифрові пристрої, що виконують функції регулятора та контролера всіх електричних величин. Для підвищення безпеки роботи із таким обладнанням необхідно зменшувати робочу напругу до мінімально можливої, що підвищить безпеку під час проведення робіт з таким обладнанням.

**Мета та завдання** роботи полягає в розробці експериментального стенду для дослідження параметрів та характеристик малопотужних машин постійного струму з метою оновлення матеріально-технічної бази, зниження енергоспоживання, підвищення надійності лабораторного обладнання, підвищення безпеки під час роботи з обладнанням. Основним завданням в роботі є розробка принципової електричної схеми для випробування машин постійного струму та програмного забезпечення для керування та обробки результатів випробувань.

**Матеріал і результати досліджень** За основу в роботі взята малопотужна машина постійного струму ТИП незалежного збудження з наступними параметрами (табл. 1.)

Таблиця 1 Номінальні параметри досліджуваної МПС

№	Параметр	Величина
1	Номінальна робоча напруга	110 В
2	Номінальний струм якоря	2,35 А
3	Номінальна потужність	240 Вт
4	Номінальна швидкість обертання	3300 об/хв
5	ККД	
6	Тип збудження	незалежний
7	Опір обмотки збудження	980 Ом
8	Режим роботи	S1

На основі проведеного літературного пошуку для розробки експериментального стенду для дослідження малопотужних машин постійного струму з електромагнітним збудженням сформовано ряд принципів вимог:

- сумарна споживана потужність установки не має перевищувати 1,0 кВт з метою енергоресурсозбереження;
- номінальна робоча напруга не повинна перевищувати 110 В з метою підвищення безпеки під час роботи з обладнанням;
- традиційні реостатні системи регулювання струму та напруги замінити ШІМ, з метою забезпечення компактності, підвищення надійності та зменшення енерговитрат;
- традиційні вимірювальні вольтметри та амперметри замінити відповідними цифровими давачами струму та напруги;
- забезпечити стенд цифровим вимірювачем швидкості;
- для обробки результатів та керування стендом використовувати мікроконтролери з простою можливістю інтеграції із персональним комп'ютером.

Стенд змонтований на базі популярного мікроконтролера Arduino Nano (Atmega328p) (Рис. 1), який повністю відповідає поставленим вимогам та завданням і може їх реалізувати. Він може подавати на силові ключі ШІМ сигнал, що дозволить плавно регулювати МПС.

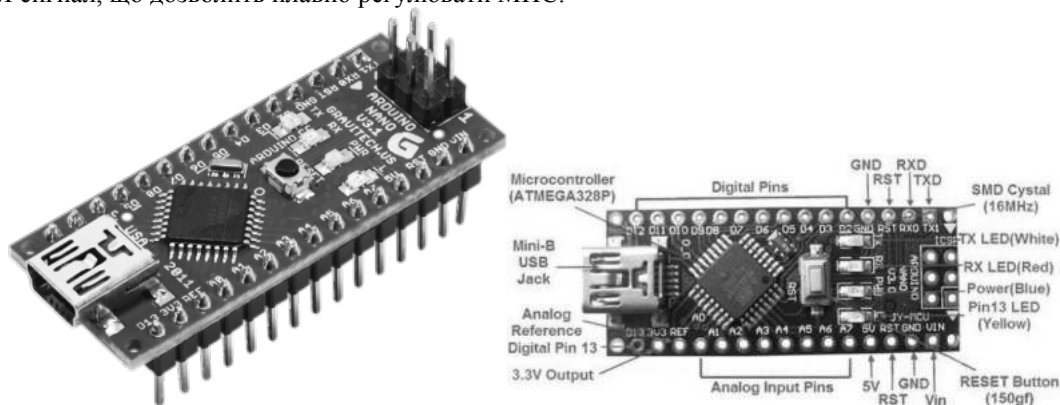


Рисунок 1– Основа стенду – мікроконтролер Arduino Nano

Даний мікроконтролер має можливість перетворювати аналогові сигнали з давачів струму та подільників напруги на цифрові та передавати ці данні на комп'ютер за допомогою віртуального терміналу через USB-порт. За допомогою вбудованого таймеру та зовнішнього фотодатчику можливо реалізувати точний вимір частоти обертів машин.

Стенд представляє собою дві електричні машини постійного струму, що з'єднуються між собою муфтою. Їх обмотки (якоря і збудження) послідовно з'єднані з джерелом живлення через датчики струму і силові ключі, які у свою чергу під'єднані до контролера. Наруга для вимірювання АЦП понижується резистивним дільником. Частота обертів вимірюється фотодатчиком.

Платформа Nano, побудована на мікроконтролері ATmega328 (Arduino Nano 3.0) або ATmega168 (Arduino Nano 2.x), має невеликі розміри і може використовуватися в лабораторних роботах. Вона має схожу з Arduino Duemilanove функціональність, проте відрізняється складанням. Відмінність полягає у відсутності силового роз'єму постійного струму і роботі через кабель Mini-B USB. Основні характеристики Arduino Nano, що використовується в складі розробленого стенду наведено в табл. 2.

Таблиця 2 Основні характеристики Arduino Nano

Мікроконтролер	Atmel ATmega168 або ATmega328
Робоча напруга (логічна рівень)	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12 В
Вхідна напруга (граничне)	6-20 В
Цифрові Входи / Виходи	14 (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ)
Аналогові входи	8
Постійний струм через вхід / вихід	40 м
Флеш пам'ять	16 Кб (ATmega168) або 32 Кб (ATmega328) при цьому 2 Кб використовуються для завантажувача
ОЗУ	1 Кб (ATmega168) або 2 Кб (ATmega328)
EEPROM	512 байт (ATmega168) або 1 Кб (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Розміри	1.85 см x 4.2 см

Для вимірювання постійного струму в обмотці якоря та збудження досліджуваних машин використовується доступний давач струму типу ACS712 (рис. 2).



Рисунок 2– Давач струму ACS712

Датчик струму ACS712 заснований на принципі, відкритому в 1879 році Едвіном Холлом (Edwin Hall). Мікросхема ACS712 випускається в мініатюрному 8-вивідному корпусі SOIC для поверхневого монтажу. Вона складається з прецизійного лінійного датчика Хола з малою напругою зміщення і мідним провідником, що проходить біля поверхні чіпа і виконує роль сигнального для струму. Вбудований формувач сигналу фільтрує створюване чутливим елементом напругу і підсилює її до рівня, який може бути визначений за допомогою АЦП мікроконтролера.

Силову основу стенду є транзистори. Вони виконують функцію регулятора напруги в обмотці якоря та збудження, використовуються для плавного пуску випробувальних двигунів. В роботі використовуються транзистори типу MOSFET IRF250 (200 V 30 A) для ланцюга обмотки якоря і MOSFET IRF840 (500 V 8,8 A) для ланцюга обмотки збудження (рис. 3).

Перевагою використання MOSFET в якості логічних перетворювачів очевидна, оскільки вони в статичному режимі не споживають енергії. Дійсно, не залежно від логічного стану на виході, завжди один із послідовно включених транзисторів є «відкритий», а інший «закритий», тому струм через них не протікає.

Проте при перемиканні із одного стабільного стану в інший (перехідний процес) звичайно струм протікає, і його слід враховувати (особливо при високих тактових частотах логічних схем). Крім того дані транзистори досить розповсюджені, що обумовлює їх невисоку вартість та доступність.



Рисунок 3– N-канальний MOSFET IRF250 та IRF840

Для вимірювання швидкості обертання використовується оптичний цифровий датчик (рис. 4).



Рисунок 4– Оптичний давач швидкості

Оптичний давач швидкості являє собою оптопару. Оптопара – оптоелектронний напівпровідниковий прилад, який складається з випромінювача та приймача випромінювання, між якими є оптичний зв'язок і забезпечена електрична ізоляція. Для роботи такого давача необхідно розмістити на валу двигуна диск або шматок твердого виробу (картону, пластику, текстоліту, акрилу і т.ін.). Оптоприймач рахує кількість імпульсів за одиницю часу і за допомогою програмного забезпечення в мікроконтролері визначається швидкість обертання. Давач є трьох провідним – по двом провідникам подається живлення "+" та "-", по третьому провіднику проходить сигнал від оптичного приймача, "-" в даній схемі є спільним.

Принципова електрична схема розробленого експериментального стенду наведено на рис. 5.

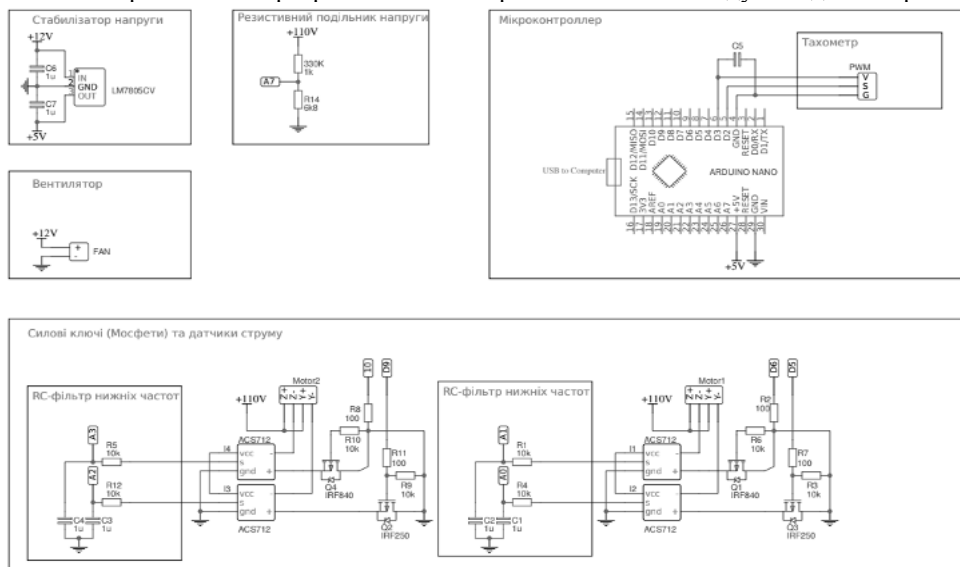


Рисунок 5– Принципова схема розробленого стенду

Апаратна частина розробленого експериментального стенду складається з наступних принципових частин та компонентів:

- джерело живлення 110В, що надходить з лабораторного блоку живлення на клеми керівного модулю;
- колекторні МПС з НЗ;
- модуль керування;
- мікроконтролер «Arduino nano» з мікросхемою зв'язку з комп'ютером;
- блок живлення 12в 300 мА;
- провідники та клемники;
- стабілізатор напруги на 5 В з конденсаторами;
- резистивний подільник напруги для вимірювання;
- два силових польових транзистори 500 В 8,8А;
- два силових польових транзистори 200 В 30А;
- алюмінієвий радіатор з ізолюючими прокладками та гвинтами, на якому закріплені транзистори, вентилятор для охолодження силових ключів;
- підтягуючі та обмежуючі резистори для транзисторів;
- датчики струму на ефекті Хола, що пропорційно перетворюють струм у напругу, що дозволяє виміряти її вбудованим АЦП мікроконтролера;
- RC фільтр нижніх частот. Необхідний, оскільки сигнали з датчиків струму не є неперервними, через те що силові ключі перемикаються з частотою 490 Гц;
- оптичний датчик на основі оптопари, що реагує на перешкоду, що заходить у його щілину. Дозволяє за допомогою вбудованого у мікроконтролер таймера вимірювати частоту обертів.

Загальний вигляд змонтованого експериментального стенду показано на рис. 6.

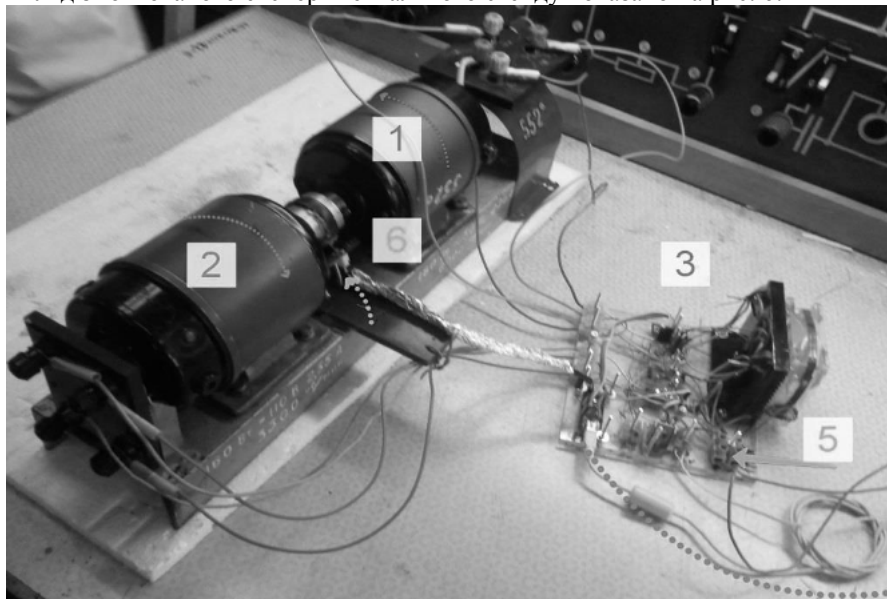


Рисунок 6– Загальний вигляд експериментального стенду

На рис. 6. показано: 1, 2 – досліджувані МПС із незалежним збудженням, які вмикаються зустрічно в режимі двигуна та узгоджено в режимі роботи генератора. В цьому режимі на обмотку якоря підключається реостат струмом 3 А, 50 Ом; 3 – апаратна частина, яка суміщає в собі мікроконтролер, силові ключі, давачі струму, напруги і т.ін.; 4 – панель живлення постійним струмом 110 В та джерело 220 В для блока живлення; 5 – входні термінали живлення стендом; 6 – оптичний давач швидкості; 7 – живлення мікроконтролера від автономного джерела;

До програмного забезпечення поставлені наступні вимоги: керування Мосфетами за допомогою ШІМ; зчитування показників датчиків, перерахунок значень; зчитування частоти обертів за допомогою переривань; комунікація з комп'ютером, отримання команд, вивід на екран показань; виконання поданих вище задач одночасно (Real-time). Всі вимоги були виконані за рахунок розробленої персонально та реалізованої в мікроконтролері авторської програми.

Розроблений експериментальний стенд здатен реалізовувати наступний функціонал за допомогою віртуального порту та програми Arduino ide (рис. 7): підключатися до комп'ютера, виводити данні на монітор, сприймати команди; одночасно керувати двома МПС з напругою живлення до 190В, струмом якоря до 5А, струмом збудження до 2А за допомогою ШІМ; плавно регулювати ШІМ з метою запобігання виходу



з ладу; вимірювати середній струм, протікаючий через обмотки з точністю до 0.1А; вимірювати частоту обертів з точністю до  $\pm 5$  об/хв; вимірювати вхідну напругу до 190В; розраховувати подану середню напругу за даними заповнення ШІМ та вимірної вхідної напруги; показувати час у секундах, з моменту підключення до комп'ютера з точністю до  $\frac{1}{2}$  секунди.

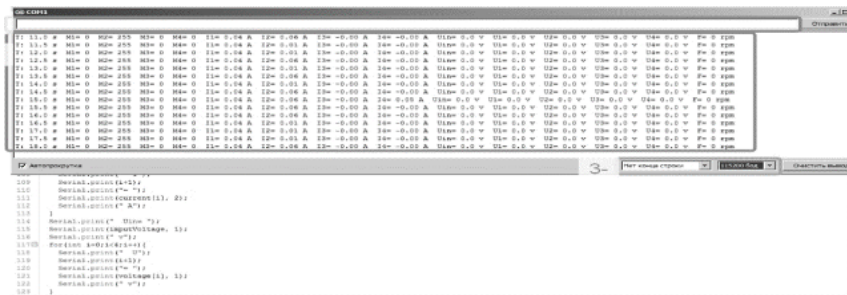


Рисунок 7– Монітор послідовного порту для обробки та отримання результатів

Дані поділяються на стовпчики: час у секундах з моменту запуску, з точністю до  $\frac{1}{2}$  секунди; 2 – стан ШІМу МОСФЕТів, де 0 – повністю закритий, 255 – повністю відкритий. МОСФЕТ 1-4; 3 – показники датчиків струму. Датчики струму мають точність близько 0.1 А; 4 –  $U_{in}$  –напруга на вході.

На рис. 8, для прикладу, показано розраховану характеристику  $\eta=f(P_2)$  для досліджуваної МПС.

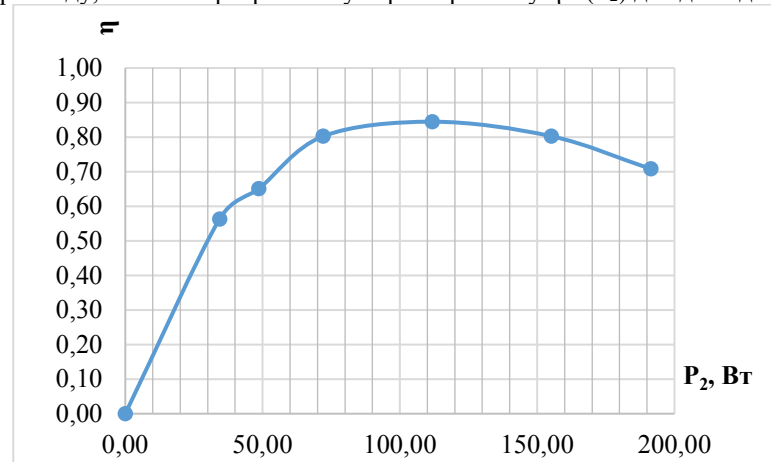


Рисунок 8– Робоча характеристика досліджуваної МПС

**Висновки** В роботі розроблено експериментальний стенд для дослідження малопотужних машин постійного струму. Використовуючи мікроконтролерну техніку, сучасні силові ключі та вимірювальні давачі, реалізовано авторське програмне забезпечення для керування досліджуваними електричними машинами та для реалізації будь-якої програми випробувань. Розроблений стенд можливо використовувати як в навчальному процесі для студентів напрямку енергетика, так і для дослідницьких цілей. За рахунок використання сучасних компонентів вдалося суттєво знизити габаритні розміри стенду та підвищити його енергоефективність. За допомогою розробленого стенду успішно проведено випробування МПС та отримано відповідні характеристики.

#### Список використаної літератури

1. Свирский Е.А., Попов П.К. Испытание машин постоянного тока. №3. КУБУЧ.: Ленинград, 1927.
2. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л., «Энергия», 1968.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2007.
4. Коваленко М. А. Автономный экспериментальный стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк. // Електротехніка і електроенергетика. – 2015. – №2. – С. 15–20.
5. K.Ramesh Design of Current Controller for Two Quadrant DC Motor Drive by Using Model Order Reduction Technique / K.Ramesh, K.Ayyar, Dr.A.Nirmalkumar, Dr.G.Gurusamy // International Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 7, No. 1, 2010
6. K. Ramesh, A. Nirmalkumar and G. Gurusamy, "Design of Digital IIR filters with the Advantages of Model Order Reduction Technique", International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering, Vol.1, No.2, pp 117-122, 2009

7. DC Motor with Speed and Current Closed Loops, Driven by eTPU on MCF523 [Електронний ресурс] // Freescale Semiconductor Literature Distribution Center. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2955.pdf>.

**M. Kovalenko**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5602-2001  
**O. Tymoshchuk**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-1863-3095  
**O. Samoilenko**, Msc., ORCID 0000-0002-6540-8109  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## **DEVELOPMENT OF AN DEVICE FOR SMALL POWER DIRECT CURRENT MOTORS TESTING WITH ELECTROMAGNETIC EXCITATION**

*In this paper are presenting the results of practical development, dedicated to the development of an experimental device for the studying of the parameters and characteristics of low-power direct current motors. According to the results, a principal scheme for the testing of these machines based on the microcontroller was developed. Traditional methods for current and voltage measuring, rotation speed have been replaced by modern high-sensitivity sensors. Storing of testing parameters and characteristic's and its further post processing is performed on a semi-automatic mode with the help of personal computer. Also, software has been developed to implement the required test program: no load mode, short circuit mode, etc. This device can provide us to do different types of direct current motor mods: we can test it as motor mode as generator mode. It significantly increases its universality at small overall dimensions. The hardware of the experimental device is mobile, that is, with the help of one it is possible to provide testing of different motors which are situated in different places. As direct current regulators are use PWM which reduce the overall dimensions and increased the reliability of the experimental device due to the rejection of massive rheostats. With the help of its device are investigated some practical characteristics of small power direct current motor. These results are compare with theoretical results.*

**Key words:** *experimental stand, DC machine, parameters and characteristics, electromagnetic excitation.*

### **References**

1. Svirsky E.A., Popov P.K. Direct current motors testing. No. 3. KUBUCH.: Leningrad, 1927.
2. Gervais G.K. Electrical machines industrial testing. L., "Energy", 1968.
3. Voldek A.I., Popov V.V. Electrical motors. Introduction to electromechanics. Direct current motors and transformers. St. Petersburg: Peter, 2007.
4. Kovalenko M. A. Autonomous experimental device for unipolar step motor testing which base on microcontroller / M. A. Kovalenko, D. S. Matsyuk. // Electrical engineering and power engineering. - 2015. - No. 2. - S. 15–20.
5. K.Ramesh Design of Current Controller for Two Quadrant DC Motor Drive by Using Model Order Reduction Technique / K.Ramesh, K. Ayyar, Dr. A. Nirmalkumar, Dr. G. Gurusamy // International Journal of Computer Science and Information Security, Vol. 7, No. 1, 2010
6. K. Ramesh, A. Nirmalkumar and G. Gurusamy, "Design of Digital IIR filters with the Advantages of Model Order Reduction Technique", International Journal of Electronics, Communications and Computer Engineering, Vol.1, No.2, pp 117-122 , 2009
7. DC Motor with Speed and Current Closed Loops, Driven by eTPU on MCF523 [Electronic resource] // Freescale Semiconductor Literature Distribution Center. - 2005. - Access mode to the resource: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2955.pdf>.

Надійшла 12.10.2019

Received 12.10.2019

М.О. Логвинюк, магістр  
Є.В. Новаківський, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8682-5710  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ КОТЛА ШЛЯХОМ РОЗПОДІЛЕННЯ ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПО ВИСОТІ ТОПКИ

В статті розглянуто один з методів зменшення аварій екранних труб котельних агрегатів. Спосіб полягає в рівномірному розподіленні теплового навантаження в зоні активного горіння, шляхом заміни пальників з 1-2 ярусним розташуванням на 2-4 ярусне зі зменшенням одиничної потужності пальника. Дослідження виконані розрахунковим шляхом, з позонним розрахунком котла. Представлена математична розрахункова модель та графічне розбиття топки котла на зони горіння.

Результати дослідження показали що зростання кількості пальників та зменшення одиничної потужності останніх, призводить до більш рівномірного теплосприйняття по висоті екранних труб, зменшується пікове максимальне теплове навантаження з 100 % до 86,5% (590 кВт/м<sup>2</sup> до 510 кВт/м<sup>2</sup>). При збільшенні кількості пальників зростає теплове навантаження в нижній частині активної зони горіння, що призводить до більш інтенсивного кипіння, як наслідок зростання швидкості паро-рідинної суміші в екранних трубах та відповідно збільшується охолодження випарних труб в областях найбільшого теплового навантаження. Температура металу екранних труб в зонах максимального теплового навантаження знижується на 20-30 °С, що при тривалому терміні експлуатації призводить до зменшення температурного старіння, а відповідно подовження міжремонтного терміну експлуатації котла.

Недоліком такого методу є ускладнення та здорожчання виготовлення екранних труб, збільшення гідравлічного опору підйомних труб за рахунок збільшення кількості вигинів труб, ускладнюється система подачі палива та повітря. Результати розрахунків приведені в графічному вигляді, як залежності питомого теплового навантаження, температури зовнішньої стінки труби, допустимого теплового напруження, по висоті труби при одно-, дво- та чотирьох ярусному розташуванні пальників в зоні активного горіння.

**Ключові слова:** теплосприйняття, зона активного горіння, позонний розрахунок, екранні труби, температура стінки, термін експлуатації.

### Вступ

Одна з причин аварії котельних установок є руйнація екранних труб, що пов'язана з температурним старінням та перегріву металу екранних труб. Локальна температура екранних труб залежить від гідравлічного режиму та теплового навантаження на екрані труби та її геометричного розташування. Нерівномірність теплових навантажень топкових поверхонь може привести до порушення циркуляції і пов'язаним з ним перегоранням труб. [1,2,3]

Топка є одною з найважливіших складових котла, від якої значною мірою залежить його економічність і надійність експлуатації. Однак стаціонарні системи контролю температурного режиму екранних труб в даний час не знаходять широкого застосування через низьку надійність роботи датчиків контролю і трудомісткості їх заміни. І тільки на деяких станціях пройшли випробування системи технічної діагностики екранних поверхонь нагріву. [1,3,4]

В експериментальних роботах по оцінці теплового стану топки проводяться вимірювання променистих локальних теплових потоків, температур факела та температур екранів[4]. При цьому застосовуються різні методи вимірювань [4,5].

### Аналіз літератури

На сьогоднішній день, для генерації пари, використовується дуже велика кількість парових котлів. Однак компоновка топкових камер промислових та енергетичних котлів в межах 25-220 т/год в більшості однакова [1,3].

Топкові камери П та Н подібних компоновок котлів продуктивністю 25-75 т/год мають одноярусне розташування пальників при спалюванні твердого палива та двоярусне при використанні газомазутного палива. При зростанні паропроductивності котлів (110-220 т/год) пальники в топковій камері розташовують в два яруси на твердому паливі, що пов'язано з обмеженою одиничною потужністю пальників.

Основна причина аварій екранних труб котельних агрегатів є локальний перегрів в зонах максимального теплового навантаження та в зонах зі зміною геометрію топкових камер [6].

Експериментальне вимірювання є коштовним, та потребують зупинки котла, тому часто застосовують CFD методи моделювання теплових процесів в топці котла та температури екранних труб [7].

Один з варіантів зменшення локальних теплових навантажень є зменшення одиничної потужності зі збільшення кількості паликових пристроїв та рівномірне розподілення теплового навантаження по всьому топковому об'єму.

Для аналізу температурного режиму екранних труб виконується теплогідравлічний розрахунок котла [2,8,9]. Цей розрахунок визначає питоме теплове навантаження екранних труб та надійності циркуляції в екранах з найменшим теплосприйняттям. В той же час швидкість пароводяної суміші, залежить від паровмісту в даному перерізі труби, а відповідно і температура екранної труби.

#### Опис та вирішення проблеми

В даній роботі представлено аналіз теплосприйняття по висоті екранних труб при позонному тепловому розрахунку [9], при розташуванні паличників в один-, два- та чотири яруси.

Для побудови математичної моделі теплового навантаження та температурного режиму екранних труб були використані залежності [9]:

- Температура продуктів згорання на виході із зони максимального теплового навантаження:

$$g''_{\max} = \frac{100}{100 - q_4} \frac{Q_n^p \beta_{\text{зони}} + Q_{\text{пов}} - Q_6}{Vc''_{\max}} - \frac{\sigma_0 a_{\text{зони}} (T''_{\max})^4 (\psi F)}{B_p^{\text{зони}} Vc''_{\max}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

- Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в зоні максимального теплового навантаження:

$$q_{\text{пр}}^{\max} = \sigma_0 a_{\text{зони}} \frac{[(g''_{\max})^4 - g_a^4]}{2} \psi_{\text{ср}}, \text{ кВт/м}^2 \quad (2)$$

- Температура згорання на виході із наступних зон:

$$g'' = \frac{\Delta\beta_{\text{сз}} Q_n^p}{Vc''} + \frac{c'}{c''} g' - [1 + (\frac{g''}{g'})^4] \frac{\sigma_0 a_{\text{зони}} (g')^4 [(\psi'' - \psi') F_{\text{ср}} + F_{\text{см}} \psi_{\text{ср}}]}{2B_p^{\text{зони}} Vc''}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

- Середнє теплове навантаження радіаційних поверхонь в наступних зонах:

$$q_{\text{пр}} = \sigma_0 a_{\text{зони}} \frac{[(g')^4 - (g'')^4]}{2} \psi_{\text{ср}}, \text{ кВт/м}^2 \quad (4)$$

- Температура зовнішньої стінки екранних труб:

$$t_{\text{см}} = t_s + \Delta t + \beta \mu q_{\max} \left( \frac{\delta_{\text{см}}}{\lambda} \cdot \frac{2}{1 + \beta} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

На прикладі котлоагрегату Е-58-18-280 було запропоновано замінити стандартні паличники, що розташовані в два яруси для газомазутного палива або в один ярус для твердого, на пристрої меншої потужності але зі збільшенням їх кількості та розташувати по кутах топки в чотири яруси. Таке рішення дозволяє розтягнути зону активного горіння по висоті топки, що в свою чергу призведе до рівномірного розподілення теплового навантаження на екранні труби по висоті топки, зокрема в зоні активного горіння. На рисунку 1 представлено розбиття топки на зони горіння. Розподіл топки на чотири зони горіння та зону активного горіння виконано по рекомендаціям літератури [9].

При будь-якій компоновці паликових пристроїв вони розташовуються в зоні активного горіння (зона АГ). При одноярусному розташуванні паличників зона активного горіння має висоту 3.2м для визначеного котла (рисунк 1), при двоярусному розташуванні зона активного горіння має висоту 3,66м, а при чотириярусному 4,4м., що обумовлено міжпаличковими відстанями. На рисунку 2 зображено питоме теплове навантаження при одно-, дво- та чотириярусному розташуванні паличників. З графіку теплового навантаження екранних труб топкової камери (рисунк 2) видно, що зменшення одиничної потужності паличників та збільшення їх кількості (ярусів) призводить до зменшення питомого теплового навантаження. Так при одноярусному розташуванні максимальне питоме теплове навантаження складає 590 кВт/м<sup>2</sup>, при двоярусному 560 кВт/м<sup>2</sup>, та при чотириярусному 510кВт/м<sup>2</sup>. Завдяки збільшення кількості рядів паличників нижній ярус паличників розташовується нижче, що призводить до збільшення теплового навантаження на

нижніх відмітках топки. Відповідно збільшення кількості пальників призводить до зменшення нерівномірності теплосприйняття випарних труб.

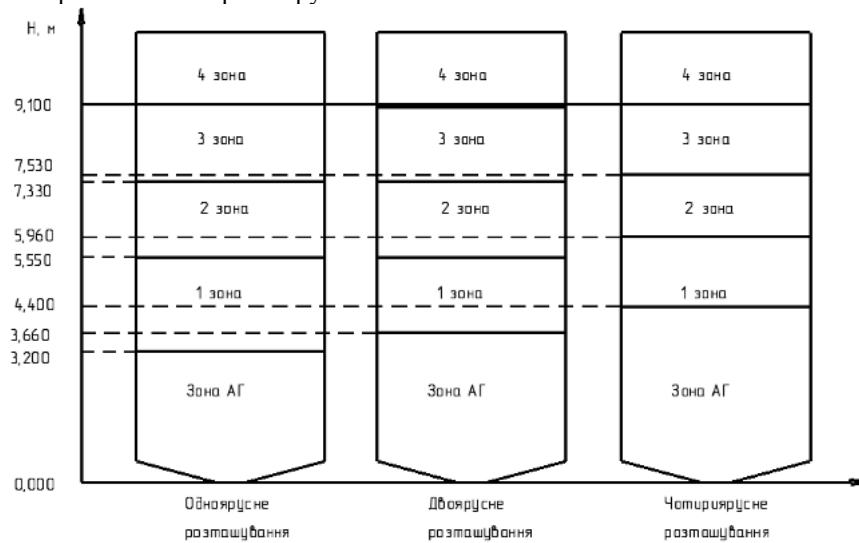


Рисунок 1 – Розбиття топки на зони горіння

Так при застосуванні чотириярусного розташування пальників теплосприйняття зони активного горіння та першої зони змінюється в межах 35% в порівнянні з іншими компоновками пальникових пристроїв. Так теплове навантаження нижньої ділянки зони активного горіння зростає на 35%. Зникають явно виділені зони максимального теплового навантаження, які в межах зон активного горіння та зони 1 мають відхилення більш ніж на 100% (для одно- та двоярусного розташування). Порівнюючи одно- та двоярусне розташування пальників (рисунок 2) можна зробити висновки, що при збільшенні кількості пальників зона максимального теплового навантаження збільшується по висоті при зменшенні абсолютного значення. Значення та характер розподілу теплового напруження, що отриманні в результаті розрахунку та представлено на рисунку 2 для одно та двоярусного розташування пальників співпадає з результатами експериментальних робіт [4] та CDF моделювання [7].

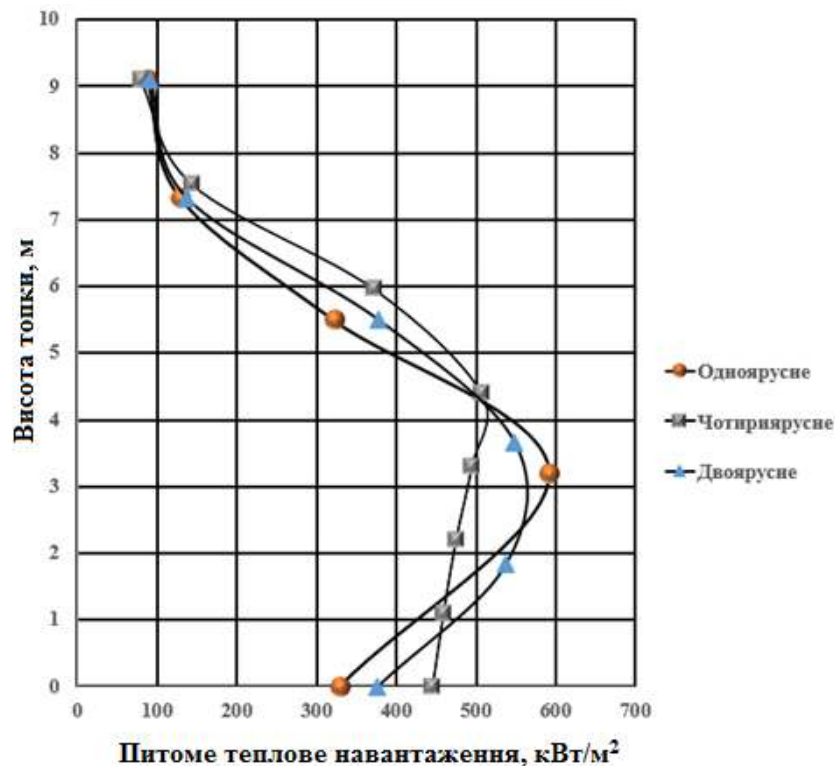


Рисунок 2 – Питоме теплове навантаження при одно-, дво- та чотириярусному розташуванні пальників

На рисунку 3 показано зміну зовнішньої температури стінки екраних труб. З застосуванням кількярусного розташування пальників більш рівномірно розподіляється теплове навантаження екраних труб, а відповідно вирівнюється зовнішня температура стінки екраних труб по висоті в зоні активного горіння. Згідно рисунку 3 максимальна локальна температура стінки труби знижується з 422 С при одноярусному розташуванні до 407 С та 367 С при двоярусному та чотириярусному розташуванні пальників відповідно.

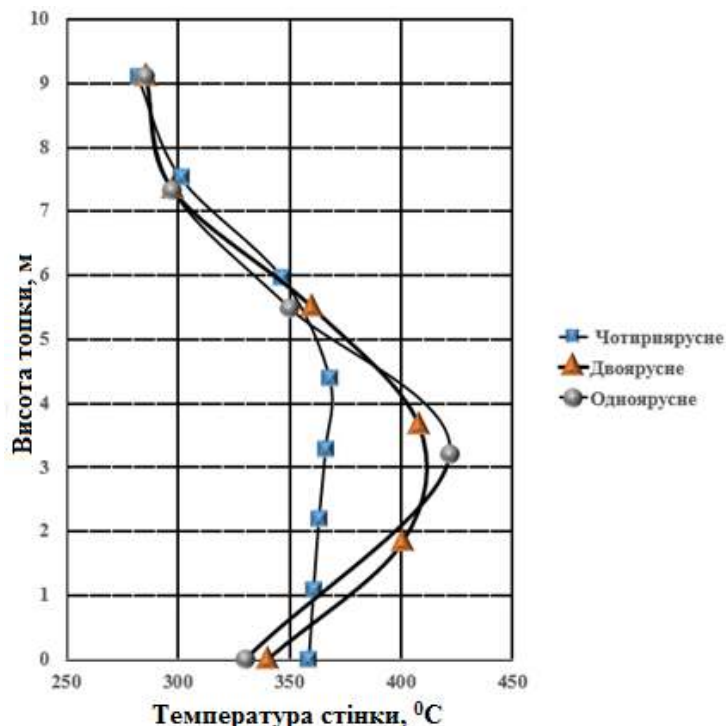
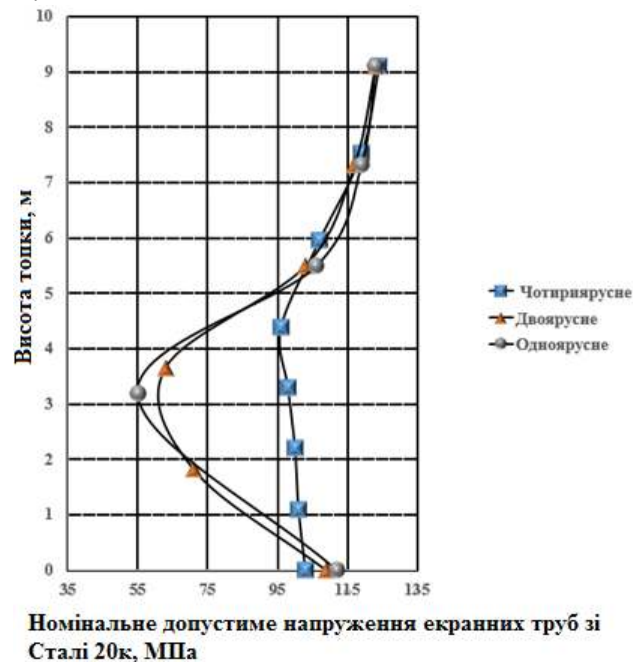


Рисунок 3 – Зміна зовнішньої температури стінки екраних труб

Термін експлуатації металу екраних труб напряму залежить від максимальної температури стінки в зонах найбільшого теплового навантаження впродовж тривалої експлуатації. На рисунку 4 зображено допустиме теплове напруження по висоті топki котла в залежності від рядності розташування пальників. Цей графік обернено пропорційний температурі стінки металу та показує зони найбільших вразливостей труб. Згідно рисунку 4 можуть бути визначенні зони контролю температур стінки металу та теплового навантаження.



Номінальне допустиме напруження екраних труб зі Сталі 20к, МПа

Рисунок 4 –Графік зміни номінального допустимого напруження Сталі 20к в залежності від температури по висоті топki

З рисунку 4 видно, що зі збільшенням ярусності пальників збільшується допустиме напруження, а відповідно подовжується термін експлуатації екранних труб котла. Особливо це виражено при чотириярусному розташуванні пальників. Оскільки руйнація екранної труби відбувається не по всій довжині, а локально в зонах перегріву.

В таблиці 1 наведено максимальне теплове навантаження, максимальна температура стінки екранної труби без урахування температурної розвірки та допустиме напруження металу, що відповідає даним температурам при терміні експлуатації  $10^5$  та  $3 \times 10^5$  годин [10]. Згідно даної таблиці можна зробити висновок, що при розподіленні теплового навантаження, а відповідно пониження температури зменшується вплив температурного старіння на метал труб, а відповідно збільшується надійність котельного агрегату.

Таблиця 1 – Максимальне теплове навантаження, максимальна температура та допустиме напруження без урахування температурної розвірки

Позначення	Одноярусне	Двоярусне	Чотириярусне
$q_{\max}$ , кВт/м <sup>2</sup>	590	560	510
$t_{\max}$ , °C	422	407	367
$\sigma$ , Мпа (при $t_{\text{експ}}=10^5$ годин)	78	87	96
$\sigma$ , Мпа (при $t_{\text{експ}}=3 \times 10^5$ годин)	55	63	96

### Висновки

З аналізу проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:

1. Зростання кількості пальників зі зменшенням одиничної потужності призводить до більш рівномірного теплосприйняття по висоті на екранні труби.
2. При збільшенні кількості пальників збільшується середнє теплове навантаження зони активного горіння що призводить до збільшення паровмісту в нижній частині зони активного горіння та відповідно зростання швидкості паро рідинної суміші в екранних трубах та відповідно до збільшення інтенсивного охолодження випарних труб в областях найбільшого теплового навантаження.
3. Збільшення кількості пальників призводить до зменшення максимального теплового навантаження відповідно в цих зонах зменшується температура стінки металу на 20-30°C, що при тривалому терміні експлуатації призводить до зменшення температурного старіння а відповідно подовження міжремонтного терміну експлуатації котла.
4. При розташуванні пальників в чотири ряди зменшується пікове максимальне теплове навантаження з 100 % до 86,5% (590 кВт/м<sup>2</sup> до 510 кВт/м<sup>2</sup>.)

### Список використаної літератури

1. Мейкляр М.В. Современные котельные агрегаты ТКЗ 3 изд. / М.В. Мейкляр. – Москва, Энергия, 1978. – 223 с.
2. Локшин В.А. Гидравлический расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / В.А. Локшин, Д.Ф. Петерсон, А.Л. Шварц. – Москва, Энергия, 1978. – 256 с.
3. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators Design, Applications, and Calculations By V. Ganarathy, ABCO Industries Abilene, Texas, U.S.A.2003
4. Холщев В. В., Сравнительный анализ двух экспериментов, проведенных в разные годы на мазутных котлах/ Электрические станции, 2001, 3, с12-14
5. Weglowski, B, Taler, J, and Duda, P. Monitoring of thermal stresses in steam generators. Czech Republic: N. p., 2003. Web.
6. <http://algoritmist.ru/korroziya-i-korrozionnye-povrezhdenija/xarakter-povrezhdenija-ehkrannyx-trub-gazomazutnyx-kotlov.html>
7. [Three-Dimensional Thermal Stress Distribution of Opposed Firing Boiler: Numerical Study and Experimental Verification](#) Yunjin Ao; Na Li; and Qulan Zhou. 2019
8. Лебедев И.К. Гидродинамика паровых котлов / И.К. Лебедев. – Москва, Энергоатомиздат, 1987. – 240 с.
9. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) 2 изд. / [Н.В. Кузнецов, В.В. Митор, И.Е. Дубовский и другие]. – Москва, Энергия, 1973. – 296 с.
10. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды РД 10-249-98 / [В.С. Котельников, Ю.К. Петреня, Н.А. Махутов и другие]. – Москва, 1998. – 210 с.



M. Lohvyniuk, Msc  
Y. Novakivskiy, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8682-5710  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## INCREASING OF REABILITY OF WORK OF BOILERS BY EQUAL DISTRIBUTION OF THE HEAT LOAD OVER THE HEIGHT OF FIREBOX

Detection of one of the methods for reducing the emergency screens of boiler units pipes is in the process of being discovered. Specially used in the even distribution of heat load in the active combustion zone, replacing the burners with 1-2 tier arrangement by 2-4 tier, reducing the single power of the finger. Investigation of the supported solution, with the posture of the boiler. The mathematical calculation model and graphical division of the boiler furnace into combustion zones are presented. The results of the research showed that a large number of burners and a decrease in the unit power of the population, which reaches a greater uniform thermal voltage, are detected by the height of the shielded pipe, reducing peak maximum consumption from 100% to 86.5% (590 kW / m<sup>2</sup> to 510 kW / m<sup>2</sup>) As the number of burners increases, the thermal load in the lower part of the combustion zone increases, which results in more intense boiling, as a consequence of the increase in the velocity of the vapor-liquid mixture in the screen tubes and, accordingly, the cooling of the evaporator tubes in the regions of the highest heat load. The temperature of the screen metal in the zones of maximum heat load of the pipes is reduced by 20-30 °C, which, with a long service life, leads to a decrease in temperature aging, and consequently an extension of the inter-repair life of the boiler. The disadvantage of this method is the complication and complication of the manufacture of screen pipes, increase the hydraulic resistance of the lifting pipes by increasing the number of bends of pipes, complicates the system of supply of fuel and air. The results of the calculations are presented in graphical form, as the dependence of the specific heat load, the temperature of the outer wall of the pipe, the allowable thermal stress, the height of the pipe at one-, two- and four-tier arrangement of burners in the zone of active combustion.

**Key words:** heat perception, active combustion zone, posture calculation, screen tubes, wall temperature, service life.

### References

1. Meikler M.V. Modern boiler units TKZ 3 pub. / M.V. Meker. – Moscow, Energy, 1978. – 223 p.
2. Lokshin V.A. Hydraulic calculation of boiler units (normative method) / V.A. Lokshin, D.F. Peterson, A.L. Schwartz. – Moscow, Energy, 1978. – 256 p.
3. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators Design, Applications, and Calculations By V. Ganapathy, ABCO Industries Abilene, Texas, U.S.A.2003
4. Holshchev VV, Comparative analysis of two experimental oil-fired boilers tested in different years / Power Plants, 2001, 3, p12-14
5. Weglowski, B, Taler, J, and Duda, P. Monitoring of thermal stresses in steam generators. Czech Republic: N. p., 2003. Web.
6. <http://algoritmist.ru/korrozija-i-korrozionnye-povrezhdenija/xarakter-povrezhdenija-ehkrannyx-trub-gazomazutnyx-kotlov.html>
7. [Three-Dimensional Thermal Stress Distribution of Opposed Firing Boiler: Numerical Study and Experimental Verification](#) Yunjin Ao; Na Li; and Qulan Zhou. 2019
8. Lebedev I.K. Hydrodynamics of steam boilers / I.K. Lebedev. – Moscow, Energiyatompublisher, 1987. – 240 p.
9. Thermal calculation of boiler installations (regulatory method). 2 pub. / [N.V. Kuznetsov, V.V. Mitor, I.E. Dubovskiy and others]. – Moscow, Energy, 1973. – 296 p.
10. Standards for calculating the strength of stationary boilers and pipelines of steam and hot water GD 10-249-98 / [V.S. Kotelnikov, Y.K. Petrenia, N.A. Makhutov and others]. – Moscow, 1998. – 210 p.

Надійшла 15.10.2019  
Received 15.10.2019



Іщенко О.С., PhD студентка, ORCID 0000-0003-3315-4842  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ R STUDIO ДЛЯ АНАЛІЗУ ФАКТОРІВ ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

*Зменшення рівня енергоспоживання є одним із пріоритетних напрямів розвитку для всіх енергоспоживачів. Вибір ефективної та надійної мови програмування дозволить забезпечити якісний аналіз всіх можливих впливів, а відповідно і більш раціональне енергоспоживання споживачами та підвищити якість управління енергоспоживанням. Основною метою даної роботи є визначення засобів R Studio саме для виявлення найбільш впливових на енергоспоживання факторів. Інформаційні технології дозволяють обробляти великі бази даних, а також застосовувати математичні засоби для виявлення факторів, які впливають на рівень енергоспоживання. R Studio є відкритим джерелом інтегрованої оболонки і має зручний інтерфейс, що спрощує роботу з R. Ряд особливостей, таких як підсвічування і автоматичне завершення коду, зручна навігація по скрипту і інші, роблять R Studio привабливою для аналізу статистичних баз даних з великою кількістю змінних. У даній статті докладно описаний вміст головного вікна R Studio та його основний функціонал. На прикладі бази даних підприємства було розглянуто математичні інструменти R Studio: побудовано матрицю парних коефіцієнтів кореляції для факторних ознак, проведено кореляційний аналіз впливу факторів на енергоспоживання.*

**Ключові слова:** R Studio, кореляційний аналіз, програмне забезпечення, енергоспоживання, бази даних, інформаційні технології.

**Вступ.** Для прийняття оптимальних рішень при визначенні допустимого зменшення енергоспоживання підприємства або домогосподарства широкого розповсюдження зазнав метод факторного аналізу. Знаходження залежностей між енергоспоживанням та впливаючими факторами, виявлення найбільш значущого фактору та відсіювання менш значущих для побудови регресійної моделі можна назвати першим кроком при оцінці та побудові прогнозу [1-5].

Застосування факторного аналізу в інформаційних технологіях (ІТ) дозволить впливати на прискорений процес аналізу, обробки, поширення і використання великої бази інформації, а також своєчасно приймати необхідні рішення і планувати діяльність відповідно до отриманих результатів. На сьогоднішній день інформаційні технології виступають каталізатором еволюції в світі. Тому застосування ІТ для аналізу факторів призводить до розвитку науково-технічного прогресу і до широкого використання результатів в сфері енергетики [6].

У зв'язку з цим застосування сучасних комп'ютерних технологій і розробка нових методів з їх використанням обумовлена низкою причин, серед яких:

- зростання обсягів інформації;
- складність структури даних;
- поява сучасних методів прогнозування, їх розвиток і впровадження;
- складність алгоритмів розрахунку та інтерпретації результатів;
- високі вимоги до якості прогнозів;
- необхідність використання результатів прогнозування для вирішення задач планування і управління.

Безліч рядів техніко-економічних показників, що відображають зростання підприємств і компаній, мають нелінійний характер, що ускладнює їх аналіз та прийняття управлінських рішень на підставі статистичних даних.

R - мова, що дозволяє користувачеві використовувати оператори циклів, щоб послідовно аналізувати кілька наборів даних. Також мова R надає можливість об'єднати в окрему програму різні статистичні функції для проведення більш складного аналізу. R - мова з багатьма функціями для виконання статистичного аналізу і графічного відображення результатів, які візуалізуються у власному вікні і можуть бути збережені в різних форматах. Результати статистичного аналізу можуть бути відображені на екрані, а проміжні результати (P-values, коефіцієнт регресії і т. п.) можуть бути збережені в файлі і використовуватися для подальшого аналізу.

R Studio - це вільне та відкрите джерело інтегрованого середовища розробки для R, статистичних обчислень мова для аналізу даних. Є два продукта R Studio. Один - це R Studio Server, який може бути доступним через веб-браузер з віддаленого сервера Linux. Інший продукт, який працює локально - R Studio Desktop, який доступний для Microsoft Windows, Mac OS X та Linux [7-11].

© Іщенко О.С., 2019

#### **Мета та завдання дослідження**

Метою роботи є визначення засобів R Studio для оцінки найбільш суттєвих факторів, що впливають на обсяги енергоспоживання.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. Розгляд вмісту головного вікна та існуючих функцій в інтегрованому середовищі R Studio.
2. Оцінка колінеарності факторів за допомогою побудови матриці парних коефіцієнтів кореляції засобами R Studio.
3. Аналіз впливу факторних ознак на результативну ознаку.

#### **Матеріали та результати досліджень**

1. Розглянемо вміст головного вікна програми R Studio. У верхньому рядку знаходяться основні меню: File, Edit, Code, View, Plots, Session, Build, Debug, Profile, Tools, Help. У другому рядку знаходиться панель швидкого доступу. Перша іконка дозволяє створити файли різних типів, друга іконка також дозволяє створити проєкт в R, третя іконка, Open an existing file, дозволяє відкрити вже існуючий файл (у першій та другій іконки з правої сторони знаходиться стрілка, при натисканні на яку з'являється випадаючий список). Наступні дві іконки дозволяють зберегти поточний файл або всі відкриті файли. За допомогою іконки Print the current file можна роздрукувати поточний файл (поточний файл відображається у верхньому лівому вікні). Go to file/function дозволяє швидко здійснити перехід до необхідного файлу чи функції.

У верхній лівій чверті знаходиться вікно редактора поточних файлів. З допомогою вкладок зверху можна здійснити перехід між всіма відкритими файлами. Іконки у правому верхньому куті дозволяють згорнути або розгорнути дане вікно. Ще нижче знаходить панель для швидкого доступу у даному вікні (див. Рис. 4). Дві стрілки на початку панелі дозволяють перемикатися між різними відкритими файлами. За допомогою наступної іконки можна зберегти поточний відкритий файл. Source on Save дозволяє налаштувати синхронізацію файла зі своїм джерелом. Іконка File/Replace дозволяє знайти або замінити необхідну інформацію у файлі. Code Tools містить у собі функції для роботи з кодом. Compile Report дозволяє скласти звіт, у якому буде надано сам код, а також вихідний результат у бажаному форматі (MS Word і т.ін.). Перша іконка у лівому куті Run the current line or section запускає обраний рядок або фрагмент. Друга іконка Re-Run previous code region, запускає попередній фрагмент коду. Іконка Source the contents of the active document показує весь вміст активного документу (з правої сторони знаходиться стрілка, при натисканні на яку з'являється випадаючий список). Знизу даного вікна у правому куті відображається місцезнаходження текстового курсора, наприклад 52:1 означає, що курсор вводу стоїть у 51 рядку перед 1-м знаком. У нижньому правому куті знаходить кнопка, для вибору мови на яку можна конвертувати код в R [9, 11].

Вкладка Console знаходиться у нижній лівій чверті головного вікна. Його можна назвати найважливішим для роботи в R. У Console можна прописувати свої команди, а також продивлятися результати роботи програми. Вкладка Terminal забезпечує доступ до системної оболонки зсередини RStudio IDE (Integrated Development Environment).

У верхній правій чверті головного вікна знаходиться вкладка Environment, що містить інформацію про змінні, дані, значення, функції і т.ін. (див. Рис. 1). Дана вкладка дуже корисна коли є велика кількість змінних у пам'яті комп'ютера. На панелі швидкого доступу вкладки Environment представлений найбільш важливий функціонал. Перша іконка забезпечує завантаження робочого простору R (при зберіганні робочого простору зберігаються напрацювання поточної сесії, назви змінних, всі об'єкти, моделі і т.ін.). Друга іконка дозволяє зберегти робочий простір. За допомогою третьої іконки можна імпортувати бази даних в R. Наступна іконка дозволяє очистити робочий простір. За допомогою першої іконки у правому верхньому куті можна налаштувати як буде відображатися дане вікно: список, матриця. Наступна іконка дозволяє оновити інформацію. Наступна вкладка History відповідає вивід інформації про історію команд (див. Рис. 4). Дві перші іконки відповідають за завантаження та збереження історії відповідно. За допомогою іконки To Console можна перемістити обрану команду у вікно Console. Команда To Source копіює обрану команду до поточного файлу скрипта. За допомогою останніх двох іконок можна видалити виділені рядки або ж взагалі всі команди. Через поле вводу вікна у верхньому куті можна здійснити пошук по історії команд. Вкладка Connections дозволяє легко підключатися до різних джерел даних та досліджувати об'єкти та дані всередині з'єднання. Він призначений для роботи з різними інструментами для роботи з базами даних в R.

У нижній правій чверті знаходиться вікно з вкладками: Files (містить список файлів у обраній теці), Plots (вивід графіків), Packages (містить інформацію про всі пакети, також можна видалити або завантажити потрібний пакет), Help (відображення сторінки довідки про потрібну функцію), Viewer (використовується для перегляду локального веб-вмісту).

2. Для оцінки факторів впливу на енергоспоживання підприємства шляхом побудови регресійної моделі засобами R Studio обрано базу даних показану на Рис. 1. Статистичні дані загального споживання

електроенергії (tec) зібрані за дванадцять місяців, також обрані наступні фактори впливу: «Градусо-доба» (dd), «Кількість робочих годин» (wh), «Тариф» (et).

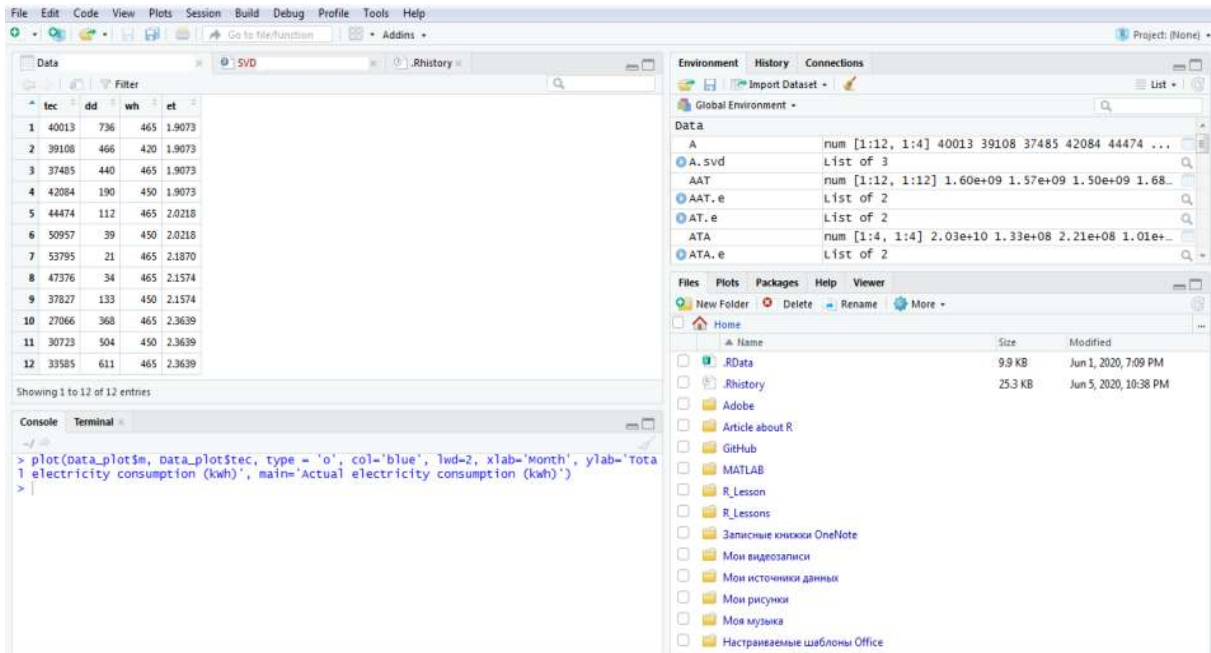


Рисунок 1 – Представлення бази даних у головному вікні R Studio

Як було сказано вище, R Studio має у своєму функціоналі можливість побудови графіків. На Рис. 2 у нижній правій чверті представлено графік загального енергоспоживання за досліджуваний період.

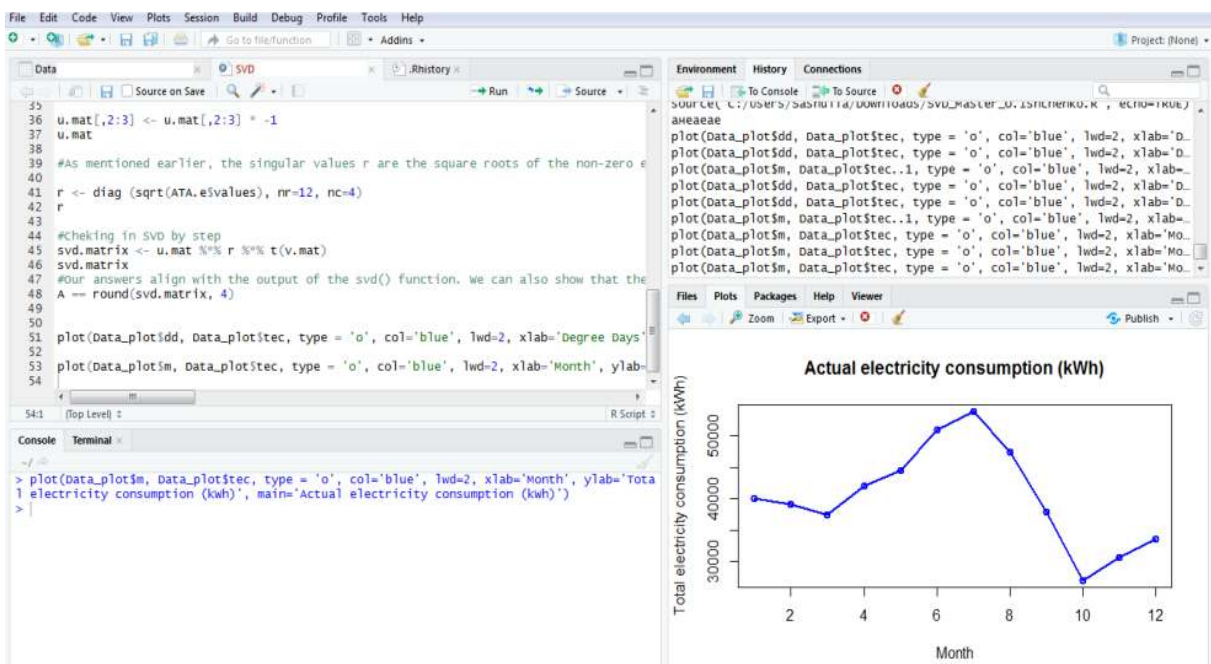


Рисунок 2 – Код та вивід даних для побудови графіка енергоспоживання підприємства за досліджуваний період

Наступним кроком після збереження бази даних у програмному забезпеченні R Studio була перевірка факторів на наявність колінеарності між ними, це забезпечить перевірку на незалежність факторів між собою, що в свою чергу впливає на побудову якісної регресійної моделі. Для оцінки наявності зв'язку між факторними ознаками було використано інструмент кореляції (cor) у R Studio [12-14].

На Рис. 3 виділено код для виводу досліджуваних даних, а потім вже для побудови матриці кореляційного зв'язку між факторами. Можна побачити, що при запиті на вивід досліджуваної бази даних виводиться лише частина – дані за 6 місяців, але це специфіка характерна для виводу досліджуваних даних при розрахунках, насправді досліджується повна база даних.

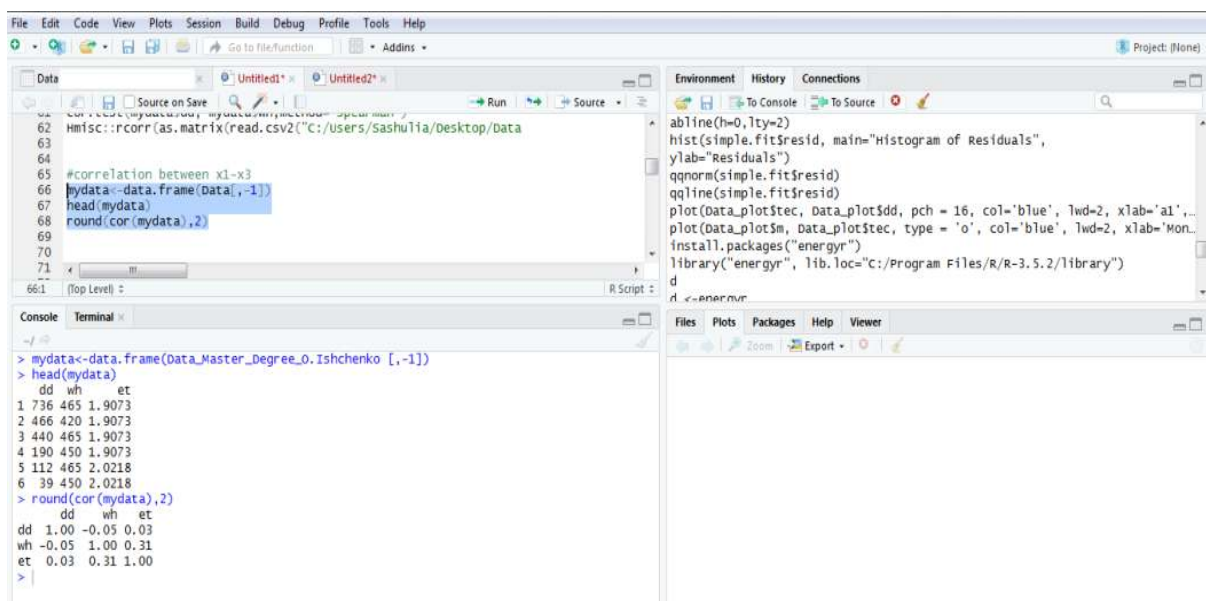


Рисунок 3 – Код та вивід даних при побудові матриці кореляційного зв'язку між факторами

Аналіз такої матриці дозволяє визначити сили зв'язку між факторними ознаками та наявність колінеарності. Для характеристики сили зв'язку прийнято використовувати шкалу, надану у Таблиці 1 [12-14].

Таблиця 1 - Характеристика сили зв'язку між ознаками

Значення коефіцієнту кореляції	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	0,9 – 0,99
Характеристика сили зв'язку	слабка	помірна	помітна	висока	дуже висока

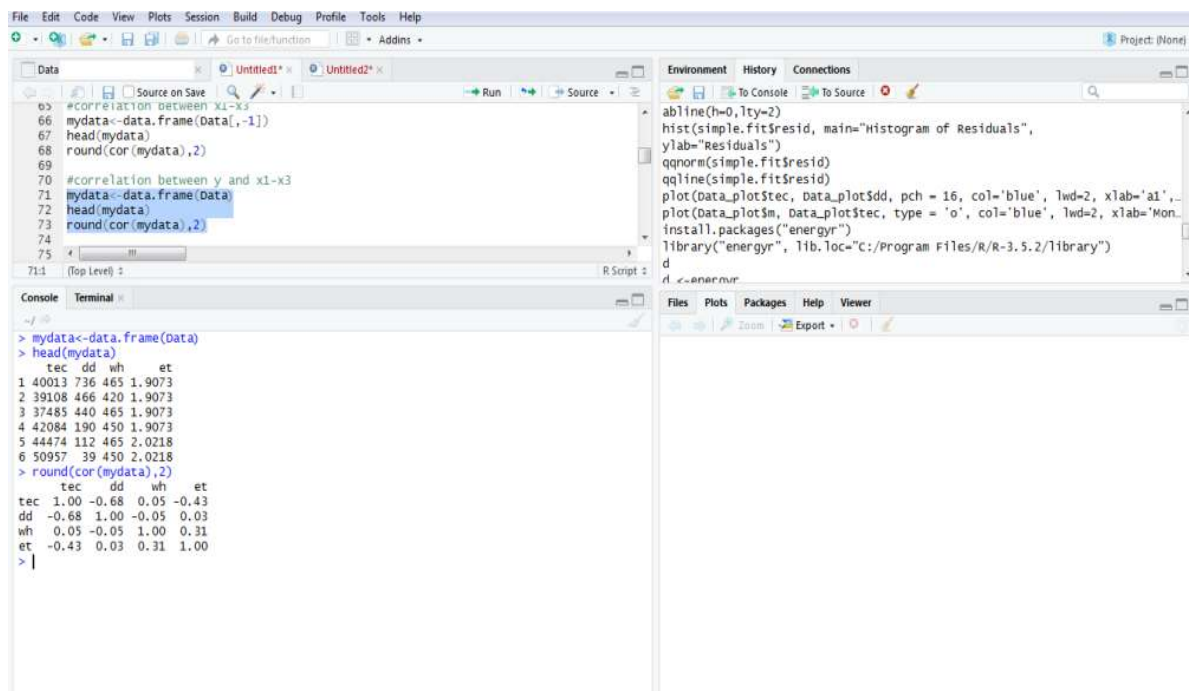


Рисунок 4 – Код та вивід даних при побудові матриці кореляційного зв'язку між результативною та факторними ознаками

Використовуючи Таблицю 1 для характеристики сили зв'язку можна визначити, що сила зв'язку між факторами «Градусо-доба» (dd) та «Кількість робочих годин» (wh) є слабкою ( $r_{x_2x_1} = -0,05$ ), те що коефіцієнт кореляції має від'ємне значення означає те, що збільшення (зменшення) значення одного фактора призводить до закономірного зменшення (збільшення) значення іншого фактора; сила зв'язку між факторами «Градусо-доба» (dd) та «Тариф» (et) - слабка ( $r_{x_3x_2} = 0,03$ ); сила зв'язку між факторами «Кількість робочих годин» (wh) та «Тариф» (et) - помірна ( $r_{x_3x_1} = 0,31$ ). Отже, за результатом проведеного розрахунку для досліджуваної бази даних можна сказати, що три обрані факторні ознаки є незалежними та прийнятними для побудови енергетичної моделі підприємства.

3. Для оцінки впливу факторних ознак на результативну ознаку також було використано інструмент кореляції (cor) у R Studio (Рис. 4). Але слід зазначити, що при цьому аналізі слід звернути увагу на ті факторні ознаки, які мають найбільший вплив на результативну ознаку. В даному аналізі зв'язок повинен бути тісним, а отже значення коефіцієнта кореляції високе. З кореляційної матриці (перший стовбчик) представленої на Рис. 4 можна зробити висновок, що найбільший вплив на загальне енергоспоживання підприємства має фактор «Градусо-доба» (dd) ( $r_{yx_1} = -0,68$ ), на другому місці – «Тариф» (et) ( $r_{yx_3} = -0,43$ ), та мінімальний вплив на показник енергоспоживання досліджуваного підприємства має фактор «Кількість робочих годин» (wh) ( $r_{yx_2} = 0,05$ ).

#### **Висновки**

Для ознайомлення з основними функціями і можливостями інтегрованого середовища розробки R Studio були розглянуті складові частини головного вікна та існуючий функціонал усіх вбудованих опцій.

Проведено оцінку колінераності між факторами, які впливають на показники енергоспоживання підприємства. Слабке та помірне значення коефіцієнтів кореляції доводить незалежність кожного з факторів. Матриця парних коефіцієнтів кореляції була побудована за допомогою функції «cor» у R Studio.

Також за допомогою функції «cor» у інтегрованому середовищі розробки R Studio було проаналізовано вплив трьох факторних ознак на результативну, але у цьому випадку тіснота зв'язку повинна бути максимальною. Найбільший показник коефіцієнта кореляції визначив найвпливовіший на обсяги енергоспоживання підприємства за досліджуваний період фактор – «Градусо-добу» (dd).

#### **References**

1. G.M. Huebner, I. Hamilton, Z. Chalabi, D. Shipworth, T. Oreszczyn Explaining domestic energy consumption – the comparative contribution of building factors, socio-demographics, behaviours and attitudes Appl Energy, 159 (2015), pp. 589-600
2. R.V. Jones, K.J. Lomas Determinants of high electrical energy demand in UK homes: socio-economic and dwelling characteristics Energy Build, 101 (2015), pp. 24-34
3. N. Fumo and M. A. R. Biswas, "Regression analysis for prediction of residential energy consumption", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 47, pp. 332-343, 2015.
4. M. G. Sobamowo, "On the Extension of Sarrus \*\*\*\*\* Rule to Matrices: Development of New Method for the Computation of the Determinant of Matrix", Int. J. Eng. Math., vol. 2016, 2016.
5. F. Kaytez, M. C. Taplamacioglu, E. Cam and F. Hardalac, "Electrical Power and Energy Systems Forecasting electricity consumption: A comparison of regression analysis neural networks and least squares support vector machines", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 67, pp. 431-438, 2015.
6. Bublitz, Andreas, Dogan Keles & Wolf Fichtner (2016). "An analysis of the decline of electricity spot prices in Europe: Who is to blame?" Energy Policy (submitted).
7. R: data analysis and visualization. Available from: <http://r-analytics.blogspot.ru> (accessed: 10.02.2020).
8. R-FAQ. Available from: [https://cran.r-project.org/doc/FAQ/R-FAQ.html#What-is-R\\_003f](https://cran.r-project.org/doc/FAQ/R-FAQ.html#What-is-R_003f) (accessed: 05.02.2020)
9. Buhovec A. G., Moskalev P. V., Bogatova V. P., Biryuchinskaya T. Y. Statisticheskii analiz dannyh v sisteme R: uchebnoe posobie [Statistical data analysis using R: the textbook]. Voronezh, 2010, 124 p.
10. Golemund G., Wickham H. R for data science. Available from: <http://r4ds.had.co.nz> (accessed: 02.02.2020).
11. Bunn A., Korpela M. R: A language and environment for statistical computing. 2013.
12. Wagner H. M. Linear programming techniques for regression analysis //Journal of the American Statistical Association. 1959. T. 54. №. 285. C. 206-212.
13. Browne, M. W., & Shapiro, A. (1986). The asymptotic covariance matrix of sample correlation coefficients under general conditions. Linear Algebra and Its Applications, 82, 169 –176. [http://dx.doi.org/10.1016/0024-3795\(86\)90150-3](http://dx.doi.org/10.1016/0024-3795(86)90150-3)
14. Cudeck, R., & O'Dell, L. L. (1994). Applications of standard error estimates in unrestricted factor analysis: Significance tests for factor loadings and correlations. Psychological Bulletin, 115, 475– 487. <http://dx.doi.org/10.1037//0033-2909.115.3.475>

O. Ishchenko, PhD student, ORCID 0000-0003-3315-4842  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## APPLICATION OF R STUDIO TOOLS FOR ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING ENERGY CONSUMPTION

*Reducing energy consumption is one of the priority areas of development for all energy consumers. The choice of an efficient and reliable programming language will provide a qualitative analysis of all possible impacts, and consequently a more rational energy consumption by consumers and improve the quality of energy management. The main purpose of this work is to determine the means of R Studio to identify the most influential factors in energy consumption. Information technology allows you to process large databases, as well as use mathematical tools to identify factors that affect the level of energy consumption. R Studio is an open source integrated shell and has a user-friendly interface that simplifies working with R. A number of features, such as backlighting and auto-completion, easy script navigation and others, make R Studio attractive for analyzing statistical databases with many variables. This article describes in detail the contents of the main R Studio window and its main functionality. On the example of the enterprise database the mathematical tools of R Studio were considered: the matrix of pair correlation coefficients for factor signs is constructed, the correlation analysis of influence of factors on energy consumption is carried out.*

**Key words:** R Studio, correlation analysis, software, power consumption, databases, information technology.

Надійшла 17.10.2019  
Received 17.10.2019



# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311.001.57

**В.В. Кирик**, д-р техн. наук, професор, ORCID 0000-0003-0419-8934  
**В.А. Халіков**, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., ORCID 0000-0003-1691-5005  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МОДЕРНІЗАЦІЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УРМЕС-2

*В роботі розглянуто вирішення однієї з задач вдосконалення універсальної розрахункової фізичної моделі енергосистеми (УРМЕС-2). Розглянуто передумови такої модернізації на предмет використання сучасних мікроконтролерних блоків та компонентів. Виконана модернізація силових активних елементів УРМЕС-2 шляхом заміни електровакуумних компонентів на мікроелектронні. Розроблена електрична принципова схема основного трифазного генератора опорної напруги змінного струму частотою 200 Гц із реалізацією симетрування напруги і підсилення потужності. Наведено реальний апробований варіант конструктивної реалізації цього пристрою.*

**Ключові слова:** електроенергетична система, змінний струм, фізичне моделювання, аналогова модель, мікроконтролер, обчислювальна модель, УРМЕС-2.

**Вступ.** Навички роботи майбутнього інженера-електрика з сучасними засобами комп'ютерної техніки та програмними пакетами є незаперечною необхідністю. Це ж стосується і володіння сучасними системами моделювання, в яких реалізуються принципи візуально-орієнтованого програмування. Вони дозволяють скласти модель системи чи пристрою на основі вибору необхідних математично формалізованих функціональних блоків та організацією зв'язків між ними.

Не зважаючи на існуючий широкий спектр програмних засобів візуалізованого математичного імітаційного моделювання, фізичне моделювання має свої переваги і є більш наближеним до реального об'єкта дослідження та надає досліднику більш адекватне розуміння електромагнітних процесів. Особливо це стосується випадків, коли розгалуженість і розмірність об'єкта ускладнюють аналіз його режимів роботи та можливість проведення натурних досліджень чи експериментів. Це в першу чергу відноситься до електроенергетичних систем та їх режимних параметрів.

Недоліком систем аналогового фізичного моделювання є їх вузькоспрямованість та дорожня вартість виготовлення. Тобто відновлення та вдосконалення вже наявних засобів фізичного моделювання електроенергетичних систем є досить актуальним завданням.

Мета роботи - вдосконалення фізичної моделі дослідження режимів роботи електроенергетичної системи за рахунок введення в її розрахункові елементи, що вичерпали свій ресурс роботи, сучасних електронних компонентів та засобів мікропроцесорної техніки.

**Аналіз проблеми.** На новому рівні цифрових технологій, ми фактично повертаємось до звичного процесу моделювання властивого для старих та інколи вже давно виведених з ужитку аналогових обчислювальних машин. Останні часто можуть мати навіть свою повну назву або її аббревіатуру вже давно не відповідні науково-технічній термінології притаманній для сучасного її вжитку та своєму функціональному призначенню. Незважаючи на свою архаїчність, вони дають можливість оперувати не з віртуальними, а реальними, хоча і промасштабованими, електричними зв'язками та блоками. Це дає дещо інший рівень фізичного осмислення процесів та їх зв'язку з реальністю, адже вони при цьому займають проміжне положення між віртуальним середовищем комп'ютерного моделювання та реальністю, чим надають можливості до більш активної форми дослідницького чи навчального процесу.

Разом з тим матеріальні та фінансові ресурси, витрачені свого часу на виготовлення такого роду установок, в порівнянні навіть з сучасною комп'ютерною технікою, не співмірно великі, а їх ресурс роботи, з часом, знаходиться на межі вичерпності. Тому для забезпечення роботи таких аналогових обчислювальних моделей є актуальною задача належної модернізації їх функціональних блоків та систем, проте вже на сучасному рівні розвитку компонентної бази та технологій. Сказане, повною мірою стосується універсальної розрахункової моделі енергосистеми (УРМЕС-2), яка позиціонується відповідно

© В.В. Кирик, В.А. Халіков, 2019

паспорту як обчислювальна машина, але навіть при поверховому ознайомленні стає очевидно, що це не так. При цьому, в учбових закладах наявний значний парк такого роду установок, які як правило знаходяться в неробочому стані. Це не дає можливості використовувати підготовлені та апробовані багатолітнім досвідом викладання курсу предмету електроенергетичні мережі та системи, цілі комплекти лабораторних робіт, що орієнтовані до виконання на даних установках.

УРМЕС-2 – це розробка початку 80-х років, що являє собою функціонально закінчений блок з трьох зовнішньо ідентичних секцій. Габарити машини в цілому, по висоті, ширині та висоті складають відповідно: 276 x 151 x 231 см, при масі у 1800 кг та ресурсі роботи у 2000 годин [1]. Кожна секція машини включає в себе 32 блочні елементи, що представляють собою відповідні еквіваленти різного роду навантажень: ліній передавання, трансформаторів та в тому числі і чотирьох генераторів. Абсолютна більшість цих функціональних компонентів є пасивними і на сьогоднішній день цілком функціональними, тобто не потребують якогось значного відновлення.

Проте, це не стосується генераторів, функцію яких виконують так звані сельсинні генераторні станції (СГС). Їх задача – забезпечення моделі синусоїдальною напругою в діапазоні 37 ... 83 В, при її частоті у 200 Гц, максимальній потужності не більш ніж 50...70 Вт та можливостях регулювання фази напруги від 0° і до 360°. Сама сельсинна генераторна станція – це не що інше, як підсилювач низької частоти (ПНЧ) з трансформаторним двотактним вихідним каскадом на лампах 6П45С з анодним живленням близько 500 В. Але через відсутність в її схемі хоча б якихось пристроїв захисту від перевантаження та, враховуючи наявність при експлуатації людського фактору, генераторна станція стала основним джерелом виникнення аварійних ситуацій в роботі моделі. Тривалий час експлуатації наявної кількості СГС (на секцію в 4 шт., а в цілому на модель – 12 шт.) призвів до вичерпності наявного ресурсу заміни активних елементів, які нині до того ж не виготовляються промисловістю.

**Викладення основного матеріалу.** Проте вхідним сигналом ПНЧ СГС є напруга, що наводиться на обмотці загальмованого, відповідним редуктором, ротора сельсина БС-155А, який знаходиться в обертовому магнітному полі статора, генерованому струмом симетричної трифазної напруги частотою  $200 \pm 0,4$  Гц від восьмилампового трифазного генератора опорної напруги (ТГОН), або в визначенні виробника – електронного блоку живлення сельсинів моделі. Положення ротора сельсину відносно статорної його обмотки власне і визначає фазу вихідної напруги СГС. Цей генератор функціонально обслуговує всю УРМЕС-2, тобто його вихід з ладу призводить до неполадки всієї моделі, а не лише тієї чи іншої з трьох наявних її автономних секцій. Тому, за поставленої мети модернізації моделі, пріоритетним є вирішення задачі, яка в першу чергу стосується відновлення ТГОН.

На рис.1 показано два конструктивні варіанти реалізації ТГОН. Очевидно, що оригінальний - ламповий варіант (в верхній частині рис.1), до того ж оснащений відповідними та достатньо габаритними вихідними трансформаторами, буде значно поступатися розробленому варіанту – аналогічному по функціоналу генератору, на базі мікропроцесорного (МП) блоку (в нижній частині рис.1) і по ресурсу роботи, і по стабільності частоти та величини напруги. Це ж стосується зручності ремонту та установки, а також габаритів пристроїв, їх маси, величин енергоспоживання, коли співвідношення між співвідносними параметрами стають просто не співставні.

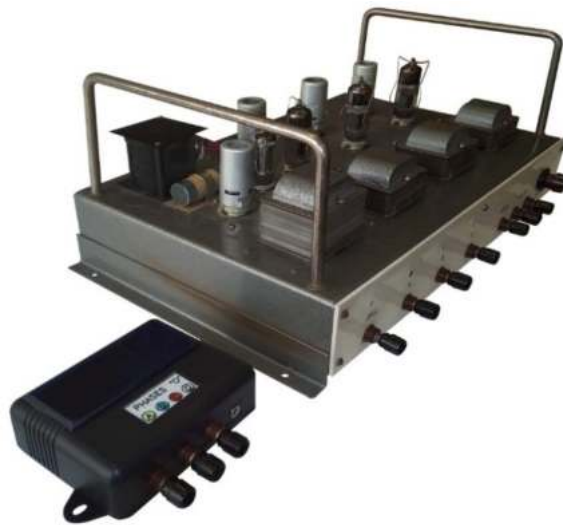


Рисунок 1 – Сучасний та оригінальний варіанти конструктивної реалізації трифазного генератора

Рациональність розробки та заміни диктується і одним порядком величин вихідних напруг відповідно на портах мікроконтролера (0 ... 5,0 В) та ТГОН. Для порівняння, в генераторі лінійна вихідна



напруга повинна мати значення близьке до 4,0 В, що відповідає величині фазної напруги близько 2,3 В. Це ж стосується і струмів. Сумарне навантаження ТГОН від всієї УРМЕС складає не більш ніж 60 мА, тобто на кожну СГС припадає близько 5,0 мА вихідного струму генератора. Відносно низькі значення струмів є цілком очікуваними, адже номінальна напруга живлення сельсина БС-155А складає 110 В і це значення на порядок більше величини вихідної напруги генератора.

Досить часто в мікропроцесорних трифазних генераторах сигналів цілком успішно реалізуються можливості використання широтно-імпульсної модуляції з наступним етапом фільтрації одержаної імпульсної напруги [2, 3]. Розвиток МП техніки і відповідні потреби призвели до вбудовування в структуру контролерів штатних цифро-аналогових перетворювачів. Ця тенденція одержала відображення і в реально доступних і широко тиражованих зразках трифазних генераторів сигналів у вигляді окремих конструктивно закінчених вузлів, які орієнтовані на подальше використання в різного роду пристроях. Прикладом може бути блок HS380 (рис.2), з параметрами та характеристиками якого можна ознайомитись використовуючи можливості інтернет пошуку, в тому числі і на широко відомому aliexpress.com.

Це перш за все:

1. Діапазон частоти вихідної напруги 0,1 ... 2000 Гц при кроці регулювання частоти 0,1 Гц.
2. Діапазон регулювання фази вихідної напруги 0 ... 360° при кроці регулювання частоти 1°.
3. Діапазон амплітуди вихідної напруги 0 ... 5 В.
4. Напруга живлення 7 ... 12 В.
5. Струм споживання не більш ніж 50 мА.
6. Габарити (без панелі індикації) 56 x 45 x 20 мм і т. п.



Рисунок 2 – HS380 - мікроконтролерний блок трифазного генератора синусоїдальної напруги

Незважаючи на цілий ряд доступних опцій налаштувань, сам блок поставляється з установками по замовчуванню вже необхідними для модернізації моделі УРМЕС-2. Тому немає потреби у якихось маніпуляціях для зміни того чи іншого параметру чи розробці або модифікації програмного забезпечення. Необхідно лише узгодити вихідні параметри даного блоку з вхідними – для УРМЕС-2.

На рис. 3 наведено принципову електричну схему розробленого узгоджувального пристрою. Сама схема симетрування напруги та підсилення складається з трьох однакових субблоків відповідно числу фаз і має класичну схемотехніку використання операційних підсилювачів без якихось особливостей. Оскільки крива вихідної напруги блоку HS380 входить в межі 0 ... +5 В, тобто має постійну складову у +2,5 В, то на кожний субблок з середньої точки R4 подається напруга +US величиною близько +1,25 В для симетрування вихідної напруги відносно її нульового рівня. Негативну напругу живлення (-VCC) величиною близько -8,0 ... -10,0 В забезпечує перетворювач на базі DA2. Загальне живлення забезпечується від постійної напруги +12 В, яке проте дещо знижене до +10,5 В (+VCC) за рахунок включення діодів VD1, VD3.

Конструктивно вузол симетрування напруги та підсилення потужності виконано на односторонній друкованій платі 55,6 x 39,3 мм з використанням планарних (SMD) компонентів (рис. 4 а) і змонтовано разом з блоком HS380 у закритому кожусі розмірами 115,0 x 90,0 x 36,5 мм (рис. 1). Спільне розміщення цих вузлів на тильній панелі даного кожуха, без монтажних з'єднань, показано на рис. 4 б. Безумовно, геометричні параметри оригінального блоку (420,0 x 250,0 x 175,0 мм) при цьому не йдуть ні в яке порівняння, що наочно видно на рис. 1. Також допускається експлуатація блоку без панелі індикації.

За енергетичними показниками достатньо сказати, що струм розжарення лише одного з трьох вихідних тріодів більш ніж в 10 раз перевищує струм споживання необхідний для забезпечення роботи нового генератора, маючи на увазі при цьому і наявність його номінальної потужності навантаження.

Водночас фінансові витрати на виготовлення нового блоку є порівнянними з кошторисом заміни ламп оригінального блоку ТГОН.

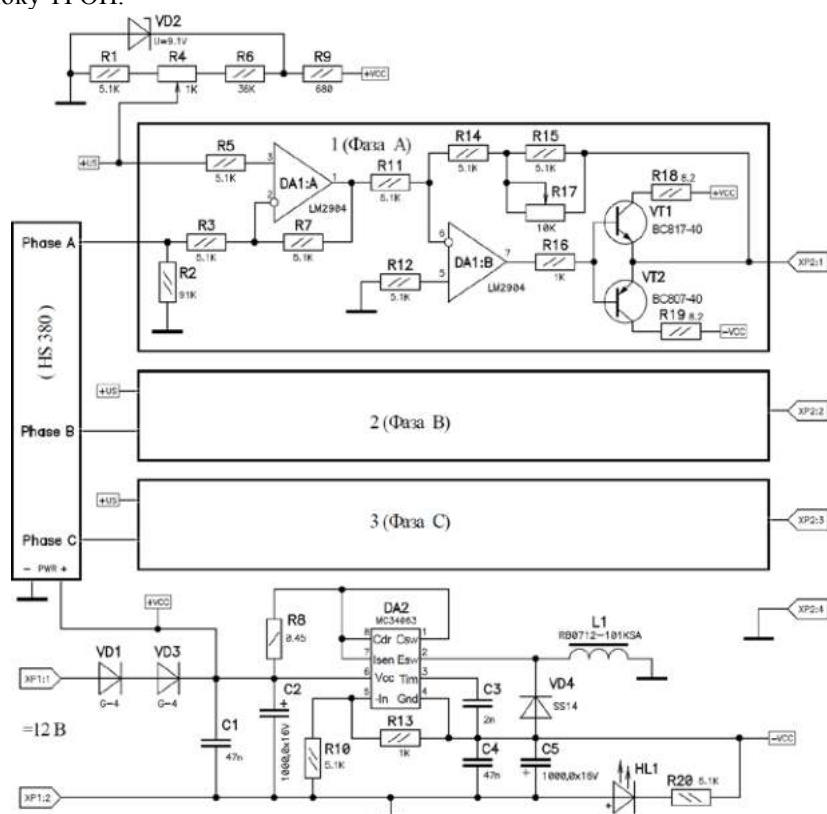


Рисунок 3 – Схема симетрування напруги та підсилення потужності для HS380

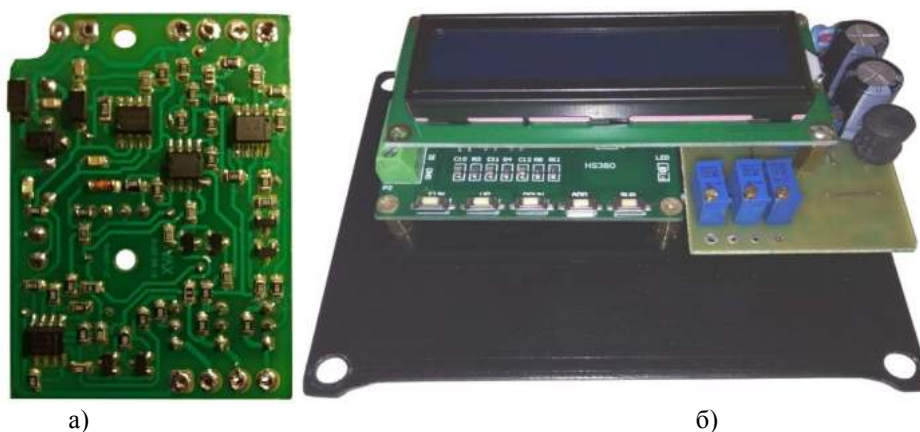


Рисунок 4 – Конструктивна реалізація вузла симетрування напруги та підсилення потужності (а) та його установка в комплексі з блоком HS380 (б)

Проте, безумовно, головним є надійність роботи такого генератора та підвищення його ресурсу роботи за рахунок зменшення в часі рівня деградації параметрів електронних компонентів завдяки суттєвому зниженню виділеної та розсіюваної його компонентами енергії. Особливо необхідно відмітити стабільність параметрів генератора, таких як: частота струму, стабільність величин вихідних напруг та значень їх фазових співвідношень і т. ін.

**Висновки.**

Таким чином, запропонована модернізація фізичної моделі енергосистеми, лише в частині належної модифікації ТГОН до сучасного рівня електроніки, дає підвищення надійності її функціонування та ресурсу роботи при суттєвому, більш ніж в 40 разів, зниженні енергоспоживання при номінальній потужності

навантаження. При цьому немає необхідності у залученні якихось суттєвих конструкторсько-технологічних, програмних та інших засобів, справа тільки у відносно незначній і очевидній схемотехнічній доробці, пов'язаній з узгодженням відповідних параметрів системи.

Раціональність та практична доцільність даної модернізації доведена належною експлуатацією протягом року двох двохсотгерцових трифазних генераторів опорної напруги представлені схемної реалізації та конструктивного виконання в установках УРМЕС-2 на кафедрі мереж та систем Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Відновлення універсальних фізичних розрахункових моделей енергосистем (УРМЕС-2) є виправданим, через їх значне поширення в минулому та подальше поступове зменшення їх використання, як засобів належного забезпечення учбового процесу не з причини затребуваності, а через вичерпність ресурсу роботи компонентів. При цьому не останню роль відіграє аспект раціонального використання суттєвих раніше вкладених фінансових ресурсів. Проте, даний висвітлений етап модернізації буде максимально ефективним лише за умови виконання подальшої належної модернізації, в першу чергу й інших активних складових частин моделі системи.

#### Список літератури

1. Машина вычислительная типа УРМЕС-2, Паспорт/ Центральное производственное ремонтное предприятие Ленэнерго. - 1972. - 5 с.
2. Ридико Л. И. Трехфазный генератор синусоидального сигнала SG-633 [Электронный ресурс] // 2017. – Режим доступа: <http://www.leoniv.diod.club/projects/measuring/sg-633/sg-633.html>.
3. Емельянов А. А., Бесклеткин В. В., Иванин А. Ю., Пестеров Д. И., Юнусов Т. Ш., Иванов П. Е., Соснин А. С. Программирование трехфазного генератора с синусоидальными напряжениями со сдвигом 120° на микроконтроллере STM32 // Молодой ученый. – Казань: изд. Молодой ученый. - 2017. - № 25 (159), часть 1. - С. 20 - 27.

УДК 621.311.001.57

**В.В. Кирик**, д-р техн. наук, профессор, ORCID 0000-0003-0419-8934  
**В.А. Халиков**, д-р техн. наук, старш. науч. сотр., ORCID 0000-0003-1691-5005  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## МОДЕРНИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ УРМЭС-2

*В работе рассмотрено решение одной из задач восстановления и совершенствования универсальной вычислительной физической модели энергосистемы УРМЭС-2 с применением современных электронных компонентов, микроконтроллерных средств и технологий. Рассмотрены предпосылки такой модернизации с учетом совместимости параметров современных электронных компонентов с реальными характеристиками данной расчетной физической модели энергосистемы. Показано, что нет необходимости в разработке или использовании какого-либо специального программного обеспечения для достижения этой цели. Достаточно использовать готовые конструктивные элементы, при чем их функциональные возможности значительно превышают потребности, возникающие при работах по восстановлению и улучшению данной установки. В качестве примера приведена полная электрическая схема задающего трехфазного генератора опорного напряжения переменного тока частотой 200 Гц на базе существующего микроконтроллерного блока с последующим осуществлением симметрирования напряжения и усилением его выходной мощности. Разработано конструктивное исполнение генератора. Таким образом, реализована возможность модификации модели энергосистемы УРМЭС-2 путем замены лампового трехфазного генератора сигналов, выполнив небольшую модификацию готового блока на базе микроконтроллера с тремя цифроаналоговыми преобразователями, а не путем реализации программной широтно-импульсной модуляции через использование соответствующих таймеров микроконтроллера. Предлагаемая замена оригинального генератора трехфазного напряжения новым современным его вариантом дает значительное увеличение ресурса работы модели и улучшает показатели надежности, энергоэффективности и т. п. Практическая ценность заключается в восстановлении возможностей использования многочисленных лабораторных работ в учебном процессе из курса электроэнергетических сетей и систем с использованием модернизированной универсальной аналоговой модели энергосистемы.*

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, переменный ток, физическое моделирование, аналоговая модель, микроконтроллер, вычислительная модель, УРМЭС-2.

V. Kyryk, Dr. Sc. Sciences., Prof., ORCID 0000-0003-0419-8934  
V. Khalikov, Dr. Sc. Sciences., SRF, ORCID 0000-0003-1691-5005  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## MODERNIZATION OF THE UNIVERSAL ANALOG MODEL OF THE ENERGY SYSTEM YPMEC-2

*Restoration and improvement of universal computational physical model of power system (YPMEC-2) by application of modern electronic components and facilities of microcontroller technology. Results. The prerequisites of such modernization for compatibility of parameters of modern microcontroller components with the necessary characteristics of this calculated physical model of power system are considered. It has been shown that you do not even need to use specific software to achieve this. It is enough to use ready-made structural units, and their programs of operation far exceed the needs for restoration and improvement of the installation. As an example, an electrical circuit of a basic three-phase AC reference generator 200 Hz with the implementation of subsequent voltage symmetry and power amplification. Generator design is developed. It is proposed to replace the old generator, which gives a significant increase in the resource life. Originality. For the first time, the possibility of upgrading the power system model (YPMEC-2) by replacing a three-phase signal generator made by a slight modification of a finished microcontroller unit with digital-to-analog converters, rather than by implementing software pulse-width modulation of the microcontroller, is shown. Practical significance. The practical value of the work is to restore the possibility of using numerous laboratory works in the educational process with the use of this universal analog model of the energy system.*

**Key words:** power system, AC, physical modeling, analog model, microcontroller.

### References

1. Mashina vychislitel'naya tipa URMES-2, Pasport [Computer type URMES-2, Passport]. Centralnoe proizvodstvennoe remontnoe predpriyatie Lenenergo, 1972.
2. Ridiko L. I. Trehfaznyj generator sinusoidal'nogo signala SG-633 (SG-633 Three Phase Sine Wave Generator) Available at: <http://www.leoniv.diod.club/projects/measuring/sg-633/sg-633.html> (accessed 22.04.2017).
3. Emelyanov A. A., Beskletkin V. V., Ivanin A. Yu., Pesterov D. I., Yunusov T. Sh., Ivanov P. E., Sosnin A. S. Programirovanie trehfaznogo generatora s sinusoidal'nymi napryazheniyami so sдвигом 120° na mikrokontrollere STM32 [Programming a three-phase generator with sinusoidal voltages with a shift of 120° on the STM32 microcontroller] Molodoj uchenyj, Kazan: izd. Molodoj uchenyj, 2017, no. 25, pp. 20 - 27.

Надійшла 08.12.2019  
Received 08.12.2019

Г.Г. Панченко, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ORCID 0000-0002-7234-4078  
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

## ОГЛЯД СТАНУ І ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ

*В статті надано огляд термінології, методів, цілей і задач енергетичного аналізу, а також методичних підходів до його виконання. Визначено причини обмеженого застосування енергетичного аналізу в Україні: використання балансових моделей обмежене недостатністю статистичних даних щодо міжсекторного балансу, а аналізу процесу – складністю розрахункових моделей. Запропоновано структуру повної енергоємності. Зазначено, що при оцінці енергетичних витрат на імпорту енергоресурсів і продукції необхідно використовувати енергетичний еквівалент валюти з врахуванням всіх надходжень валюти. Визначено, що подальший розвиток енергетичного аналізу з застосуванням підходу «аналіз процесу» вимагає доопрацювання запропонованої в стандарті ДСТУ 3682-98 і ГОСТ 30583-98 методики шляхом розробки адекватних спрощуючих припущень і зменшення складності розрахункових моделей. Вдосконалення цієї методики дозволить підвищити ефективність енергетичного аналізу інвестиційних проектів, зовнішньоекономічних зв'язків, планів економічного розвитку країни, функціонування економіки і окремих виробничих процесів, а також розширити сфери застосування енергетичного аналізу.*

**Ключові слова:** енергетичний аналіз, повні енерговитрати, прямі енерговитрати, непрямі енерговитрати, повна енергоємність, балансові моделі, аналіз процесу.

### Вступ

Методи енергетичного аналізу набули розвитку і широкого застосування після нафтової кризи 1973 року, хоча вони були відомі задовго до цієї кризи. Одним з засновників енергетичного аналізу, як окремого наукового напрямку досліджень, є український вчений С.А.Подолінський [1], який показав, що працю і матеріальну діяльність людини можна розглядати як витрати енергії, «результатом яких є збільшення енергетичного бюджету суспільства». Аналогічні ідеї було висловлено в анонімній праці [2], яку науковці також приписують перу С.А.Подолінського.

В Інституті загальної енергетики НАН України було розроблено стандарт [3, 4]. Цей стандарт було розроблено з метою визначення методів розрахунку повної енергоємності виробництва продукції, робіт і послуг (ПРП). Цей стандарт використовується спеціалістами Інституту для визначення повної енергоємності найбільш енергоємних видів продукції при виконанні наукових досліджень та виконання науково-дослідних робіт.

Подальший розвиток енергетичного аналізу вимагає доопрацювання запропонованої в стандарті методики з метою розширення його застосування в практиці енергетичного аналізу. При цьому необхідно врахувати міжнародний досвід застосування енергетичного аналізу, накопичений за час, що пройшов після введення в дію стандарту - 1 січня 1999 р. В роботі надано огляд термінології та аналіз існуючих методичних підходів до визначення складових повної енергоємності ПРП.

### Терміни і визначення

Існує кілька визначень поняття енергетичний аналіз або чистий енергетичний аналіз [5]. За визначенням англійської версії електронного словника Вікіпедія «енергетичний аналіз - це метод обліку, метою якого є знаходження загальної суми енергії, необхідної для всього життєвого циклу продукту». В [6] енергетичним аналізом називається «визначення кількості енергії, витраченої на виробництво певного матеріального блага або послуги, на основі прийнятих домовленостей». Хоча для позначення досліджень економічних систем енергетичними методами з використанням енергетичних одиниць доцільно було б вживати термін [7] енергоекономічний аналіз. Але, з огляду на усталеність терміну, для позначення окресленого напрямку досліджень пропонується користуватися назвою «енергетичний аналіз».

В [8] зазначається, що енергетичний аналіз не є енергетичною теорією вартості. При цьому гроші розглядаються як похідна від двох основних ресурсів - енергії і праці, а енергія трактується як те, що забезпечує як негентропію, так і тепло.

Основними кількісними показниками в енергетичному аналізі є повні енерговитрати на виробництво ПРП і повна енергоємність ПРП. Повна енергоємність визначається як відношення повних енерговитрат на виробництво ПРП до обсягів виробництва. В свою чергу повні енерговитрати на виробництво ПРП визначається як сума енерговитрат на всіх етапах виробництва, включно з добуванням, переробкою, транс-

© Г.Г. Панченко, 2019

портуванням, зберіганням вхідної продукції сировини і матеріалів, виробництвом основних виробничих фондів, на технологічні процеси, на відтворення робочої сили і на захист навколишнього природного середовища. У випадку визначення повної енергоємності окремих видів продукції (таких, як будівлі, автомобілі тощо) до повних енерговитрат включають також витрати на експлуатацію цієї продукції.

В загальному випадку повні енерговитрати на виробництво ПРП поділяють на прямі, які витрачаються безпосередньо в технологічному процесі, і непрямі. В іноземній літературі, крім терміну непрямі енерговитрати, використовуються також терміни оречевлені енерговитрати або втілена енергія (*embodied energy*) [9, 10], акумульовані [11], кумульовані енерговитрати [12, 13] і навіть сіра енергія [14]. В деяких випадках до складу повних енерговитрат включаються енерговитрати за час експлуатації продукції, зокрема, будівель [15] та повні енерговитрати на демонтаж і утилізацію будівель і обладнання. У вітчизняній літературі для позначення повних енерговитрат знайшли також використання терміни прихована енергія [16], скриті або минулі енерговитрати [17] і «наскрізні енерговитрати» [18]. До їх складу в різних випадках зараховують не всі енерговитрати. В залежності від мети досліджень в наскрізних енерговитратах враховуються енерговитрати в економіці в цілому або в окремому її секторі, на підприємстві або навіть в окремому цеху.

Загальні витрати енергії на виробництво ПРП найчастіше називають повними енерговитратами. Цей термін використовується також в стандартах ДСТУ 3682-98 та ГОСТ 30583-98. Він відповідає назві цієї величини – «total energy» в англійських джерелах. Іноді для позначення повних енерговитрат використовується термін загальна потреба в енергії (*gross energy requirement - GER*), яка визначається як сума всіх невідновлюваних енергетичних ресурсів, що споживаються при наданні товару або послуги, і виражається в енергетичних одиницях на фізичну одиницю доставленої продукції або послуги [19].

Також термін «*embodied energy*» в значенні повних енерговитрат підтримується англійською версією електронного словника Вікіпедія, в якому він визначається як «сума всієї енергії, необхідної для виробництва будь-яких товарів або послуг, що розглядається так, якби ця енергія була включена або «втілена» в самому продукті». На наш погляд, таке визначення недостатньо точно відображає фізичні процеси перетворення енергії при виробництві ПРП, оскільки енерговитрати не «втілюються» в ПРП, а лише використовуються при їх виробництві. Крім того, таке тлумачення повних енерговитрат недостатньо точно відображає економічні процеси, які визначають величину повних енерговитрат. Адже при визначенні повних енерговитрат за повний життєвий цикл виробництва і використання продукції до їх складу включають також енергію, яка ще не була витрачена безпосереднього на час виробництва продукції. Маються на увазі, в першу чергу, енерговитрати на відтворення робочої сили і на подолання негативних екологічних наслідків економічної діяльності, які ще не були витрачені і не можуть вважатися кумульованими. Крім того, роботи та послуги не є матеріальними речами і тому в них не може втілюватися енергія.

Так само, як з термінологією щодо повних енерговитрат, остаточно не склалася термінологія і з позначенням питомих повних енерговитрат – енергоємності. Крім терміну повна енергоємність, в літературі зустрічаються назви пряма, технологічна, цехова, повна цехова, заводська енергоємність [20], наскрізна, заводська а також повна металургійна енергоємність продукції [18], технологічна енергоємність продукції [21], енерготехнологічна продуктивність [16], комерційна енергоємність [22], енергетична рентабельність інвестицій [23], технологічне паливне число (ТПЧ) [16], а також технологічне паливно-екологічне число (ТПЕЧ) [24].

Енергетичну рентабельність інвестицій (*energy returned on energy invested - EROEI*) [23] можна визначити як енергію, що повертається на вкладену енергію - відношення кількості корисної енергії (ексергії), доставленої з конкретного енергетичного ресурсу, до кількості ексергії, що використовується для отримання цього енергетичного ресурсу.

Щодо використання ТПЧ необхідно зробити наступне застереження. При визначенні величини ТПЧ до складу енерговитрат додається хімічна енергія первинного палива, що завищує величину повної енергоємності. Адже енергетичний аналіз здійснюється в категоріях вартості (видобутку, збагачення, транспортування, перетворення тощо), а не енергетичної цінності (теплотворної здатності) енергетичних ресурсів. Наприклад, енергетична цінність нафти, видобутої в Саудівській Аравії і в Україні, може бути однаковою, але енергетичні витрати на її видобуток значно відрізняються. Тому в подальшому пропонується не користуватися ТПЧ як синонімом повної енергоємності.

#### **Цілі і задачі енергетичного аналізу**

В залежності від рівня складності виробничої системи (або рангу енергетичного аналізу) в [9] розрізняються чотири основних типи цілей досліджень з енергетичного аналізу:

- детальний аналіз окремих процесів, щоб зробити висновок щодо їх енергоефективності і надання рекомендацій щодо енергозбереження;
- аналіз споживання енергії у великих масштабах, прогнозування попиту на енергію або розробка політики, яка могла б зменшити майбутній попит;
- аналіз енергоспоживання таких базових технологій, як виробництво продуктів харчування та видо-

буток мінералів, щоб показати деякі з майбутніх наслідків технологічних тенденцій або дефіцит енергії;

• визначення енерговитрати та дослідження енергетичних потоків для розуміння термодинаміки індустріальної системи. Це дослідження виконується для досягнення довгострокової мети, засноване на фізичних, а не на грошових потоках.

Останні дослідження дають можливість зробити висновок про те, що методи енергетичного аналізу дозволяють вирішувати значно ширше коло задач, зокрема:

- оцінювати ефективність функціонування на будь-якому рівні управління виробництвом - цех, завод, компанія, сектор економіки та економіка в цілому;
- розробляти енергетичний і вуглецевий баланси країни, сектору економіки та окремого підприємства;
- оцінювати ефективність зовнішньоекономічних зв'язків;
- визначати ефективність діяльності щодо енергозбереження, скорочення викидів парникових газів [25] та оптимізації використання обмеженої кількості дефіцитних ресурсів;
- виконувати аналіз впливу окремих факторів виробництва на енергетичну ефективність (наприклад, вплив сортаменту прокату на його енергоємність при розливі сталі у зливки [18]);
- оцінювати вплив природних факторів на споживацьку корзину [26];
- представляти в енергетичних одиницях витрати, які забезпечують життєдіяльність людини та підвищувати ефективність вирішення інших задач економічного розвитку.

#### **Методичні підходи до енергетичного аналізу**

В енергетичному аналізі використовуються два основних підходи, які ґрунтуються на використанні балансових моделей типу «витрати-випуск» або на результатах аналізу процесу [5, 27]. З огляду на джерела первинних даних і напрямок послідовності розрахунків, ці підходи ще називають, відповідно, підходом «зверху-вниз» і підходом «знизу-нагору» [11].

Перспективним видається комплексний підхід до визначення повних енерговитрат, який полягає у використанні результатів розрахунків, одержаних на основі балансової моделі економіки з подальшою деталізацією на основі аналізу процесів [28].

#### **Використання балансових моделей**

Перші дослідження з енергетичного аналізу з використанням балансових моделей виконувались в країнах Організації економічного співробітництва та розвитку - Німеччині [29], США [30] і [27], Канаді [31], Великобританії - [32], Новій Зеландії - [33]. У 2000 р. було виконано перше дослідження також в Індії [34]. В Україні дослідження з використання міжгалузевого балансу в енергетиці знайшли розвиток в роботах [35, 36] та ін. Для економіки США було виконано перші розрахунки з використанням матриці міжсекторного балансу на 357 секторів за 1963 р. [27] та за 1967 рік [37]. Основними завданнями при виконанні розрахунків були визначення потоків енергії з потоками товарів через регіональні кордони (що має ключове значення для питання енергетичної самодостатності), а також питання енергозбереження та потенціалу економії енергії та заміщення товарів і послуг [37].

При застосуванні балансових моделей доводиться робити спрощуючі припущення, які впливають на точність оцінок. Перш за все, це стосується врахування імпорту. В [37] зазначається, що це ускладнюється наявністю двох видів імпорту. Перший вид імпорту, який названо конкурентним імпортом, - це товари, які мають вітчизняні аналоги, такі наприклад, як сталь. Другий вид - неконкурентний імпорт, аналогів якому немає, наприклад банани. Перерахований імпорт сталі в моделі [37] додається до обсягів виробництва вітчизняного металургійного сектору. В моделі [27] обсяги валового випуску зменшуються на обсяг імпорту. Подібну корекцію зробити неможливо для імпорту другого типу, тому що розробникам невідома енергоємність продукції неконкурентного імпорту, наприклад, нефриту, тикунки або бананів. В економіці США цей імпорт є відносно невеликий і розробники ним просто знехтували. Але для країн з більшим імпортом, ніж у США, це припущення призведе до значних помилок [37]. Необхідно відзначити, що за час, який пройшов після розробки цих моделей, частка імпорту енергоємних видів продукції у США значно зросла. Так що розробники сучасних моделей, результати яких не публікуються, повинні вносити відповідні методичні поправки. Однією з основних переваг використання балансових моделей над більш детальним підходом є порівняно швидке визначення видів продукції, які мають приблизно однаково енергоємність для одержання загальних результатів для широкого асортименту товарів, а також при дослідженні, наприклад, основного капіталу, імпорту, експорту тощо [27]. Тому використання балансових моделей застосовується переважно для досягнення трьох останніх цілей з перелічених рангів енергетичного аналізу [9].

Таблиця «витрати-випуск» України за 2016 рік містить дані про 42 сектори економіки. Тому для її використання дослідникам необхідно докладати значних зусиль для підготовки первинних даних та розробки обґрунтованих припущень. Для порівняння, таблиці «витрати-випуск» для створення балансових моделей в США в 1963 р. містили дані про 357 секторів за 1963 р. [27], а в Індії - 115 секторів у 1983-1994 рр. [38].

#### **Використання аналізу процесу**

Другий метод енергетичного аналізу ґрунтується на використанні імітаційних моделей технологічних процесів, в яких описуються потоки матеріальних і енергетичних ресурсів. Цей метод традиційно



використовується для досягнення першої цілі з перелічених рангів енергетичного аналізу [9], а саме для детального аналізу окремих процесів, щоб зробити висновок щодо їх енергоефективності і надання рекомендації щодо енергозбереження. Розвиток методики визначення енергоемності ПРП дасть можливість використовувати аналізу процесу для досягнення також інших трьох цілей енергетичного аналізу, перелічених в попередньому розділі. На відміну від першого методу, аналіз процесів не вимагає існування докладної статистичної інформації щодо міжгалузевого балансу.

Згідно з [5], виконання аналізу процесу вимагає детальних даних про виробництво цільового продукту і подібних (але зазвичай менш деталізованих) даних про інші фактори, які не відображені в процесі аналізу. Для агрегованих виробничих секторів дані отримуються з державної статистичної інформації про економічну діяльність. Для окремих виробничих процесів інформацію часто необхідно збирати безпосередньо у виробників, торгових асоціацій та консультантів. Якщо всі потоки можуть бути виміряні у фізичних одиницях, зазвичай немає підстав для введення вартісних (у грошових одиницях) значень у аналіз. Тому результуюча енергоемність виражається у фізичних термінах (енергетичних одиницях цільового продукту).

Методи аналізу процесів добре відомі і широко застосовуються в наукових дослідженнях і практичній роботі. Співробітники ІЗЕ НАНУ застосовують ці методи при виконанні досліджень з підвищення ефективності використання енергії в промисловості [39, 40], прогнозуванні потреби економіки в енергетичних ресурсах з урахуванням попиту на енергоемні експортно-орієнтовані види продукції [41], визначенні складової повної енергоемності заходів з охорони навколишнього середовища [42] та інших складових повної енергоемності при виробництві електричної енергії [43, 44], в переробній промисловості [45], для аналізу ефективності нововведень [46] та ін. Ці методи знаходять застосування також в інших галузях виробництва, в яких вони раніше не застосовувалися, наприклад, в приладобудуванні [47], сільському господарстві при виконанні орних робіт [48] та при виборі техніки [49].

Ефективне використання аналізу технологічних процесів вимагає створення енергоекономічних моделей виробничих процесів і економічних систем. Основні принципи побудови таких енергоекономічних моделей [7] полягають в наступному:

- виділенні об'єкту моделювання з оточуючого середовища у відповідності до рангу аналізу (в залежності від постановки проблеми, ранг аналізу зростає із збільшенням складності виробничої системи);
- економічні процеси описуються в енергетичних термінах, а характеристики їх властивостей вимірюються в енергетичних одиницях;
- витрати живої праці виражаються через витрати харчової і залученої енергії, які забезпечують життєдіяльність людини.

При цьому модель енергоспоживання можна представити чотирма основними елементами, які відповідають так званій реалізованій, нереалізованій, перетвореній і спожитій енергії [7]. Для практичної реалізації моделі необхідно наповнити її елементи і зв'язки між ними конкретним змістом. А саме, елементу реалізованої енергії в економічній системі можна поставити у відповідність сектори паливно-енергетичного комплексу, перетвореної енергії – сектори промисловості і сільського господарства, спожитої енергії – сферу споживання матеріальних благ, а нереалізованої енергії – втрати на всіх етапах виробництва і споживання. Зв'язки між елементами такої моделі представляють собою потоки енергоресурсів і енергоносіїв всіх видів в енергетичному вигляді або у вигляді потоків енергії, витрачено на виробництво предметів виробництва і/або споживання. А потоки енергії у вигляді вторинних енергоресурсів або утилізованих відходів утворюють в енергоекономічній моделі зворотні зв'язки. Зовнішні зв'язки представляють собою перетоки енергії, обумовлені експортом і імпортом.

Модель такого типу розглядалась в роботі [50]. Такі моделі зручно представляти у вигляді орієнтованих графів, які складаються з множини вершин і дуг, що з'єднують вершини [46]. Вершини орграфу позначають технологічні процеси або сектори економіки, відповідно до рангу енергетичного аналізу, а дуги – потоки енергії в прямій або непрямої формі.

Основним недоліком аналізу процесу є нелінійне підвищення трудомісткості його застосування при підвищенні рангу аналізу. Тому він рідко знаходить застосування для енергетичного аналізу секторів економіки і економіки в цілому. Для подолання цього недоліку необхідно розробити адекватні припущення, які зменшать складність розрахункових моделей при виконанні енергетичного аналізу. Вдосконалення підходу аналізу процесу дозволить значно підвищити ефективність застосування енергетичного аналізу інвестиційних проектів, зовнішньоекономічних зв'язків, планів економічного розвитку країни, функціонування її економіки і окремих виробничих процесів, а також розширити сфери застосування енергетичного аналізу.

#### **Структура повної енергоемності**

У відповідності до [3, 4] та останніх досліджень з енергетичного аналізу [44], до складу повної енергоемності ПРП необхідно включати повну енергоемність:

- енергоресурсів, необхідних для виробництва ПРП;
- вхідних продуктів, сировини і матеріалів;



- транспортування ПРП та вхідних продуктів, сировини і матеріалів;
- поворотних відходів;
- основних виробничих фондів;
- відтворення робочої сили;
- податків і обов'язкових платежів;
- заходів з охорони довкілля;
- експлуатації продукції;
- демонтажу і утилізації будівель.

Для визначення цих складових в кожному конкретному випадку виконання енергетичного аналізу можуть застосовуватися додаткові показники, які визначають повні витрати на виробництво ПРП. Наприклад, при визначенні повної енергоемності сільськогосподарських робіт можуть застосовуватися такі специфічні показники енерговитрат як повні енерговитрати машино-тракторних агрегатів при виборі техніки [49] та на посіві - енерговитрати живої праці, енерговитрати від зменшення агротехнологічних показників, переуцільнення ґрунту, травмованості насіння, неякісного посіву, недотримання термінів посіву та глибини посіву насіння [48].

При виконанні енергетичного аналізу виробництва ПРП при оцінці енергетичних витрат при використанні імпортованих енергоресурсів (в першу чергу, природного газу і ядерного палива), а також імпортованої продукції необхідно враховувати енергетичний еквівалент валюти. У відповідності до [3, 4, 28], енергетичний еквівалент валюти визначається як відношення повних енерговитрат на виробництво ПРП, що експортуються, до валютних надходжень від їх продажу. Але існують і інші джерела надходження валюти, неврахування яких буде призводити до спотворення оцінок показника повної енергоемності валюти. Тому величину повної енергоемності валюти необхідно визначати з врахуванням всіх валютних надходжень в країну.

#### **Висновки**

Одним з засновників енергетичного аналізу, як окремого наукового напрямку досліджень, є український вчений С.А.Подолінський, який показав, що працю і матеріальну діяльність людини можна розглядати як витрати енергії, «результатом яких є збільшення енергетичного бюджету суспільства».

В енергетичному аналізі використовуються два основних підходи, які ґрунтуються на використанні балансових моделей типу «витрати-випуск» (підхід «зверху-вниз») або на результатах аналізу процесу (підхід «знизу-нагору»).

З метою визначення методів розрахунку повної енергоемності виробництва продукції, робіт і послуг в Інституті загальної енергетики НАН України було розроблено стандарт ДСТУ і ГОСТ 30583-98 на основі другого підходу до енергетичного аналізу – аналізу процесу. Вдосконалення цієї методики дозволить підвищити ефективність енергетичного аналізу інвестиційних проектів, зовнішньоекономічних зв'язків, планів економічного розвитку країни, функціонування економіки і окремих виробничих процесів, а також розширити сфери застосування енергетичного аналізу.

#### **Список використаної літератури**

1. Подолінський С.А. Труд человека и его отношение к распределению энергии на нашей планете//Слово. – 1880. - № 4, 5 – С.135-240.
2. Д.І. Понятие о ценности и богатстве с точки зрения учения об энергии//Мысль. 1880. - №10. – с.162-172, №11. – с.7-9.
3. Методика визначення повної енергоемності продукції, робіт і послуг. ДСТУ 3682-98. – Держстандарт України. – Київ. – 1998. – 11 с.
4. Методика определения полной энергоёмкости продукции, работ и услуг. ГОСТ 30583-98. - ГОСТ 30583-98ежгосударственный сонет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 1998. – 11 с.
5. Bullard C., Penner P., Pilati D. (1978). Net Energy Analysis: a Handbook for Combining Processes and Input-Output Analysis // Resources and Energy. — Vol. 1. — No. 3. — P. 267–313.
6. Slesser M. Energy in the Economy. The Macmillan Press Ltd. London and Basingstoke, 1978, 164 p.
7. Вершин В.Е. Основные принципы построения энерго-экономических моделей производственных процессов // Вопросы кибернетики. Системные принципы организации моделей развития. – 1981. – Вып.72. – с.94-104.
8. Slesser M. Energy Analysis: Its Utility and Limits. - IIASA Research Memorandum. September 1978.
9. Chapman P. F. Energy Costs: a Review of Methods // Energy Policy. — 1974. — № 2. — P. 91–103.
10. Costanza R. Embodied Energy and Economic Valuation // Science. 1980. —Vol. 210. — P. 1219–1227.
11. Balandynovicz H.W., Bibrowski Z., Bojarski W. i in. Energochlonnosc skumulowana. - Warszawa: PWN, 1983. – 188 s.
12. Frischknecht R., Wyss F., Knöpfel S.B., Lützkendorf T. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. The International Journal of Life Cycle. Assessment 20(7) · May 2015.

13. Sullivan J.L. , Clark C., Han J., Harto C.B. Cumulative energy, emissions, and water consumption for geothermal electric power production. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 5(2) · April 2013.
14. L.Chanel, P.Pourouchottamin L'energie grise : la face cachée de nos consommations d'énergie. - <https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/propositions/lenergie-grise-la-face-cachee-de-nos-consommations-denergie>. - 2013.
15. Jancovici J-M. Pour un bilan carbone des projets d'infrastructures de transport website jancovici. Com. Tribune de Patrick Jeantet, PDG de SNCF Réseau, et de votre serviteur, parue sur le site des Echos le 26 décembre. - 2017.
16. Розин С.Е., Щелоков Я.М. Энергетический анализ общественного производства. – Проблемы энергосбережения. – 1991. - №8. – с.49-57.
17. Украинская ассоциация сталеплавателей. Удельные расходы металлической шихты и энергоёмкость стали различных способов производства. - <http://uas.su/books/srmp/12/razdel12.php>.
18. Литвиненко В.Г., Мантула В., Каневский А.Л., Андреева Т.А., Юхнов В.Ю. Оценка энергоэффективности производства на основе анализа сквозной энергоёмкости продукции. – Экология и промышленность. – 2009. № 2. С.47-53.
19. Voopendranath, M.R. and Shahul Hameed, M. (2013) *Gross energy requirement in fishing operations*. *Fishery Technology*, 50(1), pp. 27-35.
20. Станиціна В.В. Аналіз методів визначення показників енергетичної ефективності. *Scientific Journal «ScienceRise»* №10/2(15)2015.
21. Методика определения энергоёмкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Общие положения. ГОСТ Р 51750-2001. – Москва. - Госстандарт России. – 2001.
22. Мельник Л.Г. Економіка енергетики : підручник / За ред. Л.Г.Мельника, І.Н.Сотник. – Суми: Університетська книга, 2015. – 378 с.
23. Murphy D.J. Hall C.A.S. (2010). "Year in review EROI or energy return on (energy) invested". *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1185 (1): 102–118.
24. Дружинина О.Г. Разработка алгоритмов и моделей энерго-экологического анализа технологических процессов и оценка энергозатрат на примере металлургических технологий. - Автореферат диссертации. – Екатеринбург. – 1998.
25. Панченко Г.Г. Методика визначення повної вуглецевої продукції, робіт і послуг // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. – Київ. - 2012. – випуск 263. – с.107-112.
26. Климова Г.Н. Электрические системы и сети. Энергосбережение. – Учебное пособие для СПО. – М. – Юрайт. – 2018.
27. Writhe D.J. Good and Services: on input-output analysis. – *Energy policy*. – December 1974. – 307-315.
28. Панченко Г.Г. Энергоэкономический анализ производства продукции, работ и услуг // Препринт НАН Украины. Ин-т проблем энергосбережения; 94-3. - Киев. - 1994. – 30 с.
29. Danton R.V. The energy cost of goods and services in the Federal Republic of Germany. – *Energy Policy*. – 1975. – S.279-284.
30. Bullard C., Herendeen R. (1975). The Energy Cost of Goods and Services // *Energy Policy*.—No. 4.— P. 268–278.
31. Bush M.J. The energy intensity of commodities produced in Canada. - *Energy*, 1981, vol. 6, issue 6, 503-517.
32. Pick H.J., Becker P.E., 1975. Direct and indirect use of energy and materials in engineering and construction. *Applied Energy* 1 (1),31–51.
33. Peet N.J., Carter A.J., Baines J.T., 1985. Energy in the New Zealand household, 1974–1980. *Energy* 10 (11), 1197–1208.
34. Tiwari, P., 2000. An analysis of sectoral energy intensity in India. *Energy Policy* 28, 771–778.
35. Кулик М.Н., Шульженко С.В., Костюковский Б.А. Анализ изменения потребности Украины в топливно-энергетических ресурсах на основании использования статистического межотраслевого баланса // Проблемы загальної енергетики, 1999, № 1 (47): 6-9.
36. М.М. Кулик Фундаментальні властивості основних матричних форм в системах рівнянь міжгалузевого балансу// Проблемы загальної енергетики, 2017, 2(49): 14-39.
37. Bullard C., Herendeen R. (1975). The Energy Cost of Goods and Services // *Energy Policy*.—No. 4.— P. 268–278.
38. Pachauri S., Spreng D. Direct and indirect energy requirements of households in India. – *Energy Policy*; v. 30(6); 2002; p. 511-523.
39. Гнідой М.В., Куц Г.О., Терещук Д.А. Метод розрахунку повних енергетичних витрат на виробництво продукції. – *Екотехнологии и ресурсосбережение*. – 1997. № 5. – с.67-72.
40. Маляренко, Е. Е. Применение метода полной энергоёмкости продукции для анализа энергетической эффективности производства - ISSN 1562-8965. Проблемы загальної енергетики. – 2010. – № 3 (23). – С. 19–24.

41. Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Куц Г.О. Прогнозування потреби економіки в енергетичних ресурсах з урахуванням попиту на енергоємні експортно-орієнтовані види продукції. - ISSN 1562-8965. Проблеми загальної енергетики, 2015, вип. 4 (43): 5-13.
42. Станиціна В.В. Енергоємність заходів з охорони навколишнього середовища як складова повної енергоємності продукції. - ISSN 1562-8965. Проблеми загальної енергетики, 2011, вип. 4 (27). – с.47-52.
43. Білодід В.Д. Оцінювання ефективності енергетичних технологій за методологією визначення повних енергетичних витрат // ISSN 1562-8965. Проблеми загальної енергетики, 2012, вип. 3 (30): 12-18.
44. Білодід В.Д. Визначення ефективності вироблення електричної енергії атомними електростанціями за методологією повних енергетичних витрат. Частина 1. Витрати енергії на будівництво // ISSN 1562-8965. Проблеми загальної енергетики, 2018, вип. 2 (53): 36-44.
45. Панченко Г.Г., Коробко Б.П. Энергоемкость заготовок деталей машин // УкрНИИНТИ. Сер. Пром. Енергетика и энергосбережение. – 1990. – Вып. 1. - 30 с.
46. Панченко Г.Г. Энерго-экономический анализ эффективности нововведений. – Проблемы энергосбережения. – 1993. - №1. – с.29-37.
47. Туманов Ю.Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургическом производстве. – М. – Физматлит. – 2010.
48. Щитов С.В., Тихончук П.В., Спириданчук Н.В. Оптимизация энергозатрат в технологии посева сельскохозяйственных культур. - КиберЛенинка: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-energozatratt-v-tehnologii-poseva-selskokozyaystvennyh-kulturn>. – 2013.
49. Щитов С.В., Тихончук П.В., Спириданчук Н.В., Энергозатраты как критерий выбора трактора. - Достижения науки и техники АПК, №9. -2012. – с.75-76.
50. Баландинович Г., Парчевски З. Проблемы определения основных общественных потребностей в Польше. – Экономика и математические методы. 1989. – том XXV, вып. 3. – с.477-483.

**G. Panchenko**, Cand.Sc.(Eng.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7234-4078  
**Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine**

## REVIEW OF THE STATE AND PROSPECTS OF ENERGY ANALYSIS DEVELOPMENT

*The article provides an overview of the terminology, methods, goals and objectives of energy analysis, as well as methodological approaches to its implementation. The reasons for the limited use of energy analysis in Ukraine are identified: the use of balance models is limited by the lack of statistics on intersectoral balance, and the analysis of the process by the complexity of the calculation models. The structure of total energy intensity is proposed. It is noted that in estimating energy costs for imports of energy and products, it is necessary to use the energy equivalent of the currency, taking into account all foreign currency revenues. It is determined that the further development of energy analysis using the process analysis approach requires refinement of the methodology proposed in DSTU 3682-98 and GOST 30583-98 by developing adequate simplifying assumptions and reducing the complexity of the calculation models. Improvement of this technique will increase the efficiency of energy analysis of investment projects, foreign economic relations, plans for economic development of the country, functioning of the economy and individual production processes, as well as expand the scope of energy analysis.*

**Key words:** energy analysis, total energy, direct energy, indirect energy, total energy intensity, balance models, process analysis.

### References

1. Podolinskii S.A. Trud cheloveka i ego otnoshenie k raspredeleniyu energii na nashei planete // Slovo.– 1880. - № 4, 5 – S.135-240 [in Russian].
2. D.I. Ponyatye o tsennosti i bogatstve s tochki zreniya ucheniya ob energii // Mysl. - 1880. - №10. – S.162-172, №11. – S.7-9 [in Russian].
3. Metodyka vyznachennia povnoi enerhoiemnosti produktsii, robot i posluh. DSTU 3682-98. – Derzhstandart Ukrainy. – Kyiv. – 1998. – 11 s. [in Ukrainian].
4. Metodika opredeleniya polnoy energoemkosti produktsii, robot i uslug. GOST 30583-98. - GOST 30583-98ezhgosudarstvennyiy sonet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. – 1998. – 11 s. [in Russian].
5. Bullard C., Penner P., Pilati D. (1978). Net Energy Analysis: a Handbook for Combining Processes and Input-Output Analysis // Resources and Energy. — Vol. 1. — No. 3. — P. 267–313.
6. Slesser M. Energy in the Economy. The Macmillan Press Ltd. London and Basingstoke, 1978, 164 p.
7. Verшин V.E. Osnovnyie printsipy postroeniya energo-ekonomicheskikh modeley proizvodstvennykh protsessov // Voprosy kibernetiki. Sistemnyie printsipy organizatsii modeley razvitiya. – 1981. – Vyip.72. – s.94-104. [in Russian].

8. Slesser M. Energy Analysis: Its Utility and Limits. - IIASA Research Memorandum. September 1978.
9. Chapman P. F. Energy Costs: a Review of Methods // Energy Policy. — 1974. — № 2. — P. 91–103.
10. Costanza R. Embodied Energy and Economic Valuation // Science. 1980. — Vol. 210. — P. 1219–1227.
11. Balandynovicz H.W., Bibrowski Z., Bojarski W. i in. Energochlonnosc skumulowana. - Warszawa: PWN, 1983. – 188 s.
12. Frischknecht R., Wyss F., Knöpfel S.B., Lützkendorf T. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. The International Journal of Life Cycle Assessment 20(7) · May 2015.
13. Sullivan J.L. , Clark C., Han J., Harto C.B. Cumulative energy, emissions, and water consumption for geothermal electric power production. Journal of Renewable and Sustainable Energy 5(2) · April 2013.
14. L.Chanel, P.Pourouchottamin L'energie grise : la face cachée de nos consommations d'énergie. - <https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/propositions/lenergie-grise-la-face-cachee-de-nos-consommations-energie>. - 2013.
15. Jancovici J-M. Pour un bilan carbone des projets d'infrastructures de transport website jancovici. Com. Tribune de Patrick Jeantet, PDG de SNCF Réseau, et de votre serviteur, parue sur le site des Echos le 26 décembre. - 2017.
16. Rozin S.E., Schelokov Ya.M. Energeticheskiy analiz obschestvennogo proizvodstva. – Problemy energosberezheniya. – 1991. - #8. – s.49-57. [in Russian].
17. Ukrainskaya assotsiatsiya staleplavilshchikov. Udelnyie rashodyi metallicheskoj shihty i energoemkost stali razlichnyih sposobov proizvodstva. - <http://uas.su/books/srmp/12/razdel12.php>. [in Russian].
18. Litvinenko V.G., Mantula V., Kanevskiy A.L., Andreeva T.A., Yuhnov V.Yu. Otsenka energoeffektivnosti proizvodstvana osnove analiza skvoznoy energoemkosti produktsii. – Ekologiya i promyshlennost. – 2009. # 2. S.47-53. [in Russian].
19. Boopendranath, M.R. and Shahul Hameed, M. (2013) Gross energy requirement in fishing operations. Fishery Technology, 50(1), pp. 27-35.
20. Станиціна В.В. Аналіз методів визначення показників енергетичної ефективності. Scientific Journal «ScienceRise» №10/2(15)2015. [in Ukrainian].
21. Metodika opredeleniya energoemkosti pri proizvodstve produktsii i okazanii uslug v tehnologicheskikh energeticheskikh sistemah. Obschie polozeniya. GOST R 51750-2001. – Moskva. - Gosstandart Rossii. – 2001.22. Мельник Л.Г. Економіка енергетики : підручник / За ред. Л.Г.Мельника, І.Н.Сотник. – Суми: Університетська книга, 2015. – 378 с. [in Russian].
23. Murphy D.J. Hall C.A.S. (2010). "Year in review EROI or energy return on (energy) invested". Annals of the New York Academy of Sciences. 1185 (1): 102–118.
24. Druzhinina O.G. Razrabotka algoritmov i modeley energo-ekologicheskogo analiza tehnologicheskikh protsessov i otsenka energozatrat na primere metallurgicheskikh tehnologiy. - Avtoreferat dissertatsii. – Ekaterinburg. – 1998. [in Russian].
25. Panchenko H.H. Metodyka vyznachennia povnoi vuhletsevoiemnosti produktsii, robot i posluh // Naukovi pratsi Ukrainskoho naukovo-doslidnoho hidrometeorolohichnoho instytutu. – Kyiv. - 2012. – vypusk 263. – s.107-112. [in Ukrainian].
26. Klimova G.N. Elektricheskie sistemy i seti. Energosberezhenie. – Uchebnoe posobie dlya SPO. – M. – Yurayt. – 2018. [in Russian].
27. Writhe D.J. Good and Services: on input-output analysis. – Energy policy. – December 1974. – 307-315.
28. Panchenko G.G. Energoekonomicheskii analiz proizvodstva produktsii, robot i uslug // Preprint NAN Ukrainyi. In-t problem energosberezheniya; 94-3. - Kiev. - 1994. – 30 s. [in Russian].
29. Danton R.V. The energy cost of goods and services in the Federal Republic of Germany. – Energy Policy. – 1975. – S.279-284.
30. Bullard C., Herendeen R. (1975). The Energy Cost of Goods and Services // Energy Policy.—No. 4.— P. 268–278.
31. Bush M.J. The energy intensity of commodities produced in Canada. - Energy, 1981, vol. 6, issue 6, 503-517.
32. Pick H.J., Becker P.E., 1975. Direct and indirect use of energy and materials in engineering and construction. Applied Energy 1 (1),31–51.
33. Peet N.J., Carter A.J., Baines J.T., 1985. Energy in the New Zealand household, 1974–1980. Energy 10 (11), 1197–1208.
34. Tiwari, P., 2000. An analysis of sectoral energy intensity in India. Energy Policy 28, 771–778.
35. Kulik M.N., Shulzhenko S.V., Kostyukovskiy B.A. Analiz izmeneniya potrebnosti Ukrainyi v toplivno-energeticheskikh resursah na osnovanii ispolzovaniya statisticheskogo mezhotraslevogo balansa // Problemi zagalnoyi energetiki, 1999, # 1 (47): 6-9. [in Russian].
36. М.М. Кулик Фундаментальні властивості основних матричних форм в системах рівнянь міжгалузевого балансу// Проблеми загальної енергетики, 2017, 2(49): 14-39. [in Ukrainian].
37. Bullard C., Herendeen R. (1975). The Energy Cost of Goods and Services // Energy Policy.—No. 4.— P. 268–278.
38. Pachauri S., Spreng D. Direct and indirect energy requirements of households in India. – Energy Policy; v. 30(6); 2002; p. 511-523.

39. Гнідой М.В., Куц Г.О., Терещук Д.А. Метод розрахунку повних енергетичних витрат на виробництво продукції. – Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1997. № 5. – с.67-72. [in Ukrainian].
40. Malyarenko, E. E. Primenenie metoda polnoy energoemkosti produktsii dlya analiza energeticheskoy effektivnosti proizvodstva - ISSN 1562-8965. Problemi zagalnoYi energetiki. – 2010. – # 3 (23). – S. 19–24. [in Russian].
41. Malyarenko, E. E. Primenenie metoda polnoy energoemkosti produktsii dlya analiza energeticheskoy effektivnosti proizvodstva - ISSN 1562-8965. Problemi zagalnoYi energetiki. – 2010. – # 3 (23). – S. 19–24. [in Russian].
42. Станиціна В.В. Енергоємність заходів з охорони навколишнього середовища як складова повної енергоємності продукції. - - ISSN 1562-8965. Проблеми загальної енергетики, 2011, вип. 4 (27). – с.47-52. [in Ukrainian].
43. BilodId V.D. OtsInyuvannya effektivnosti energetichnih tehnologiy za metodologIeyu viznachennya povnih energetichnih vitrat // ISSN 1562-8965. Problemi zagalnoYi energetiki, 2012, vip. 3 (30): 12-18. [in Ukrainian].
44. BilodId V.D. Viznachennya effektivnosti viroblennya elektrichnoYi energIYi atomnimi elektrostantsIyami za metodologIeyu povnih energetichnih vitrat. Chastina 1. Vitraty energIYi na budIvnytstvo // ISSN 1562-8965. Problemi zagalnoYi energetiki, 2018, vip. 2 (53): 36-44. [in Ukrainian].
45. Panchenko G.G., Korobko B.P. Energoemkost zagotovok detaley mashin // UkrNIINTI. Ser. Prom. Energetika i energosberezhenie. – 1990. – Vyip. 1. - 30 s. [in Russian].
46. Panchenko G.G. Energo-ekonomicheskii anali effektivnosti novovvedeniy. – Problemy energosberezheniya. – 1993. - #1. – s.29-37. [in Russian].
47. Tumanov Yu.N. Plazmennyie, vyisokochastotnyie, mikrovolnovyyie i lazernyyie tehnologii v himiko-metallurgicheskom proizvodstve. – M. – Fizmatlit. – 2010. [in Russian].
48. Schitov S.V., Tihonchuk P.V., Spiridanchuk N.V. Optimizatsiya energozatrat v tehnologii poseva selskohozyaystvennyih kultur. - KiberLeninka: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-energozatrat-v-tehnologii-poseva-selskohozyaystvennyih-kultur>. – 2013. [in Russian].
49. Schitov S.V., Tihonchuk P.V., Spiridanchuk N.V., Energozatraty kak kriteriy vyibora traktora. - Dostizheniya nauki i tehniki APK, #9. -2012. – s.75-76. [in Russian].
50. Balandinovich G., Parchevski Z. Problemyi opredeleniya osnovnih obschestvennyih potrebnostey v Polshe. – Ekonomika i matematicheskie metody. 1989. – tom XXV, vyip. 3. – s.477-483. [in Russian].

УДК 620.9

Г.Г. Панченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ORCID 0000-0002-7234-4078  
Институт общей энергетики Национальной академи наук Украины

## ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

*В статье дан обзор терминологии, методов, целей и задач энергетического анализа, а также методических подходов к его выполнению. Определены причины ограниченного применения энергетического анализа в Украине: использование балансовых моделей ограничено недостаточностью статистических данных о межсекторном балансе, а анализа процесса - сложностью расчетных моделей. Предложена структура полной энергоёмкости. Отмечено, что при оценке энергетических затрат на импорт энергоресурсов и продукции необходимо использовать энергетический эквивалент валюты с учетом всех поступлений валюты. Определено, что дальнейшее развитие энергетического анализа с применением подхода «анализ процесса» требует доработки предложенной в стандарте ДСТУ 3682-98 и ГОСТ 30583-98 методики путем разработки адекватных упрощающих предположений и уменьшения сложности расчетных моделей. Совершенствование этой методики позволит повысить эффективность энергетического анализа инвестиционных проектов, внешнеэкономических связей, планов экономического развития страны, функционирование экономики и отдельных производственных процессов, а также расширить сферы применения энергетического анализа.*

**Ключевые слова:** энергетический анализ, полные энергозатраты, прямые энергозатраты, непрямые энергозатраты, полная энергоёмкость, балансовые модели, анализ процесса.

Надійшла 21.10.2019

Received 21.10.2019

Я.М. Демчик, асистент, ORCID 0000-0001-6936-2366  
В.П. Розен, доктор технічних наук, професор, ORCID 0000-0002-0440-4251  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНКИ ПОХИБКИ ПРОГНОЗНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ПРОГНОЗІВ СПОЖИТОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОБ'ЄКТАХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РИНКУ

В статті досліджується оцінка моделей прогнозування електричної енергії на промислових об'єктах енергетичного ринку України. В процесі дослідження використано модель експоненціального згладжування першого порядку, модель Хольта, модель Вінтера, модель Бокса-Дженкінса та метод Singular spectrum analysis (SSA). Застосовані методи являються простими для прогнозування електричної енергії та дозволяють дослідити поведінку похибки прогнозування в залежності від способу оцінки прогнозних моделей. Використання сучасних способів збору інформації дозволить приймати правильні рішення в реальному часі. Стаття може суттєво вплинути на правильність вибору як параметрів моделей так і методу прогнозування електричної енергії. Дослідження дозволить з меншою похибкою проводити прогнозування електричної енергії на об'єктах енергетичного ринку України, знаючи статистику похибок методів прогнозування.

**Ключові слова:** експоненціальне згладжування, модель Бокса-Дженкінса, електроспоживання, промисловий об'єкт енергоринку, SSA, прогнозування, середньоквадратична похибка, коефіцієнт Тейла.

**Вступ.** Вплив на величину спожитої електроенергії має структура конкретного підприємства, особливості його роботи та одним із важливих методів є вибір методу прогнозування та знання статистики похибок прогнозних моделей. Для визначення похибки прогнозних величин електричної енергії потрібно правильно вибирати метод прогнозування та коефіцієнти, які впливають на подальшу похибку прогнозування електричного споживання. Управління споживанням електричної енергії промислових підприємств, компаній постачальників, компаній розподілу та виробника електричної енергії є важливим з точки зору правильності її замовлення та виробництва, що в свою чергу впливає на її вартість на оптовому ринку електричної енергії України [1, 2]. Для виробництва електроенергії суттєвим є вирішення задач оптимізації поставки, прогнозування і резервування електроенергії, проведення профілактичних робіт і забезпечення безпеки функціонування електроенергетичної системи (ЕЕС). Споживачу знання статистики похибок прогнозних моделей дозволить правильно вибрати модель прогнозування. Цей спосіб в свою чергу дозволить знизити величину ціни на електроенергію та дасть можливість повністю позбутися оплати штрафів у разі перевищення лімітів [1]. У зв'язку з цим за тривалий час в енергетичній сфері було створено велику кількість методів прогнозування електроспоживання [3-5], але не проводилась статистика похибок прогнозних моделей за допомогою простих прямих та непрямих вимірювань. Більшість методів прогнозування можна використовувати для короткострокового та середньострокового періоду прогнозування (дні, тижні та місяці). Таким чином розглядаються проблеми: по-перше, чи можливо за допомогою відомих методів описати статистичний ряд і прогнозувати його з заданою похибкою; по-друге, якщо використовувані методи прогнозування дають невелику похибку, можливо встановити вплив параметрів моделей на похибку прогнозування; по-третє, показати на прикладі практичні результати дослідження [6]. В якості методів дослідження було вибрано модифікації методу експоненціального згладжування, методу Бокса-Дженкінса та SSA, а в якості методів оцінки були вибрані середня квадратична похибка MSE, корінь із середньоквадратичної похибки RMSE, середня абсолютна похибка MAE, корінь із середньоквадратичної похибки у відсотках RMSPE, середня абсолютна похибка у відсотках MAPE та універсальний коефіцієнт Тейла.

Отже, суб'єкт оптового ринку, знаючи статистику похибок прогнозних моделей електроспоживання, буде вибирати прогнозну модель з найменшою похибкою. В свою чергу зменшення похибок фактичного споживання від заявлених значень електроспоживання призведе до зменшення закупівлі електроенергії з балансуємого ринку. Таким чином, висока точність прогнозу дозволить знизити фінансові втрати суб'єкта оптового ринку [2].

Похибка прогнозних оцінок визначає адекватність використовуваних математичних моделей процесу коливання споживання електроенергії. В цілому процес споживання електроенергії являє собою нестационарний випадковий процес, має визначення циклічності [4, 6].

**Мета та завдання.** Метою проведених досліджень є визначення оптимальних умов, за яких вибір методу прогнозування та коефіцієнтів будуть відповідати найменшим похибкам при прогнозуванні в реальному часі. Оцінка прогнозних моделей електроспоживання за рахунок визначення похибок та універсального коефіцієнту. Формування статистичних даних похибок прогнозних моделей за рахунок дослідження закономірності при виборі методу прогнозування та їх параметрів.

**Матеріали і результати досліджень** Питанням прогнозування електроспоживання об'єктів енергоринку займалися такі провідні українські вчені, як П.О. Черненко, А.В. Праховник, В.П. Розен, М.М. Кулик. Серед іноземних дослідників теоретичними та практичними питаннями енергетичного прогнозування можна назвати Й. Дікмана, Й. Хорна, Н.В. Кондрашова, Я.В. Васильєва. Дослідження названих вище вчених дали результати для подальшої роботи над удосконаленням методів прогнозування. Оцінка енерговитрат під час заявки електроенергії повинна визначатись за адекватними математичними моделями об'єктів дослідження, які враховують внутрішні матеріальні та інформаційні потоки. Це дозволяє здійснити аналізування моделей і на основі отриманої інформації виконувати оптимальне короткострокове управління та прогнозування. В статті [7] розглянуто методи експоненціального згладжування та його модифікації і зроблено висновок, яким чином поводить себе прогноз в залежності від методу прогнозування та коефіцієнту згладжування. В статті [6] також проведений порівняльний аналіз методів Бокса-Дженкінса та експоненціального згладжування. В статті запропоновано застосування методу SSA для прогнозування споживання електроенергії. Таким чином, аналіз публікацій [7, 9-11, 12, 13, 14] дозволяє зробити висновок, що в теперішній час відбувається відхід від використання статистичних методів прогнозування нестационарних часових рядів за допомогою методів декомпозиції. Перевагою методу SSA є відсутність вимоги апріорного задавання моделі ряду, а також можливість виділення гармонічних складових зі змінними амплітудами та частотами, що вигідно відрізняє його від методів, в основі якого лежить метод Фур'є.

**Виклад основного матеріалу досліджень.**

*Експоненціальне згладжування.*

Метод є простим варіантом самонавчальної моделі. Обчислення виконуються ітеративно.

Експоненціальне згладжування ряду здійснюється за рекурентною формулою[7]:

$$S_t = \alpha x_{t-1} + (1 - \alpha)S_{t-1} \tag{1}$$

де,  $0 < \alpha < 1$  параметр згладжування.

Експоненціальну середню  $S_t$  можна виразити через значення часового ряду.

$$S_t = \alpha \sum_{i=0}^{t-1} (1 - \alpha)^i x_{t-i} + (1 - \alpha)^t S_0, \tag{2}$$

Якщо горизонт прогнозування  $d$  дуже великий то для вирішення задачі прогнозування вибираємо модель Брауна [11]:

$$\hat{y}_{t+d} = \alpha x_t + (1 - \alpha)\hat{y}_{t-1}, \tag{3}$$

Модель Хольта або експоненціального згладжування з лінійним трендом – родоначальник методів адаптивного прогнозування [7]:

$$y'_{t+d} = a_t + db_{t-1}, \tag{4}$$

де,  $a_t$  – прогноз, очищений від тренда;  $b_t$  – параметр лінійного тренда.

$$a_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(a_{t-1} - b_{t-1}), \tag{5}$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}, \tag{6}$$

Модель Хольта-Вінтера або метод Вінтера, [7]:

Розрахунок експоненціально згладженого ряду:

$$L_t = \alpha Y_t / S_{t-s} + (1 + \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}), \tag{7}$$

Визначення значення тренду:

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 + \beta)T_{t-1}, \quad (8)$$

Оцінка сезонності:

$$S_t = \gamma Y_t / L_t + (1 - \gamma)S_{t-s}, \quad (9)$$

Проводиться прогноз:

$$Y_{t-p} = (L_{t+p} T_t) S_{t+s+p}, \quad (10)$$

де,  $L_t$  - згладжувана величина на момент розрахунку;  $\alpha$  - коефіцієнт згладжування ряду;  $S_{t-s}$  - коефіцієнт сезонності попереднього ряду;  $Y_t$  - значення періода;  $L_{t-1}$  - згладжування величина за попередній період;  $T_{t-1}$  - значення тренда за попередній період;  $T_t$  - значення тренда на момент розрахунку;  $\beta$  - коефіцієнт згладжування тренда;  $S_t$  - коефіцієнт сезонності на момент розрахунку;  $\gamma$  - коефіцієнт згладжування сезонності;  $Y_{t-p}$  - прогноз по моделі Хольта-Вінтерса на  $p$  періодів вперед;  $p$  - порядковий номер на який робимо прогноз;  $S_{t-s+p}$  - коефіцієнт сезонності за цей же період в останньому сезоні.

Таким чином, з одної сторони, потрібно збільшувати статистичний ряд та більш правильно вибирати коефіцієнти згладжування. Таким чином, пошук компромісних значень  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  складає задачу оптимізації моделі. Однією з важливих складових є вибір коефіцієнта який впливає на похибку прогнозування і в подальшому на точність прогнозу.

*Метод Бокса-Дженкінса.*

ARIMA або модель Бокса-Дженкінса – інтегрована модель авторегресії – змінного середнього модель і методологія аналізу часового ряду є розширенням моделей ARMA для нестационарних часових рядів, які можна зробити стаціонарними взяттям різниці деякого порядку від вихідного часового ряду. Модель ARIMA ( $p, d, q$ ) означає, що різниці часового ряду порядку  $d$  підкоряється модель ARIMA ( $p, q$ ) [10].

Модель ARIMA ( $p, d, q$ ) для нестационарного часового ряду  $X_t$  має вигляд:

$$\Delta^d X_t = c + \sum_{i=1}^p a_i \Delta^d X_{t-i} + \sum_{i=1}^q b_i \varepsilon_{t-i} \varepsilon_t, \quad (11)$$

де  $\varepsilon_t$  – стаціонарний часовий ряд;

$c, a_i, b_j$  – параметри моделі,

$\Delta^d$  – оператор різниці часового ряду порядку  $d$ .

Також дана модель інтерпретується як ARIMA ( $p+d, q$ ) модель з  $d$  одиничними корнями. При  $d=0$  маємо звичайні ARIMA-моделі.

Підхід ARIMA до часових рядів полягає в тому, що в першу чергу оцінюється стаціонарність ряду. Далі за необхідності ряд перетворюється взяттям різниці відповідного порядку і вже для перетвореної моделі будується деяка ARMA-модель, оскільки передбачається, що отриманий процес є стаціонарним, на відміну від вихідного нестационарного процесу.

Метод SSA базується на динамічній модифікації методу головних компонент, який не потребує стаціонарності часового ряду.

Побудуємо математичну модель часового ряду електроспоживання промислових об'єктів енергоринку. Для цього в якості об'єктів досліджень вибрано спостереження часових рядів електроспоживання  $W(t), t \in [1, N]$ , де  $N$  - рівновартісні значення функцій  $f(t)$  (табл. 1):

$$x_t = f((i-1)\Delta t), \quad (12)$$

де  $i = 1, 2, \dots, N$  - кількість спостережень,  $t$  – час,  $\Delta$  – деякий часовий інтервал,  $N$  – довжина часового ряду  $N = 1, n$ ,  $L$  – довжина вікна  $L = 1, n$ .

Алгоритм методу SSA складається з чотирьох етапів:

Крок 1. *Вложення*. Дана процедура переводить часовий ряд в послідовність багатомірних векторів.

Процедура вложення утворює  $K = N - L + 1$  векторів вложення, які мають розмірність  $L$ :

$$X_i = (f_{i-1}, \dots, f_{i+L-2})^T, 1 \leq i \leq K, \quad (13)$$



В результаті обчислення даного кроку отримаємо  $L$  – траєкторну матрицю вихідного ряду електричного споживання  $F$ .

Крок 2. *Сингулярне розкладання*. Матриця  $X$  може бути записано наступним чином:

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_d, \quad (14)$$

де  $X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$ ;  $U_1 \dots U_L$  – ортонормальна система власних векторів матриці;  $S(S = X \cdot X^T)$ ;  $\lambda_1 \dots \lambda_L$  – власні числа матриці  $S$ ;  $d = \max \{i, \lambda_i > 0\}$ .

В стандартній термінології  $\sqrt{\lambda_i}$  називаються сингулярними числами,  $U_i$  і  $V_i$  – лівими та правими сингулярними векторами матриці  $X$  відповідно. Кожна з матриць  $X_i$  має ранг 1. Тому їх можна називати елементарними матрицями. Набір  $\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i$  ми будемо називати власною трійкою сингулярних розкладань.

Крок 3. *Відбір головних компонент*. Розкладання може бути записано в наступному згрупованому вигляді:

$$X = X_{I_1} + X_{I_2} + \dots + X_{I_m}, \quad (15)$$

де  $m$  підмножини множин  $I_1 \dots I_m$ .

Результатом цього кроку являються слідууючою згрупована множина:

$$\begin{aligned} I_1 &= X_1 + X_2 + X_3 + X_5 \\ I_2 &= X_4 + X_6 + X_8 \\ I_3 &= X_7 + X_9 + X_{10} \end{aligned}, \quad (16)$$

Крок 4. *Діагональне усереднення*. На останньому кроці базового алгоритму кожна матриця згрупованого розкладання формується новий ряд довжини  $N$  за формулою:

$$g_k = \begin{cases} \frac{1}{k+1} \sum_{m=1}^{k+1} y_{m,k-m+2}^*, & 0 \leq k < L^* - 1 \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^{L^*} y_{m,k-m+2}^*, & L^* - 1 \leq k < K^* \\ \frac{1}{N-k} \sum_{m=k-K+2}^{N-K+1} y_{m,k-m+2}^*, & K^* \leq k < N \end{cases} \quad (17)$$

Оцінки точності прогнозної моделі та прогнозів

*Параметричні методи аналізу точності прогнозів*. За результатами прогнозу розраховують такі показники точності прогнозів за  $m$  кроків:

- середня квадратична похибка:

$$MSE = \frac{\sum_{i=n-m+1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{m} \quad (18)$$

-корінь із середньоквадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=n-m+1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{m}}, \quad (19)$$

-середня абсолютна похибка:

$$MAE = \frac{\sum_{i=n-m+1}^n |y_i - \hat{y}_i|^2}{m}, \quad (20)$$

-середня абсолютна похибка у відсотках (MAPE):

$$MAPE = \sum_{i=n-m+1}^n \frac{100 |y_i - \hat{y}_i|}{m |y_i|}, \quad (21)$$

Чим менше значення цих величин, тим вища якість прогнозу. На практиці ці характеристики використовують досить часто. Даний підхід дає якісні результати, якщо на періоді прогнозу не виникають принципово нові закономірності.

На підставі останніх двох критеріїв можна дійти висновку стосовно загального рівня похибки моделі шляхом їх порівняння. Цей рівень наведений у табл. 1 [5/22].

Таблиця 1 – Похибка прогнозу в залежності від MAPE, RMSPE

MAPE,	Похибка прогнозу
Менше 10%	Висока
10%-20%	Добра
20%-40%	Задовільна
40%-50%	Погана
Більше 50%	Незадовільна

Недоліком обговорених вище характеристик точності прогнозів є їх залежність від обраних одиниць вимірювання. Було б корисним указати безрозмірний показник, аналогічний до коефіцієнта кореляції. Одним з таких показників є коефіцієнт невідповідності Тейла  $U$ , чисельником якого є середньоквадратична похибка прогнозу, а знаменник дорівнює квадратному кореню із середнього квадрата фактичних та оцінних значень:

$$U = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2 / m}}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i^2 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{y}_i^2}}, \quad (22)$$

Перевага коефіцієнта Тейла полягає в тому, що його значення завжди перебувають у межах від 0 до 1. Якщо всі прогнози абсолютно точні, то  $U=0$ . Якщо всі прогнози дорівнюють нулю, а жодне з фактичних значень не дорівнює нулю або навпаки,  $U$  дорівнюватиме одиниці. Таким чином, мале значення  $U$  засвідчує, що прогноз є точним, але максимального значення не існує. Значення, яке дорівнює одиниці, відповідає ситуації, коли всі прогнозні значення дорівнюють нулю, що нереально під час прогнозування номінальних величин, але під час розгляду змін такий прогноз відповідає моделі «без змін». Більші за одиницю значення вказують на те, що прогноз гірший, ніж прогноз «без змін» [5/43].

Обговорені характеристики похибок прогнозів є параметричними в тому сенсі, що вони потребують виконання заданих припущень щодо властивостей математичного очікування та дисперсії, чинних за умов нормальності відповідних розподілів. Наприклад, використовуючи  $MSE$ , ми неявно припускаємо, що всі похибки прогнозу мають однакові й постійні математичні сподівання та дисперсії.

**Результати роботи.** В роботі розглянуто 5 методів прогнозування, при яких змінювалися параметри моделей, та виконувався аналіз даних прогнозування.

Метод простого експоненціального згладжування, метод Хольта, метод Вінтера, метод Бокса-Дженкінса та SSA вибрано з 2000 значень прогнозів 10% найкращих результатів прогнозування.

Розрахуємо вищеперераховані характеристики прогнозів, побудованих із використанням методів.

Результати розрахунків за формулами зведемо в таблицю 2 і на їх основі зробимо висновки про адекватність побудованих моделей

Розрахуємо характеристики визначення точності для побудованих прогнозів за формулами.

Таблиця 2 – Споживання електроенергії за період з 01.01.2018 по 31.12.2018 р. та дані прогнозування 01.01.2019 по 31.01.2019 р методами

Модель прогнозування	Коеф. мод.	Фактичне значення електроспоживання	Прогнозне значення електроспоживання	MSE	RSME	MAE	MAPE	U
Експоненціального згладжування	0,6	5740629	5713136,297	2,18882E+11	308740,2019	27492,7032	0,47	0,001
	0,7	5740629	5727758,683	2,28536E+11	261059,2533	12870,3170	0,22	0,001
	0,8	5740629	5737518,009	2,3248E+11	202981,45	3110,99142	0,05	0,0008
	0,9	5740629	5744418,075	2,3296E+11	138677,68	3789,07467	0,06	0,0006
	1,0	5740629	5750054,04	2,3136E+11	71166	9425,04	0,16	0,0004
Хольта	0,4 0,2	5740629	5733884,953	1,8775E+11	479220,28	6744,04688	0,11	0,004
	0,6 0,1	5740629	5745394,86	2,3747E+11	362382,74	4765,86	0,08	0,014
	0,7 0,1	5740629	5759072,071	2,4931E+11	298671,95	18443,0706	0,32	0,009
	0,8 0,1	5740629	5766589,579	2,5206E+11	25960,579	25960,5788	0,45	1
	0,9 0,1	5740629	5770895,592	2,5009E+11	30266,592	30266,5923	0,52	0,00006
	0,8 1,0	5740629	5771661,5	2,1649E+11	31032,5	31032,5001	0,54	0,001
Вінтера	0,7 0,6 0,8	5740629	5741623,453	5,0669E+11	994,45325	994,45325	0,01	0,005
	0,6 0,5 1,0	5740629	5734294,374	1,0267E+12	6334,6264	6334,62645	0,11	0,012
	0,4 0,4 0,7	5740629	5734021,934	7,2922E+11	6607,0659	6607,06593	0,11	0,0005
	0,4 0,5 1,0	5740629	5743075,166	3,7921E+11	2446,1659	2446,16587	0,04	0,010
	0,7 0,7 0,8	5740629	5738326,755	8,083E+11	2302,2446	2302,24455	0,04	0,009
Бокса-Дженкінса	0 24	5740629	5729596,362	6321839542	11032,638	11032,6376	0,19	0,0011
SSA	36 77	5740629	5743639,854	1,0678E+11	3010,8545	3010,85449	0,05	0,016
	161 162	5740629	5739019,583	1,76966E+12	1609,416555	1609,41655	0,02	0,52
	46 127	5740629	5744545,295	5,2357E+10	3916,2953	3916,2953	0,06	0,008
	31 47	5740629	5742198,834	1,6594E+11	1569,8339	1569,83386	0,02	0,017
	31 132	5740629	5729596,362	6321839542	11032,638	11032,6376	0,19	0,0011

В якості ряду фактичних значень споживаної електроенергії  $y_t$ , приймемо значення  $W$ , кВт\*год 2018 р., а в якості ряду прогнозованих значень  $\hat{y}_t$ , відповідно результати прогнозу обох моделей на 01.01.2019 р. по 31.01.2019р. а потім порівняємо отримані показники.

На підставі розрахованих критеріїв, а саме – середньої квадратичної похибки *MSE*, кореня із середньоквадратичної похибки *RMSE*, середньої абсолютної похибки *MAE*, середньої абсолютної похибки у відсотках *MAPE* та коефіцієнта Тейла (рис.1) робимо висновок стосовно загального рівня адекватності моделей шляхом їх порівняння (чим менше значення критеріїв, тим краще).

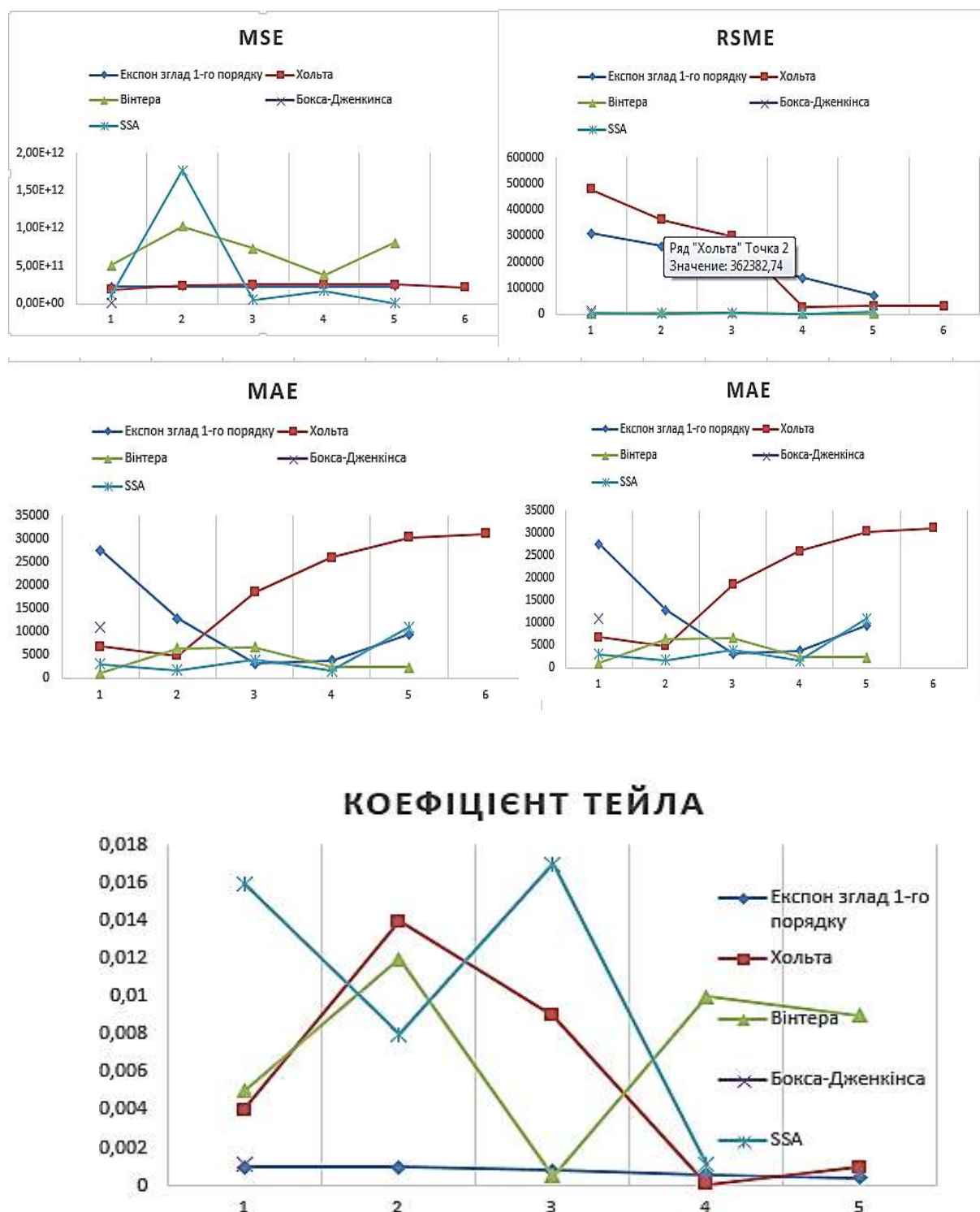


Рисунок 1 – Графіки порівняння залежності похибки прогнозу відповідно до методу прогнозування: середня квадратична похибка *MSE*, корінь із середньоквадратичної похибки *RMSE*, середня абсолютна похибка *MAE*, середня абсолютна похибка у відсотках (*MAPE*)

**Висновки:**

1. Дослідження показало, що оцінка моделей прогнозування дозволить робити вибір прогнозової моделі за короткий час, при цьому похибка прогнозування сягатиме до 10%.
2. Порівняння методів оцінки похибки моделей прогнозування електроспоживання показало, що відношення стандартного відхилення та коефіцієнта Тейла є найбільш придатним для цілей порівняння, оскільки являє собою число між 0 і 1.
3. Значення кореня із середньоквадратичної похибки *RMSPE* дуже мале саме для методів, на основі чого можна стверджувати, що точність прогнозів висока. Значення середньої абсолютної похибки *MARE* становить для методів відповідно, що також свідчить про високу точність.
4. Значення отриманих безрозмірних коефіцієнтів Тейла свідчать, що прогнози мають високу точність (прогнози абсолютно точні, якщо  $U=0$ ).
5. Розрахунками підтверджено, що метод SSA доцільно використовувати в задачах короткострокового прогнозування та при плануванні режимів споживання електроенергії.
6. Прогнозування електроспоживання значно залежить від добового та сезонного електроспоживання. В енергооб'єднаннях, де спостерігається висока нерівномірність графіків споживання електроенергії і при цьому наявне суттєве відхилення споживання від сезонного тренду, похибки прогнозування не є значними.
7. Під час організації ринкових операцій з купівлі-продажу електроенергії і потужності енергооб'єднань з високою нерівномірністю графіків електричного споживання похибка прогнозування буде високою, і вони в більшій мірі будуть піддаватися штрафним санкціям за перевищення або заниження величин споживання.
8. Найкращі результати прогнозування електроспоживання отримані у разі використання спеціально розроблених моделей прогнозування з урахуванням метеофакторів.

**Список використаної літератури**

1. Б.И. Макоклюев, «Прогнозирование потребления электроэнергии АО Мосэнерго» / Макоклюев Б.И., Владимиров А.И. – Журнал ТЭК №4 Москва. - 2001.
2. А.В. Соломкин, «Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии с помощью нейросетевых методов» / А.В. Соломкин. – ГОУВПО «Мордовский государственный университет им Н.П. Огарева». – Саранск 2012.
3. Н.Э. Голядина, «Обработка многомерных временных рядов с помощью метода «Гусеница» // Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под. ред. Н.Э. Голядина, Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского: Изд-во СПбГУ, 1997. – С.105-131.
4. Е.И. Цветков «Нестационарные случайные процессы и их анализ» // Е.И. Цветков. – М.: Энергия, 1973. – 128 с.
5. «Про затвердження Методики визначення обсягу та вартості електричної енергії, не облікованої внаслідок порушення споживачами правил користування електричною енергією» Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики України від 4 травня 2006 року N 562
6. Е.М. Четыркин, «Статистические методы прогнозирования». – М.: Статистика, 1977. – 263с.
7. Д.В. Бэнн, «Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки» [Текст] / Д.В. Бэнн, Е.Д. Фармер; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200с.
8. D.S. Broomhead, Extracting qualitative dynamics from experimental data [Text] / D.S. Broomhead, G.P. King // Physica D. – 1986. – Vol. 20, Issue 2-3. – P. 217-236. doi: 10.1016/0167-2789(86)90031-x
9. K. Fraedrich, Estimating the dimension of weather and climate attractor [Text] / K. Fraedrich // J. Atmos Sci. – 1986. Vol. 43. – P. 419-432.
10. R. Vautard, Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series [Text] / R Vautard, M. Ghil // Physica D. – 1989. – Vol. 35, Issue 3. – P. 395-424. doi: 10.1016/0167-2789(89)90077-8
11. M. Ghil, Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series [Text] / M. Ghil, R. Vautard // Nature. – 1991. – Vol. 350, Issue 6316. – P.324-327. doi: 10.1038/350324a0
12. В.Н. Щелкалин, Трендовый подход прогнозирования временных рядов на основе метода «Гусеница»-SSA [Текст] / Материалы 14-й Международной научно-технической конференции SAIT 2012, Киев, 24 апреля 2012г. / В.Н. Щелкалин // УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ». – К.: УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2012. – С. 258 – 259.
13. В.Н. Щелкалин, Декомпозиционный подход прогнозирования временных рядов на основе метода «Гусеница»-SSA [Текст]: Материалы 14-й Международной научно-технической конференции SAIT / В.Н. Щелкалин // УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ». – К.: УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2012. – С. 260 – 261.
14. Н.Э. Голядина. Метод «Гусеница»-SSA: прогноз временных рядов [Текст]: уч. пос. / Н.Э. Голядина. – СПб.: С-Петербургский государственный университет, 2004. – 52с.

**Ya. Demchik**, assistant, ORCID 0000-0002-0440-4251  
**V. Rozen**, Dr. Sci., Professor, ORCID 0000-0001-6936-2366  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## **ESTIMATIONS OF ERROR OF PROGNOSIS MODELS AND PROGNOSES OF THE USED ELECTRIC ENERGY ARE ON OBJECTS OF POWER MARKET**

The article examines the estimation of models of forecasting of electric energy on industrial objects of the energy market of Ukraine. The exponential first-order smoothing model, Holt model, Winter model, Box-Jenkins model and Singular spectrum analysis (SSA) were used in the study. The methods used are simple to predict electricity and allow you to investigate the behavior of the prediction error, depending on how the model is estimated. Using modern methods of gathering information will allow you to make the right decisions in real time. The article can significantly affect the correct choice of both model parameters and method of forecasting electricity. The research will allow to make the forecasting of electric energy with less error in the objects of the energy market of Ukraine knowing the statistics of errors of forecasting methods. The study has shown that estimation of forecasting models will allow to make a choice of a forecasting model in a short time and the forecasting error will reach up to 10%. Methods for estimating the error of power consumption forecasting models have shown that the standard deviation ratio and the Taylor coefficient are the most suitable for comparison purposes because it is a number between 0 and 1. The root value of the root mean square error of the RMSPE for the methods is very small, namely for the methods, on the basis of which it can be stated that the accuracy of the forecasts is high. The mean absolute MAPE error is for the methods, respectively, which also indicates good accuracy. The values of the dimensionless obtained Tail coefficients, which are equal and corresponding, respectively, indicate that the forecasts have high accuracy (forecasts are absolutely accurate if  $U = 0$ ). The calculations confirmed that the SSA method is appropriate for use in short-term forecasting tasks and when planning power consumption modes. Electricity forecasting is highly dependent on daily and seasonal power consumption. In energy associations where there is a high irregularity in electricity consumption schedules, and there is a significant deviation of consumption from the seasonal trend, the prediction error is not significant. When organizing market power sales and power interconnections with high irregularity in electricity consumption schedules, the forecasting error will be high and they will be subject to greater penalties for exceeding or reducing consumption. The best results from power consumption forecasting are obtained when using specially designed weathering models.

**Key words:** exponential smoothing, Box-Jenkins model, power consumption, industrial facility, SSA, forecasting, root mean square error, Taylor coefficient.

### **References**

1. BI Makoklyuev, "Power consumption forecasting of Mosenergo JSC" / BI Makoklyuev, AI Vladimirov - TEK Magazine №4 Moscow. - 2001.
2. A.V. Solomkin, "Short-term forecasting of electricity consumption using neural network methods" / AV. Solomkin. - State Institution «Mordovian State University named after N.P. Ogareva». - Saransk 2012.
3. NE Golyadina, "Processing of multidimensional time series using the Caterpillar method // Main components of time series: the Caterpillar method" / Under. ed. NE Golyadina, D.L. Danilova, A.A. Zhiglyavsky: Publishing House of St. Petersburg State University, 1997. - P.105-131.
4. E.I. Tsvetkov "Non-stationary random processes and their analysis" // I.E. Flowers. - M.: Energy, 1973. - 128 p.
5. "On Approval of the Methodology for Determining the Volume and Cost of Electricity Not Taken Due to Violation of Consumers' Rules for Electricity Use" Resolution of the National Electricity Regulatory Commission of Ukraine dated May 4, 2006 N 562
6. E.M. Chetyrkin, "Statistical forecasting methods". - M.: Statistics, 1977. - 263s.
7. D.V. Bann, "Comparative models for predicting electrical load" [Text] / DV. Bann, E.D. Farmer; trans. with English. - M.: Energoatomizdat, 1987. - 200s.
8. D.S. Broomhead, Extracting qualitative dynamics from experimental data [Text] / D.S. Broomhead, G.P. King // Physica D. - 1986 - Vol. 20, Issue 2-3. P. 217-236. doi: 10.1016 / 0167-2789 (86) 90031-x
9. K. Fraedrich, Estimating the Dimension of Weather and Climate Attractor [Text] / K. Fraedrich // J. Atmos Sci. - 1986. Vol. 43. P. 419-432.
10. R. Vautard, Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series [Text] / R Vautard, M. Ghil // Physica D. - 1989 - Vol. 35, Issue 3. P. 395-424. doi: 10.1016 / 0167-2789 (89) 90077-8

11. M. Ghil, Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series [Text] / M. Ghil, R. Vautard // Nature. - 1991 - Vol. 350, Issue 6316. - P.324-327. doi: 10.1038 / 350324a0
12. VN Schelkalin, Trend approach of forecasting time series based on the Track-SSA method [Text] / Proceedings of the 14th SAIT 2012 International Scientific and Technical Conference, Kiev, April 24, 2012. / VN Shchekalin // IPSA UNC NTUU "KPI". - K. : UNESCO "IPSA" NTUU "KPI", 2012. - P. 258 - 259.
13. VN Schelkalin, Decomposition Approach of Time Series Prediction Based on the Track-SSA Method [Text]: Proceedings of the 14th SAIT International Scientific and Technical Conference / V.N. Shchekalin // IPSA UNC NTUU "KPI". - K. : UNESCO "IPSA" NTUU "KPI", 2012. - P. 260 - 261.
14. N.E. A little. Caterpillar Method -SSA: Time Series Forecast [Text]: uch. pos. / NE A little. - St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2004. - 52 p.

Надійшла 22.10.2019  
Received 22.10.2019

П.В. Соколовський, PhD студент, ORCID 0000-0002-0113-4479  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ВІРТУАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ У РАМКАХ ІЄРАРХІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ОБМЕЖЕННЯХ ЛІБЕРАЛІЗОВАНИХ ЕНЕРГОРИНКІВ

*Розвиток енергетики України перебуває в режимі реформування та законодавчих змін. Шлях до лібералізації енергоринків не є новим процесом в розвитку енергетичних секторів країн ЄС та США, однак ще не реалізований в повній мірі в Україні. Основна мета лібералізованих ринків електроенергії - гарантувати безпеку загальної системи, підвищення ефективності роботи та зниження вартості електроенергії за рахунок конкуренції. Успіх ринку електроенергії, не залежить лише від адекватної регуляторної політики, а й від прибутковості суб'єктів-учасників. Просування концепції віртуальних електричних станцій та концепції енергетичних співтовариств – світовий тренд, який активно просувається та реалізовується в багатьох країнах світу. Їх досвід може бути використаний для формування вітчизняної концепції розвитку сектору енергетики. В роботі проаналізовано стан та основні етапи реформування енергоринку України. Надано оцінку етапам, передумовам, критеріям та можливим наслідкам в реалізації і роботі лібералізованих енергоринків. Описано основні фактори, що впливають на реалізацію умови лібералізації енергоринку. Для активних споживачів, які є основним елементом переходу та становлення лібералізованого енергоринку визначено негативні наслідки і переваги в процесі формування свідомого і активного енергетичного суспільства.*

**Ключові слова:** відновлювана енергетика, віртуальна електрична станція (Virtual Power Plant (VPP)), лібералізація, енергоринок, Energy Smart Community (ESC), Smart City, Smart Grid, photovoltaic (PV), renewable energy sources (RES), prosumage, сонячна електростанція, розподілена генерація, Energy Storage System (ESS).

**Вступ.** На сьогодні розвиток сектору відновлюваної енергетики України йде швидкими темпами за рахунок сприятливого енергетичного та економічного кліматів. За даними Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), за 9 місяців 2019 року було введено 7 638 (298 промислових та 7340 СЕС домогосподарств) об'єктів відновлюваної електроенергетики загальною потужністю 2 661 МВт, з них: 253 об'єктів сонячної енергетики загальною потужністю 2032 МВт; 25 об'єктів вітроенергетики загальною потужністю 399 МВт; 7340 сонячних станцій домогосподарств загальною потужністю 188 МВт; 7 об'єктів малої гідроенергетики загальною потужністю 1,5 МВт; 9 електростанцій на біогазі загальною потужністю 24 МВт; 1 електростанцій на біомасі загальною потужністю 16 МВт.

У будівництво 3 968 МВт потужностей об'єктів відновлюваної електроенергетики інвестовано близько 3,4 млрд євро. Станом на 01.10.2019 року в Україні працює 15 665 (875 промислові та 14 790 СЕС домогосподарств) об'єктів відновлюваної електроенергетики, яким встановлено «зелений» тариф, загальною потужністю 4 935 МВт, з них: 611 СЕС загальною потужністю 3 420 МВт; 55 ВЕС загальною потужністю 932 МВт; 14 790 СЕС приватних домогосподарств 345 МВт; 153 МГЕС загальною потужністю 112 МВт; 45 електростанції на біогазі загальною потужністю 70 МВт; 11 електростанцій на біомасі загальною потужністю 56 МВт [1].

Останніми роками зростання сектора було швидким, і така тенденція триватиме у наступні роки, однак інвестори повинні ретельно оцінювати вплив нового режиму аукціонів.

За офіційними даними НКРЕКП встановлені потужності і ключові проекти станцій з виробництва відновлюваної енергії в розрізі регіонів станом на 31 грудня 2018 р. (не враховуючи офіційних статистичних даних за 2019 рік), МВт-пik [1,2] представлено на рис.1.

Україна планує збільшити виробництво енергії з відновлюваних джерел з 4% в 2015 році до 12% до 2025 року і довести показник до 25% в 2035 році. Це зростання залежить від правового середовища і доступу до міжнародного фінансування. До цього часу зростання, значною мірою, зумовлювалося ухваленням у 2008 році зеленим тарифом, яким до кінця 2029 року гарантуються ціни на електроенергію, отриману з виробничих потужностей відновлюваної енергетики, введених в експлуатацію до кінця 2019 року [3,4].

Подальший розвиток, без суттєвого впливу на ціну електроенергії, стимулюватиметься за рахунок



ухваленого Закону про аукціони [4]. Пілотний аукціон повинен відбутися до 31 грудня 2019 року. Перший із запланованих регулярних аукціонів, що будуть проводитися двічі на рік, буде проведено до 1 квітня 2020 року.

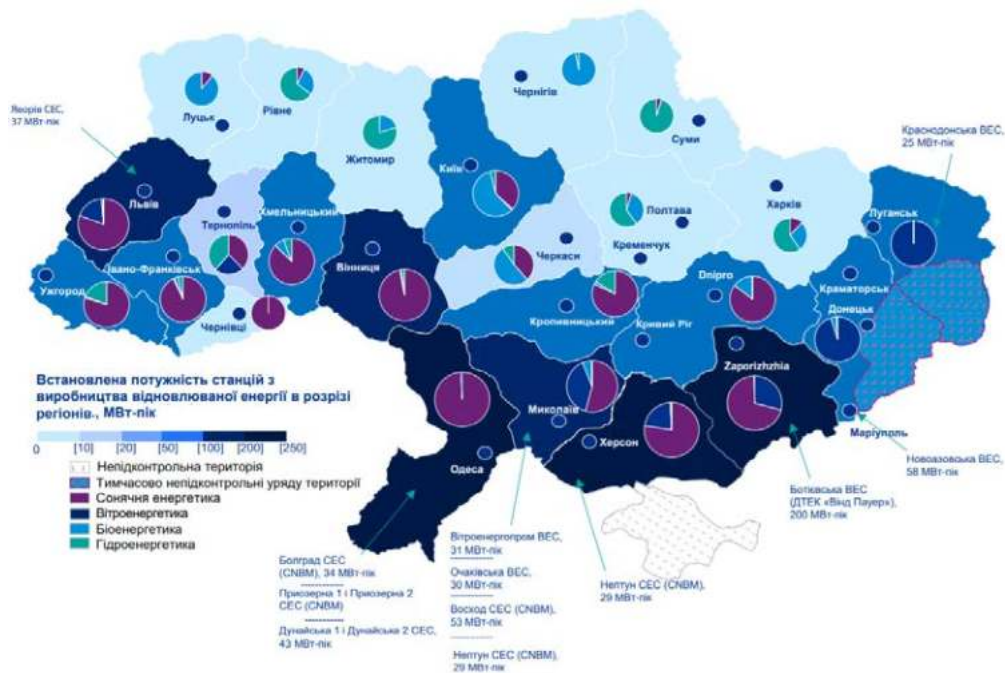


Рисунок 1 – Встановлені потужності і ключові проекти в сфері відновлюваної енергетики України

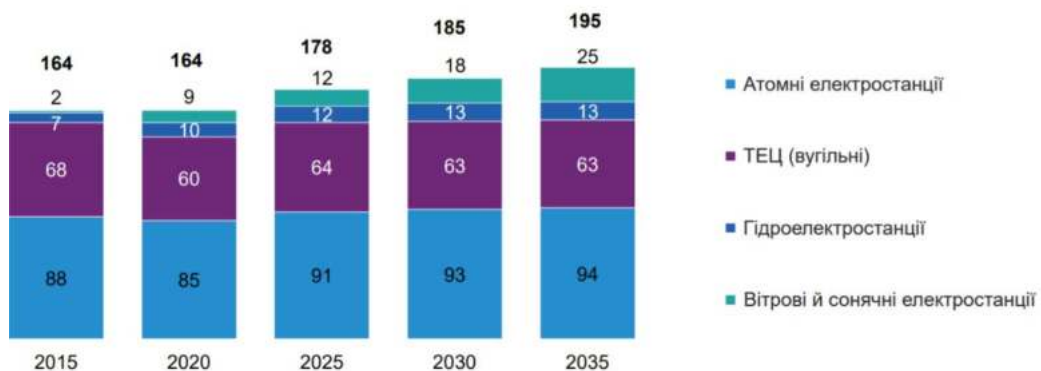


Рисунок 2 – Прогноз виробництва електроенергії (млрд кВт-год)

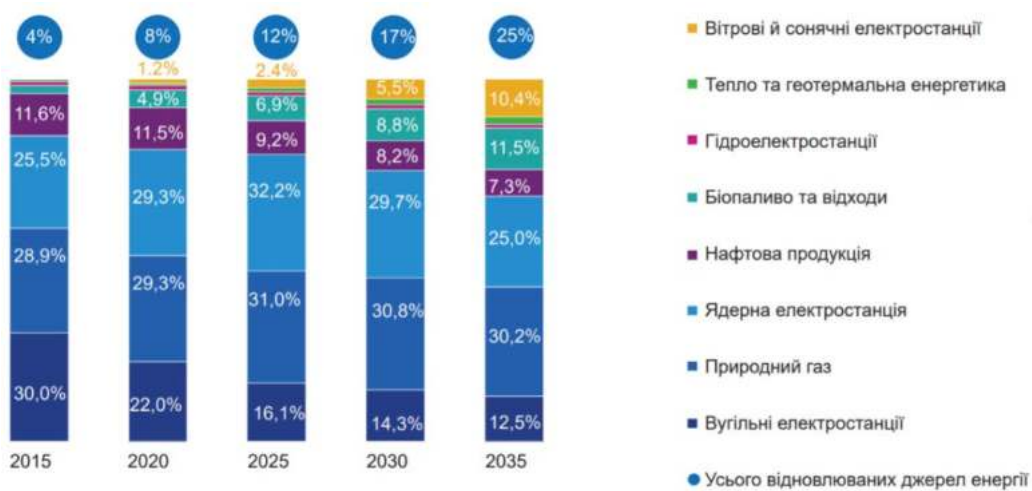


Рисунок 3 – Встановлені потужності і ключові проекти в сфері відновлюваної енергетики України

Триває робота із синхронізації української енергосистеми з європейською ENTSO яка, окрім забезпечення таких необхідних функцій резервування в системі, також дозволить ефективно конкурувати на внутрішньому ринку електроенергії з надходженням від міжнародних постачальників, одночасно надаючи українським АЕС і електростанціям на основі відновлюваних джерел доступ до ринків Європейського Союзу. Завершення цих робіт дозволить Україні розірвати енергетичні зв'язки із Російською Федерацією. Прогноз виробництва електроенергії (млрд кВт-год) та прогнози щодо структури енергопостачання України показано на рисунках 2,3.

Така інтернаціоналізація ринку підвищить інвестиційну привабливість українського енергетичного сектора, а отже заохотить інвесторів до участі у нових проектах, пов'язаних з відновлюваною енергетикою [5]

**Метою роботи** є аналіз взаємодії віртуальних електричних станцій та активних споживачів в умовах лібералізації енергоринку України

#### **Передумови до лібералізації енергоринку України**

Україна зробила великі технічні, економічні та політичні кроки до лібералізації роздрібною ринку електроенергії, відповідно до стандартів ЄС. Тепер майже всі споживачі мають можливість самостійно обирати свого постачальника електроенергії. Домогосподарства та підприємства малого та середнього бізнесу (МСБ), зазвичай, будуть обслуговуватися існуючими постачальниками (які на момент отримання ліцензії були частиною вертикально інтегрованих компаній), яким доручено виконувати так зване «зобов'язання щодо універсальних послуг» до середини 2020-го року. Домогосподарства та МСБ як споживачі електроенергії можуть обирати комерційного постачальника (крім свого постачальника універсальних послуг). Проте, оскільки максимальна ціна, яку універсальний постачальник може стягувати зі споживачів, встановлюється адміністративно на основі тарифу, затвердженого НКРЕКП, очікується масовий перехід від універсальних постачальників, що і є головною метою прийнятого закону. Уряд хоче реалізувати умову: аби жодне домогосподарство або суб'єкт малого бізнесу не залишилися без постачальника, після введення в дію реформи [6].

Таким чином, на ринку роздрібною торгівлі конкуренція буде відбуватися головним чином у сегменті великих споживачів, принаймні на першому етапі. Промислові споживачі можуть домовитися щодо контракту на постачання з будь-яким обраним постачальником і змінювати його декілька разів на рік. На сьогодні ДП «Енергоринок», оператор ринку, єдиний суб'єкт права на придбання та продаж електроенергії на оптовому ринку до липня 2019 року, підписав контракти із 179 енергопостачальниками. Той факт, що ДП «Енергоринок» збереже цю монополію протягом наступних шести місяців і продовжить адміністративно встановлювати оптову ринкову ціну до липня, серйозно обмежує конкуренцію на рівні роздрібною ринку. Незрозуміло, на якій підставі роздрібною постачальники конкуруватимуть, якщо електроенергія, яку закупають на оптовому ринку, однакова для всіх і таким чином не може бути отримана конкурентна перевага. Через це реальна конкуренція, навіть у більшому сегменті споживачів, швидше за все з'явиться лише з липня 2019 року, після повного відкриття оптового ринку.

#### **Фактори, що впливають на реалізацію умови лібералізації енергоринку.**

Реалізація процесу врегулювання небалансів або організації комерційного обліку, які є ключовими для належного функціонування оптового ринку, затягується. Відсутність конкуренції між виробниками електроенергії. На ринку є кілька великих виробників (в основному державні теплові електростанції та електростанції, що належать ДТЕК), і можливості для транскордонної торгівлі обмежені. Лише відносно невелика частина України (Бурштинський енергоострів) пов'язана з енергоринками ЄС. Лінії електропередачі з Росією та Білоруссю не використовуються для торгівельних цілей, і можливе ринкове сполучення з Молдовою матиме відносно обмежений вплив на ліквідність українського ринку і не зруйнує нинішню олігополістичну структуру. Швидка фізична інтеграція із ENTSO-E та подальша лібералізація експорту та імпорту електроенергії (валові обсяги яких наразі підлягають попередньому затвердженню з боку уряду) мають потенціал для значного збільшення ліквідності українського ринку електроенергії.

Негативним фактором є й те, що перехід на стимулююче регулювання для ОСР (регульована база активів як основа для розрахунку тарифів) була відкладена. Модель компенсації для постачальників універсальних послуг для пом'якшення наслідків можливої нестабільності оптового ринку після липня 2019 року далека від чіткої. Ситуація із захищеними споживачами та питання щодо належного балансу між платіжною дисципліною та захистом від переривань поставок (наприклад, з водоканалами) залишаються невирішеними. Необхідно запровадити ефективну систему підтримки вразливих споживачів, які мають труднощі з оплатою комунальних послуг. Водночас, як було зазначено, НЕК «Укренерго» не досягла значного прогресу у створенні ІТ-системи для централізованого врегулювання небалансів, і на даний час уряд не обрав банк, який буде забезпечувати фінансові гарантії та кліринг. Важко оцінити готовність учасників ринку до нової моделі (хоча, виходячи з опитувань, проведених проектним офісом протягом 2018 року, можна було відзначити певний прогрес). Деякі учасники ринку (такий як, «Енергоатом») зробили конкретні кроки і, наприклад, вже придбали ІТ-системи, які дозволять їм купувати та продавати електроенергію через ринок двосторонніх договорів, ринку «на добу вперед» та внутрішньодобовому ринку.

Інші все ще борються з адаптацією відповідної стратегії і можуть відставати від закупівель IT-систем та реалізації інших організаційних заходів (створення центрів клієнтської підтримки, ефективних систем білінгу, тощо) [6].

На даний момент Україна є єдиною державою пострадянського простору, яка іде шляхом реформування енергетичного ринку. Необхідно також врахувати, що для того, щоб роздрібні та оптові ринки електроенергії стабілізувалися, знадобиться деякий час, але наприкінці шляху лежить винагорода за більш конкурентний і безпечний ринок електроенергії з перспективою приєднання до загальноєвропейського ринку електроенергії на рівних умовах, на користь українського споживача.

#### **Застереження, які можуть впливати на реалізації процесу лібералізації енергоринку України**

За дослідженнями, проведеними Антимонопольним комітетом України (АМКУ), лібералізація енергетичного ринку України перш за все повинна проходити з закриттям проблемних (невирішених) питань, найбільш гострим з яких є висока концентрація ринку: частка «Енергоатому» - понад 55 % ринку генерації електроенергії, «ДТЕК» займає близько - близько 25 %.

Це попереджує присутність на ринку факторів високого ризику зловживання ринковою владою, які можуть становити :

- встановлення монополю високих цін окремими гравцями ринку;
- застосування різних договірних підходів (цін чи умов) до рівнозначних угод;
- створення штучного дефіциту (відмова від реалізації / обмеження виробництва);
- недопуск на ринок нових гравців / усунення з ринку конкурентів;
- використання або розголошення конфіденційної (інсайдерської інформації).

Передбачається, що в перші півроку новий ринок працюватиме в режимі «безпечного перехідного режиму», під час якого діятимуть певні обмеження самостійності генеруючих компаній. Цей період має бути використаний для роботи зі створення умов, за яких головним регуляторним фактором стане конкуренція. Для того, щоб змусити найбільших гравців змагатися (а не домовлятися) між собою.

Зокрема АМКУ надав пропозицію із запровадження на ринку двосторонніх договорів біржової торгівлі за принципом двостороннього електронного аукціону та залучити імпорту електроенергію як дієвого конкурента для вітчизняних виробників (на першому етапі принаймні в «Бурштинський острів», що вже створить конкурентний тиск на генерацію). Реалізація цього дозволить запровадити справжню конкуренцію, яка забезпечить: зниження цін на електроенергію; підвищення якості та безпеки надання послуг з її постачання; забезпечення енергетичної безпеки держави через синхронізацію ОЕС України із європейським ринком [7].

#### **Реформування енергоринку та наслідки.**

Реформування енергетичного ринку є першочерговою умовою стратегії розбудови розумного співтовариства Energy Smart Community, як одна з ключових складових переходу до Smart Grid та Smart City передбачає поділ за типом гео-локаційного місцезнаходження учасників, активних споживачів, на співтовариства в міському середовищі, передмістя та приватному секторі. Такий поділ пояснюється різними характеристиками: споживання електроенергії, соціально-економічними відмінностями, щільністю забудови, наявністю приватних та/або колективних генеруючих систем з подальшою кооперацією та створенням VPP.

Сонячна фотоелектрична енергія - це тип ВДЕ, який має найбільш прогресивний ріст та максимальну комерційну цінність в Україні, отже, виникає необхідність в більш детальному розгляді саме цього сегменту ОЕС України, виходячи з умови темпів росту, популяризації в Україні, вартості обладнання та комплектуючих [8].

Впровадження в енергетичну систему України PV систем і зміни економіко-споживчого мислення споживачів призвело до появи та функціонування таких моделей споживачів, окрім традиційного consumer, як prosumer та prosumage. Це є передумовою для зміни базової стратегії функціонування енергосистем і енергоринку, створення нових форматів взаємодії в рамках «споживач-енергопостачальна компанія», які описані в понятті віртуальна електростанція (VPP).

Однак на виробництво сонячної фотоелектричної енергії значно впливають екологічні та кліматичні фактори, що робить процес генерації мінливим та невизначеним, має великий вплив на планування та експлуатацію електромереж [1, 2].

Віртуальна електростанція (Virtual Power Plant (VPP)) широко вивчається для вирішення проблем з підключенням до розподілених мереж відновлюваної енергії. VPP може розглядатися як система управління координацією енергоресурсів, яка поєднує та оптимізує систему накопичення енергії (ESS), кероване навантаження, електромобіль та інші розподілені енергоресурси (DER) на основі передових інформаційно-комунікаційних технологій. Він виступає як спеціальна установка, яка бере участь у ринку електроенергії та експлуатації енергомереж, допомагає реалізувати підключення до мережі та покращує здатність енергоспоживання відновлюваної енергії. VPP - це високоефективна система підвищення енергоефективності та сприяння розвитку відновлюваної енергії.

Лібералізація ринку електроенергії – це перш за все політичний та регуляторний процес, який створює конкуренцію замість монополії у енергетиці. Головна мета лібералізації – підвищення ефективності на ринку е/е через конкуренцію. Краща ефективність призводить до зниження витрат і цін, що підвищує конкурентоспроможність учасників ринку.

Ринок електричної енергії був лібералізований у всіх країнах ЄС, крім Болгарії та Мальти. За досвідом країн ЄС, лібералізація ринку відбувається протягом 5–10 років. В Україні пройшло лише два роки з дати прийняття закону «Про ринок електричної енергії» до впровадження реформ для лібералізації ринку. Незважаючи на те що в країнах ЄС лібералізація вже завершилась, досі існують певні технічні чи політичні бар'єри для впровадження єдиного ринку, що призводять до регіонального поділу.

Одна з особливостей електроенергії полягає в тому, що вона не є розповсюдженим предметом міжнародної торгівлі на відміну від нафти та природного газу. У 2015 році з усього валового виробництва електроенергії у світі лише біля 3% було експортовано через національні кордони. При цьому із цих 3% більша частина експорту – 58% – припадає на країни Європи та 9% – на експорт з Канади до США. Однак створенню єдиного ринку електричної енергії країн ЄС та експорту передували певні реформи та суттєві регуляторні зміни у країнах ЄС [9].

Зокрема, лібералізації ринків електричної енергії передували наступні реформи, показані на рисунку 4:



Рисунок 4– структурна схема енергетичного VPP ринку

Для поступової лібералізації були прийняті наступні директиви, показані на рис 5:

**Перший енергопакет** – Директива 96/92/ЄС стосовно спільних правил для внутрішнього ринку електроенергії.

Ця директива створила передумови для лібералізації ринку електричної енергії ЄС шляхом надання переваги конкуренції та вільній торгівлі.

**Другий енергопакет** – Директива 2003/54/ЄС стосовно спільних правил для внутрішнього ринку електроенергії, яка скасовує Директиву 96/92/ЄС.

Прийняття цієї директиви було спрямоване на забезпечення постачання електроенергії всім споживачам, стимулювання конкуренції та створення незалежного регулюючого органу.

**Третій енергопакет** – Директива 2009/72/ЄС щодо загальних правил для внутрішнього ринку електроенергії.

Ця директива була зосереджена на питаннях, пов'язаних із поліпшенням функціонування внутрішнього ринку електроенергії, посиленням повноважень та незалежності національних регуляторів, заходах щодо посилення безпеки постачання.

Закон України «Про ринок електричної енергії» спрямований на імплементацію актів законодавства Енергетичного співтовариства у сфері енергетики, а саме директиви Третього енергопакету.

**Четвертий енергопакет** «Чиста енергія для всіх європейців» лише починає впроваджуватися в країнах ЄС та ще не застосовується до реформування ринку електроенергії України. При цьому одним із завдань четвертого енергопакету є створення сучасного дизайну для європейського енергоринку,

адаптованого до нових реалій – більш гнучкого та пристосованого для інтеграції більшої частки відновлюваних джерел енергії.



Рисунок 5 – Етапи лібералізації ринку електричної енергії ЄС

Основна мета лібералізованих ринків електроенергії - гарантувати безпеку загальної системи, підвищити ефективність роботи та знизити вартість електроенергії за рахунок конкуренції.

Успіх ринку електроенергії, не залежить лише від адекватної регуляторної політики, а й від прибутковості суб'єктів-учасниць. Електричні ринки - це конкурентоспроможне та динамічне середовище, де різні члени грають різноманітну роль, приймаючи рішення, які можуть кардинально змінити результат ринку. Зі збільшенням відновлюваних джерел енергії та необхідністю їх впровадження на ринок електричної енергії створюється все більш нестабільна система, яка потребує інноваційних інструментів підтримки для пом'якшення цієї спорадичної поведінки.

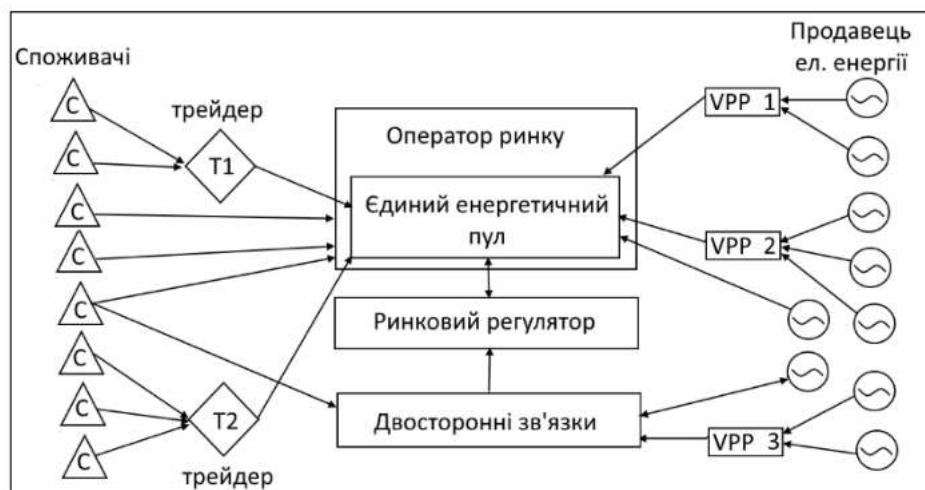


Рисунок 5 – структурна схема енергетичного VPP ринку електричної енергії

Ігрові поля повинні бути вирівняні для того, щоб включити ці новітні технології, через державне регулювання, приватні та державні інвестиції, місцеву участь та наукові дослідження і розвиток. Мультиагентна система керування енергетичним ринком (МАСКЕР) забезпечує зв'язок між академічним, державним та приватним сектором, створюючи технічну та організаційну основу, яка дозволяє торгівлі електричною енергією з розподіленого покоління бути конкурентоспроможною на енергетичних ринках, маючи змогу моделювати чотири типи ринків: форвардні ринки, Ринки пулу, двосторонні контракти та гібридні ринки. МАСКЕР - багатоагентний симулятор конкурентних ринків електроенергії [3, 4]; це імітаційний інструмент підтримки прийняття рішень, призначений для аналізу та експерименту з різними ринковими моделями, пов'язаними з ринком, що випереджає день, та 24-ти періодами торгівлі. Програма

використовує мультиагентну архітектуру, яка визначає суб'єктів, які братимуть участь у купівлі та продажу електроенергії, та включає різні стратегії для кращого моделювання поведінки покупців та продавців під час участі в структурі ринку електричної енергії. Багатоагентська модель МАСКЕР є потужним інструментом для розуміння поведінки агентів (покупців, продавців, гравців ринку, торговців та операторів) з використанням динамічних стратегій та аналізу сценаріїв, заснованих на математичних моделях, таких як теорія ігор, машинне навчання та оптимізація методи моделювання ринкових агентів та надання їм підтримки прийняття рішень, що набирають конкурентну перевагу. МАСКЕР зосереджується на переговорних стратегіях купівлі та продажу електричної енергії для того, щоб:

-забезпечити засоби для отримання відчутних результатів та прийняття обґрунтованих рішень, тим самим отримуючи конкурентні переваги. Цю перевагу отримують, вивчаючи кілька механізмів переговорів, що знаходяться на ринках електроенергії, що випереджаються, надаючи інструмент підтримки прийняття рішень та допомагаючи VPP вдосконалити свої стратегії боротьби з ринком [8]. Модель МАСКЕР забезпечує базу для VPP, щоб використовувати стратегії, що дозволяють агрегації розподілених генераційних установок отримати технічні та економічні переваги, отримані від комбінованих

-використання різних технологій виробництва, що перевершує недоліки таких технологій та надає користувачам динамічні стратегії, які можуть бути спеціально адаптовані до бажаних характеристик агента. Структура МАСКЕР дозволяє користувачеві відтворити та проаналізувати ринок у контрольованому

-навоколишнє середовище, використовуючи кілька методів штучного інтелекту та обміну даними, щоб показати, як ринок поводить себе та розвивається, і чітко показуючи, які дії потрібно вжити, адаптуючись до зміни ринкового середовища. Завдяки включенню VPP в програмне забезпечення, МАСКЕР може вивчати ефекти управління коаліцією, ефективно та оптимізувати загальну сукупну потужність, керуючи внутрішніми питаннями (наприклад, оплата праці, управління резервами, виробничі витрати тощо) між компанією та генераторами та аналізує вплив кожного конкретного генератора на роботу VPP. Інтеграція відновлюваних джерел енергії та постійні зміни урядової політики на латині.

МАСКЕР - ідеальний інструмент для моделювання бажаної структури для розуміння того, як працює ринок електроенергії, і чудовий інструмент для навчання, оскільки він включає симетричні ринки пулу, змішані ринки (як симетричні, так і асиметричні) та двосторонні контракти.

Реалізація процесу врегулювання небалансів або організації комерційного обліку, які є ключовими для належного функціонування оптового ринку, затягується. Відсутність конкуренції між виробниками електроенергії є ще більш серйозною перешкодою для досягнення ліквідного та здорового функціонування оптового ринку. На ринку є кілька великих виробників (в основному державні теплові електростанції та електростанції, що належать ДТЕК), і можливості для транскордонної торгівлі обмежені. Лише відносно невелика частина України (Бурштинський енергоострів) пов'язана з енергоринками ЄС. Лінії електропередачі з Росією та Білоруссю не використовуються для торгівельних цілей, і можливе ринкове сполучення з Молдовою матиме відносно обмежений вплив на ліквідність українського ринку і не зруйнує нинішню олігополістичну структуру. Швидка фізична інтеграція із ENTSO-E та подальша лібералізація експорту та імпорту електроенергії (валові обсяги яких наразі підлягають попередньому затвердженню з боку уряду) мають потенціал для значного збільшення ліквідності українського ринку електроенергії.

Однак у 2018 році було зроблено багато для того, щоб реалізувати концепцію роздрібного ринку електроенергії. Зокрема, український регулятор (НКРЕКП) розробив і прийняв всі необхідні підзаконні акти в рекордно короткі терміни. Ці досягнення вражають ще більше, адже перша половина 2018 року була відзначена втратою кворуму, необхідного для прийняття рішень, й інституція була паралізована. У березні 2018 року були прийняті Правила ринку, Правила роздрібного ринку, Кодекс розподільних систем та Кодекс комерційного обліку. Як наслідок, було встановлено структуру контрактних відносин між учасниками ринку та іншими ключовими процесами, такими як правила зміни постачальника, процедури вирішення спорів або обліку. На початку осені 2018 року НКРЕКП прийняла тарифи для операторів систем розподілу (ОСР), постачальника універсальної послуги, та постачальника «останньої надії». Створення тарифної методології та передбачуваної структури тарифів для кожного з цих учасників ринку є передумовою для відокремлення (unbundling) та ліквідації перехресного субсидіювання. Постачальники універсальних послуг повинні мати можливість функціонувати незалежно від ОСР в межах однієї структури власності; ОСР повинні отримувати достатньо коштів для фінансування технічного обслуговування та розвитку мереж. До кінця року НКРЕКП схвалила контракти між ДП «Енергоринок», постачальниками універсальних послуг та постачальником «останньої надії». В останні дні 2018 року, уряд вирішив призначити державну компанію «Укрінтеренерго» (відповідальна за імпорт / експорт електроенергії) постачальником «останньої надії» на всій території України до січня 2021-го року.

Дані кроки вимагали значних зусиль, і деякі аспекти залишаються спірними та/або невирішеними. Наприклад, дата переходу на стимулююче регулювання для ОСР (регульована база активів як основа для розрахунку тарифів) була відкладена. Модель компенсації для постачальників універсальних послуг для



пом'якшення наслідків можливої нестабільності оптового ринку після липня 2019 року далека від чіткої. Ситуація із захищеними споживачами та питання щодо належного балансу між платіжною дисципліною та захистом від переривань поставок (наприклад, з водоканалами) залишаються невирішеними. Необхідно запровадити ефективну систему підтримки вразливих споживачів, які мають труднощі з оплатою комунальних послуг. Водночас, як було зазначено, НЕК «Укренерго» не досягла значного прогресу у створенні ІТ-системи для централізованого врегулювання небалансів, і на даний час уряд не обрав банк, який буде забезпечувати фінансові гарантії та кліринг. Важко оцінити готовність учасників ринку до нової моделі (хоча, виходячи з опитувань, проведених проектним офісом протягом 2018 року, можна було відзначити певний прогрес). Деякі учасники ринку (наприклад, «Енергоатом») зробили конкретні кроки і, наприклад, вже придбали ІТ-системи, які дозволяють їм купувати та продавати електроенергію через ринок двосторонніх договорів, ринку «на добу вперед» ат внутрішньодобовому ринку. Інші все ще борються з адаптацією відповідної стратегії і можуть відставати від закупівель ІТ-систем та реалізації інших організаційних заходів (створення центрів клієнтської підтримки, ефективних систем білінгу, тощо). Проте є досвідчені компанії, які вже працюють в Україні і здатні запропонувати готові рішення для учасників ринку. Деякі компанії, у тому числі зі Словаччини, допомагають «Укренерго» та іншим учасникам українського ринку.

Незважаючи на всі ці недоліки та неминучі виклики, є підстави того, що Україна ціленаправлено виконує програму з лібералізації своїх енергетичних ринків.

За винятком країн Балтики та Грузії, Україна є єдиною державою пострадянського простору, яка іде новим шляхом, реформування енергоринку на шлугу до програми з лібералізації. Очевидно, щоб роздрібні та оптові ринки електроенергії стабілізувалися, знадобиться деякий час, але наприкінці шляху лежить винагорода за більш конкурентний і безпечний ринок електроенергії з перспективою приєднання до загальноєвропейського ринку електроенергії на рівних умовах, на користь українського споживача.

#### **Висновки:**

Україна зробила великий технічні, економічні та політичні кроки до лібералізації роздрібного ринку електроенергії, відповідно до стандартів ЄС. В роботі розглянуто фактори, що впливають на реалізацію умов лібералізації енергоринку. Реалізація процесу врегулювання небалансів або організації комерційного обліку, які є ключовими для належного функціонування оптового ринку, затягуються. Відсутність конкуренції між виробниками електроенергії. На ринку є кілька великих виробників (в основному державні теплові електростанції та електростанції, що належать ДТЕК), і можливості для транскордонної торгівлі обмежені. Наведено застереження, які можуть впливати на реалізації процесу лібералізації енергоринку України. Представлено етапи реформування енергоринку та наслідки.

Надано оцінку етапам, передумовам, критеріям та можливим наслідкам в реалізації і роботі лібералізованих енергоринків. Описано основні фактори, що впливають на реалізацію умов лібералізації енергоринку. Для активних поживачів, які є основним елементом переходу та становлення лібералізованого енергоринку визначено негативні наслідки і переваги в процесі формування свідомого і активного енергетичного суспільства.

#### **Список використаної літератури**

1. National Energy and Utilities Regulatory Commission: " On the status of the renewable energy sector in 2019" Available: <http://www.nerc.gov.ua>. Accessed on: 02.01.2020.
2. Постанова «Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію для приватних домогосподарств» – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1022-16>
3. Проект Закону про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://portal.rada.gov.ua>
4. Закон України про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://portal.rada.gov.ua>
5. The International Renewable Energy Agency (IRENA) – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.irena.org/>
6. Ukraine on the way to liberalization of the electricity market. Available: <https://ua-energy.org/>
7. Застереження, які можуть впливати на реалізації процесу лібералізації енергоринку України – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.amc.gov.ua>
8. Zajc, M., Kolenc, M., & Suljanović, N. (2019). Virtual power plant communication system architecture. Smart Power Distribution Systems, 231–250. doi:10.1016/b978-0-12-812154-2.00011-0
9. Україна лібералізує свій ринок електроенергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mind.ua/>

P. Sokolovskyi., PhD student, ORCID 0000-0002-0113-4479  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

## THE VIRTUAL POWER PLAN INTERACTION AND ACTIVE CONSUMERS ANALYSIS, IN THE FRAMEWORK OF THE HIERARCHICAL SYSTEM WITH THE LIBERALIZED LIMITATIONS

*Ukraine's energy development is under review in the regime of reform and legislative forces. The path to energy liberalization will not be a new process in the development of the EU and US energy sectors, but it will not be fully implemented in Ukraine. The liberal energy main features are the guarantee of a secure overall system, efficient operation and electricity vacancies use for competitors. The success of the electricity market, not using adequate regulatory policies, and the participating entity's profitability. Offered by virtual power plants and concepts of energy collaboration - a global trend that is actively promoted and implemented in their regions. It can actually be used for the domestic development of the energy sector. As a result, the state and main stages of reforming the Ukrainian energy market are analyzed. The stages, transitional, criterion and possible conservation in enterprises and liberalized energy markets are evaluated. The main factors that should make the implementation of energy market liberalization are described. For the active consumers, who are the main element of the transition and placement of the larger-scale libero, the energy market remains negative, experiencing and experiencing a conscious and active energy value in the world.*

**Key words:** Renewable Energy, Virtual Power Plant (VPP), Liberalization, Energy Market, Energy Smart Community (ESC), Smart City, Smart Grid, Photovoltaic (PV), Renewable Energy (RES), Distribution, Solar power generation, distributed generation, energy storage system (ESS).

### References

1. National Energy and Utilities Regulatory Commission: " On the status of the renewable energy sector in 2019" Available: <http://www.nerc.gov.ua>. Accessed on: 02.01.2020.
2. Resolution "On the establishment of green" tariffs for electric energy for private households" Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1022-16>. Accessed on 10.01.2020.
3. Draft Law on Amendments to Certain Laws of Ukraine on Ensuring Competitive Conditions for Generation of Electricity from Alternative Energy Sources Available: <https://portal.rada.gov.ua> .Accessed on 14.01.2020.
4. Law of Ukraine on Amendments to Certain Laws of Ukraine on Ensuring Competitive Conditions for Generation of Electricity from Alternative Energy Sources Available: <https://portal.rada.gov.ua> Accessed on 16.01.2020.
5. The International Renewable Energy Agency (IRENA) Available: <https://www.irena.org/> Accessed on 12.12.2019.
6. Ukraine on the way to liberalization of the electricity market. Available: <https://ua-energy.org/>
7. Reservations that may affect the implementation of the process of liberalization of the Ukrainian energy market Available: <http://www.amc.gov.ua> Accessed on 17.01.2020.
8. Zajc, M., Kolenc, M., & Suljanović, N. (2019). Virtual power plant communication system architecture. Smart Power Distribution Systems, 231–250. doi:10.1016/b978-0-12-812154-2.00011-0
9. Ukraine is liberalizing its electricity market Available: <https://mind.ua/> Accessed on 16.01.2020.

Надійшла 27.10.2019  
Received 27.10.2019



# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 621.311

Г.В. Мельничук, магістр промислової електроніки, ORCID 0000-0002-8173-0472  
Міністерство розвитку громад та територій України

## ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ ТА ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯМ

**Реферат.** Метою дослідження є визначення тенденцій розвитку електромереж населених пунктів та оптимальних підходів до їх аналізу та розрахунків в умовах впровадження технологічних інновацій у сфері інформаційних та енергетичних технологій, а також децентралізації населених пунктів. У статті здійснено огляд сучасних підходів та технічних рішень, деталізовано питання формування «розумної мережі» SmartGrid шляхом поєднання запровадження інтелектуальних підходів та інтегрованих систем генерації електроенергії, її споживання та зберігання. Серед важливих аспектів формування SmartGrid у населених пунктах зазначена необхідність розвитку систем керування комунальними системами в межах окремих будинків та комплексів установ, а також формування інтегрованої транспортної системи, що включає в себе як громадський транспорт, так і індивідуальні транспортні засоби різних типів і форм власності. Загалом поєднання зусиль органів місцевого самоврядування, комерційних та некомерційних установ, домовласників та місцевих мешканців визначається як важлива передумова успішного формування SmartGrid у населених пунктах. Результатом роботи є визначення сучасних тенденцій розвитку систем електроживлення населених пунктів, зокрема, необхідність формування проміжної ланки енергетичної політики – на рівні населених пунктів та територій, що поєднують локальних учасників енергоринку (системи генерації, зберігання та споживання електроенергії) та виступають інтегрованими активними учасниками загальнонаціональної єдиної енергосистеми країни та національного енергоринку. Також наведено обґрунтування актуальності використання методів розрахунків систем електроживлення, зокрема, розширення методу окремих складових на основі перетворень Лапласа та операторних обчислень, які дозволяють отримати енергетичні характеристики і параметри електроенергії у аналітичному вигляді для використання у інтелектуальних системах керування електроживленням. У підсумку наведено дослідження підтверджує твердження про необхідність подальшого вдосконалення концепції SmartGrid шляхом інтеграції елементів енергетичних систем, інтелектуалізації процесів керування та розвитку нових підходів децентралізації енергоринку.

**Ключові слова:** SmartGrid, електропостачання, електричні мережі, енергоменеджмент, населені пункти, децентралізація, електротранспорт.

### 1. Проблематика розвитку систем електропостачання населених пунктів

Історично розвиток електропостачання розпочався саме з населених пунктів, де створювалися локальні енергосистеми для місцевого освітлення, електротранспорту (трамваїв та метрополітену), а також промисловості. Завдяки швидкому зростанню попиту будівництво невеликих міських електростанцій стає прибутковим видом інвестицій, при цьому вугільні електростанції будуються серед міських кварталів, стаючи чинником забруднення повітря в містах.

Індустріальний бум початку-середини ХХ століття спричинив потребу в більш потужних джерелах електроенергії: будуються великі електростанції, зокрема потужні ГЕС, локальні міські електромережі поступово поєднуються, і наразі єдина енергосистема України входить до Єдиної електроенергетичної системи, яка об'єднує пострадянський простір і інтегрована з енергосистемами Східної і Центральної Європи. Однак в умовах постіндустріальної економіки, зростання рівня життя населення та зміни технологій, зокрема, в побуті, електропостачання стикнулося з низкою нових викликів.

*1.1. Зростання частки побутового споживання.* Водночас наприкінці ХХ століття та з початком ХХІ століття почала суттєво змінюватися структура споживання електроенергії. Одночасно зі скороченням

© Г.В. Мельничук, 2019

споживання електроенергії промисловістю відбулося стрімке зростання споживання домогосподарствами. Якщо частка споживання електроенергії у 2002 році вона складала лише майже 19% (і 2,7% – комунально-побутові споживачі, то, у 2011 році – вже 25,5% (38,5 млрд кВт·год) [9].

За 12 місяців 2019 року, згідно з офіційними даними щодо розподілу споживачів електроенергії, споживання населенням складає близько 30% (і ще додатково майже 13% – комунально-побутові споживачі) [10]. Для порівняння: у 2017 році споживання електроенергії домогосподарствами у Євросоюзі склало 27% кінцевого споживання, тобто наразі частка споживання електроенергії населенням наближається до показників розвинених країн [17].

Така тенденція зумовлена значним зростанням використання електроенергії в побуті, зокрема для опалення, підігріву води, через збільшення кількості побутової техніки – внаслідок зростання добробуту домогосподарств. І цілком можливим є подальше зростання абсолютних показників споживання електроенергії населенням – наприклад, за рахунок все більшого використання індивідуального електричного обладнання та поширення кухонних електроплит замість газових плит. Цьому сприяє і нормативна політика та тенденції у будівництві: згідно ДБН, у будинках висотністю понад 9 поверхів заборонено використання газу у квартирах, можливі лише електроплити.

Так, у 2018 році, за даними Національної комісії з регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), споживання енергії домогосподарствами України склало в середньому 164 кВт/год, тоді як в країнах Євросоюзу – 304 кВт/год. При цьому український показник знаходиться на рівні Польщі (168 кВт/год), вищий за румунський (140 кВт/год), але помітно нижчий, ніж в Угорщині (227 кВт/год) та Словаччині (219 кВт/год) [4].

*1.2. Збільшення пікового споживання домогосподарствами.* Особливість енергоспоживання населенням, на відміну від промисловості, – досить стрімкі піки споживання. Для прикладу, наведено середній цілодобовий профіль використання електроенергії за результатами досліджень 250 британських домогосподарств у 2012 році [21].

В умовах України при оцінці ступеня впливу споживання домогосподарствами та формування пікових навантажень варто згадати і про регіональний розподіл виробничих потужностей, що є найбільшими споживачами електроенергії. Так, серед галузей промисловості України найбільш енергомісткою була й залишається металургійна промисловість – 23,9% у загальній структурі за 12 місяців 2019 року.

Однак враховуючи, що в більшості регіонів підприємств цієї галузі взагалі не представлено, можна говорити про те, що у багатьох містах та навіть окремих регіонах частка домогосподарств у споживанні може сягати 50% і більше. Що, відповідно, підвищує актуальність проблеми пікових навантажень.

*1.3. Поява і збільшення частки критичних споживачів.* Розвиток технологій зумовив і появу споживачів, що відносяться до об'єктів критичної інфраструктури та від надійності енергопостачання яких залежить не лише забезпечення інших комунальних послуг, окрім освітлення та роботи побутових приладів, а й безпека та життя людей.

Так, в умовах сучасного великого міста до категорії критичних споживачів відносяться медичні заклади (обладнання підтримання життєдіяльності, безперебійна робота обладнання операційних), об'єкти транспортної інфраструктури (світлофорні об'єкти, метрополітен), зв'язку (базові станції мобільного зв'язку), системи громадської безпеки (відеоспостереження, сигналізації), і чим більше і щільніше місто – тим більше таких споживачів.

Разом з тим, не варто недооцінювати проблему стійкості і в умовах окремого будинку чи невеликого населеного пункту. Від електроенергії залежить робота життєво важливих приладів та систем – опалення, водопостачання, зв'язку, сигналізації. Навіть газові індивідуальні опалювальні котли наразі потребують електроенергії для роботи системи керування та аварійного захисту [22].

Як наслідок, останніми роками все частіше за мету розвитку систем електропостачання ставиться підвищення «стійкості» енергетичних інфраструктур до впливу як поточних, періодичних впливів пікових навантажень, так і малоймовірних подій зі значними впливами, таких як екстремальні погодні явища, техногенні аварії, терористичні акти та диверсії, інші зовнішні впливи.

За визначенням поняття «стійкість» (від латинського слова «resilio», яке буквально означає здатність об'єкта чи системи повернутися до свого первісного стану після навантаження), запровадженого у 1973 р. С.С.Холлінгом, воно визначає стійкість взаємозв'язків всередині системи і є мірою здатності цих систем поглинати зміни змінних стану, рушійних змінних та параметрів і зберігати працездатність.

## **2. Технологічні новації: можливості та нові виклики для систем енергопостачання**

Питання піків споживання наразі є одним з ключових для Єдиної електроенергетичної системи, що вирішується як використанням маневрових потужностей теплоелектростанцій (атомні станції працюють у стабільному режимі, теплові ж можуть швидко змінювати режим роботи), так і шляхом збереження енергії за допомогою гідроакумуляуючих електростанцій (ГАЕС) у непікові години і повернення у мережу під час найбільших навантажень.

Останні працюють як гравітаційний акумулятор, схожий на водонапірну вежу: у непікові години електронасоси використовують надлишкову енергію, аби закачати воду у верхній резервуар, у пікові години вода тече вниз, обертаючи турбіни генераторів. Також як маневрові потужності електрогенерації використовують теплові електростанції – на відміну від атомних, вони здатні швидко змінювати режим роботи протягом доби.

Втім, наразі ключові рішення у вирішенні проблем згладжування пікових навантажень, а також стійкості до зовнішніх впливів та енергоефективності у секторі побутового енергоспоживання знаходяться переважно на рівні кінцевих споживачів – власне, домогосподарств. Це стосується як керування споживання, так і застосування резервних джерел електропостачання, а віднедавна – навіть генерації та зберігання електроенергії. Однак нові можливості приносять і нові виклики.

*2.1. Керування споживанням.* Ще у 1980-х провідні енергокомпанії світу почали запроваджувати так звані «інтелектуальні лічильники», які постійно передавали дані в енергокомпанії. Це – моніторинг, а наступний рівень – управління споживанням, і найвідоміший спосіб – різні тарифи за часом, коли вночі електроенергія дешевше. Лічильники з такою функцією наразі називають багатозонними або багатотарифними, і для них не обов'язковим є наявність постійного зв'язку з обліковим центром енергокомпанії. Найпростіші – двозонні, і саме відповідно до постанови НКРЕ від 23.04.2012 № 498 (зі змінами) енергопостачальні компанії надають знижку 50% тарифу з 23:00 до 07:00 [11].

Однак далеко не всіх споживачів можна спокусити перемикаючи електроприлади вночі, тому повноцінно «інтелектуальні лічильники» працюють у поєднанні з відповідним обладнанням у споживачів – наприклад, «розумні» розетки та системи, які включають і вимикають пристрої в залежності від часу, потреби, рівня навантаження. Наразі на ринку доступні різні типи подібних приладів: розетки з таймерами, обмежувачі напруги, аварійні джерела енергії, що підключаються у разі відключень основного мережевого електроживлення.

Поєднання таких приладів і управління єдиним контролером отримало назву «розумний будинок» (smart home, digital house) [20]. Така система складається з власне контролера, датчиків та актуаторів – виконавчих пристроїв (ті самі «розумні розетки», різноманітні вимикачі, клімат-контролери тощо). Технології безпроводного зв'язку, так звані «інтернет речей» дозволяють обійтися без проводів і забезпечити віддалене керування «розумним будинком».

Разом з тим у низці випадків робота систем «розумний будинок» може мати різні наслідки для загальної енергомережі. З одного боку, у разі орієнтації на енергозбереження з урахуванням «нічного» тарифу можна отримати згладжування провалів споживання вночі, з іншого – можливе збільшення споживання саме у пікові години, наприклад, коли електроопалення вимикається вдень за відсутності мешканців вдома і вмикається перед їх поверненням з роботи ввечері.

*2.2. Автономні джерела енергії.* Розвиток технологій «зеленої» енергетики та запровадження Україною стимулюючого високого «зеленого» тарифу на закупівлю електроенергії від сонячних та вітрових електростанцій (утричі вищий за традиційні електростанції) спричинило справжній бум у цій галузі. Потужність об'єктів відновлювальної енергетики в Україні за 2017 рік зросла на 30% до 290 МВт, за 2018 рік – на 66% до 849 МВт, а за три квартали 2019 року – утричі до 2,6 ГВт [7].

Однак такі позитивні показники отримали і зворотній ефект. У 2019 році оператор об'єднаної енергосистеми країни НЕК «Укренерго» заявив про брак резервів енергосистеми для підтримки її сталості, і одна з причин – великі об'єми виробництва сонячної та вітрової генерації і відсутність достатньої кількості високоманеврових потужностей [6]. На відміну від відносно прогнозованих піків споживання, сонячні та вітряні електростанції хоч і намагаються розміщувати у найбільш природно вдалих для цього місцях, однак фактична їх робота суттєво залежить від погоди. Як наслідок – до стрибків споживання додаються ще менші прогнозовані піки генерації.

Втім, це не привід відмовлятися від «зеленої» енергетики – питання лише в тому, хто більше зацікавлений у вдосконаленні електромереж для забезпечення стійкості енергосистеми. У світі «локомотивами» відновлювальної енергетики все більше стають міста – як невеликі (у США, наприклад, невеликі міста Аспен, Колорадо та Берлінгтон, Вермонт та інші вже працюють повністю на відновлюваних джерелах енергії), так і мегаполіси. Копенгаген ставить за мету з 2025 року використовувати виключно електроенергію, вироблену без спалювання викопного палива, Сан-Дієго, штат Каліфорнія, має на меті забезпечити 100% живлення відновлюваними джерелами до 2035 року, а канадський Ванкувер – до 2050 року [15].

*2.3. Розподілене збереження енергії.* Збалансувати споживання енергії на локальному рівні могли б накопичувачі енергії (energy storage) – однак, звісно, мова йде не про гідроакumuлюючі електростанції, як у об'єднаній енергосистемі. Поки такі технології є занадто дорогими і загальний обсяг таких «сховищ» у світі оцінюється у 9 ГВт. Однак за прогнозом Bloomberg New Energy Finance до 2040 року по всьому світу буде встановлено 1095 ГВт акумуляторів, а інвестиції в сферу зберігання енергії складуть \$ 622 млрд [26].

Наразі вже можна спостерігати здешевшення технологій збереження енергії. Таку 2010 році вартість зберігання 1 кВтг дорівнювала 1200 доларів США, а у 2019 році вона менше 200 доларів США і буде

знижуватися далі. Основні технології – електрохімічні акумулятори, механічні маховики, системи накопичення енергії на основі стисненого повітря, зберігання теплової енергії, використання гравітації, до останніх відносяться і ГЕС.

Втім, більшість з них наразі не отримали значного поширення, окрім ГЕС у промисловому масштабі. Втім, наразі виробники електромобілів та акумуляторів до них вже пропонують рішення для індивідуальних будинків – настінні акумулятори з програмним забезпеченням системи «розумний будинок», заряджаючись вночі за дешевшим тарифом [19]. Однак не варто недооцінювати і вплив самих електромобілів на електромережу – як негативний так і позитивний.

Справді, поки електромобілів було небагато, їх вплив на енергомережу був майже непомітний, однак поширення «швидких» зарядок з великим енергоспоживанням може призвести до перевантажень і аварійних відключень. Разом з тим, все більше нових моделей електромобілів можуть віддавати енергію в мережу, тобто бути мережевими акумуляторами. Наразі технологію Vehicle to Grid (V2G) тестують виробники електромобілів, і вона надає змогу власникам електромобілів заробляти на збереженні енергії (за оцінками фахівців компанії Nissan, навіть до 1300 євро на місяць).

Справді, в середньому приватний автомобіль використовується 4% часу, весь інший час він стоїть. Тож електромобілі з можливістю віддавати енергію в мережу за технологією Vehicle to Grid (V2G) можуть бути «міськими акумуляторами», приносячи дохід власникам, надаючи енергію на енергоринок міста під час пікових навантажень. Це, до речі, додатковий стимул у годину пік скористатися громадським транспортом, а не власним електромобілем, що знижує затори. Якщо вважати, що енергоспоживання відбувається там, де знаходиться людина, то таке рішення видається цілком перспективним. Щоправда, не варто забувати про ресурс акумуляторів – однак чим далі, тим вони витримують більше перезаряджень.

### **3. Енергетичний аналіз розподілених систем електроживлення**

Створення складних систем електропостачання з кількома джерелами живлення та споживачами різних типів потребує вирішення проблем електромагнітної сумісності елементів систем (усунення їх взаємного впливу), і, відповідно, використання оптимізаційних процедур та системних підходів для моделювання процесів у таких системах. Для узгодження параметрів електричної енергії джерел живлення (генераторів) та споживачів (навантажень) використовуються перетворювачі електричної енергії (ПЕЕ).

При оптимізації режимів і параметрів елементів систем з ПЕЕ виникає необхідність здійснення комплексу досліджень щодо адекватного моделювання електромагнітних процесів. Тому при їх аналізі в системах з ПЕЕ необхідно враховувати не лише ключові моделі вентилів, а й параметричні залежності елементів моделей навантаження, що зумовлює необхідність розрахунку електромагнітних процесів на інтервалі технологічного періоду, що перевищує періоди діючих генераторів та/чи періоди повторюваності комутацій ключових елементів.

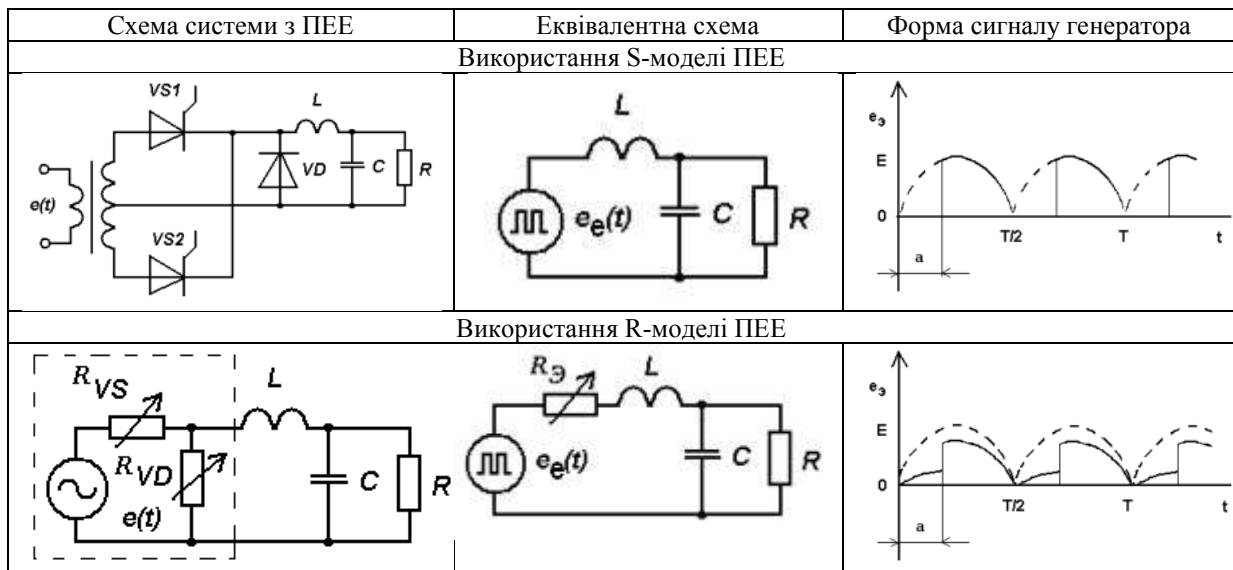
Трапляються випадки, коли необхідно забезпечити спеціальну форму напруги генератора, при цьому відбувається також циклічна зміна параметрів навантаження. Такий клас перетворювачів називається перетворювачами з циклічно змінюваними параметрами. Основним у виборі методів розрахунку таких перетворювачів є врахування співвідношень між періодами функції напруги генератора  $T_G$  та функції зміни параметрів навантаження  $T_H$ . Найпростішим є випадок співпадіння цих періодів, більш складними – коли один з періодів містить декілька інших, або існує найменше спільне кратне для періодів роботи генератора та навантаження, коли  $n_G T_G = n_H T_H = T_T$ , де  $T_T$  – період роботи системи,  $n_G, n_H$  – цілі числа.

Одним з найбільш перспективних методів розрахунку електричних кіл на основі перетворень Лапласа є метод окремих складових, який дозволяє отримати розв'язок рівнянь для знаходження значень струму в електричних колах при квазіусталених процесах у замкненій формі. Враховуючи дедалі більше поширення імпульсних перетворювачів та використання нестационарних навантажень, саме розрахунок квазіусталених процесів є однією з основних задач при їх розрахунку та аналізі. Нижче детально розглянуто використання методу окремих складових для розрахунку систем з ПЕЕ зі ступінчастими та синусоїдальними сигналами, а також з модуляцією параметрів сигналів.

*3.1. Моделювання еквівалентних генераторів та навантажень постійної та змінної структури.* Питання адекватного опису процесів у силових колах перетворювачів у разі використання кусочно-лінійних моделей елементів – одне з основних при побудові алгоритмів та програм автоматизованого розрахунку і проектування перетворювачів. У виборі моделей необхідно враховувати, що ефективність їх використання залежить від типу задачі, що розв'язується, та виду процесів, які досліджуються, в перетворювальних пристроях [5].

Вид схемної моделі ПЕЕ залежить від його структури та використаних моделей напівпровідникових вентилів. Коли у випадку використання нелінійних фізичних моделей вентилів схема перетворювача має незмінну структуру і містить нелінійні елементи, то при використанні ключових моделей вона може мати як постійну, так і змінну структуру та містити лінійні елементи з постійними чи змінними параметрами. У таблиці 1 наведено приклади використання S- та R-моделей для представлення ПЕЕ.

Таблиця 1



При цьому ПЕЕ основних простих класів – випрямлячі, автономні інвертори, широтно-імпульсні перетворювачі – при застосуванні простих ключових моделей вентилів можна представити у вигляді «еквівалентний генератор» – «навантаження». Виходячи з цих міркувань, оптимальними є методи та алгоритми розрахунку електромагнітних процесів у силових колах перетворювачів, орієнтовані на використання лінійних чи кусочно-лінійних моделей пасивних елементів і ключових моделей силових напівпровідникових пристроїв (діодів, транзисторів, тиристорів тощо) і призначені для розрахунку процесів в перетворювачах із змінною структурою. Аналогічним чином може бути здійснене моделювання складних функцій сигналів еквівалентних генераторів з функціями модуляції (широтно-імпульсна, частотно-імпульсна, фазо-імпульсна модуляції).

3.2. *Моделювання періодичних процесів та завдань у системах з ПЕЕ.* Загальний підхід до розрахунків систем з ПЕЕ методом окремих складових з використанням перетворення Лапласа полягає у побудові моделі «генератор» – «перетворювач» – «навантаження» (система {Г}–{ПЕЕ}–{Н}), де періоди роботи елементів множин генераторів {Г}, власне перетворювачів {ПЕЕ} та навантажень {Н} дорівнюють відповідно  $T_G$ ,  $T_{Pr}$  та  $T_n$ . В подальшому така модель спрощується до системи «еквівалентний генератор» – «еквівалентне навантаження» {екв.Г}–{екв.Н}, відповідно до побудованих моделей [2].

Таблиця 2

Тип	Назва	Базова функція $f_{B,i}(t)$	Зображення $F_{B,i}(t)$
1	Функція рівня	$f_{B,1}(t) = A$	$F_{B,1}(t) = \frac{A}{p}$
2	Синусоїдальна функція	$f_{B,2}(t) = \sin \omega t$	$F_{B,2}(t) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$
3	Експоненційна функція	$f_{B,3}(t) = e^{-\alpha t}$	$F_{B,3}(t) = \frac{1}{p + \alpha}$
4	Функція прямої пропорційності	$f_{B,4}(t) = At$	$F_{B,4}(t) = \frac{A}{p^2}$

Вихідні напруги генератора  $u_G(t)$  та навантаження  $u_H(t)$  на періоді роботи системи з ПЕЕ  $T_T$  у загальному випадку розглядаються як промодульовані відповідною функцією модуляції  $f_{Г,М}(t, П_{Г,М}, \omega_{Г,М})$  та  $f_{Н,М}(t, П_{Н,М}, \omega_{Н,М})$ , де  $\omega_{Г,М}$  та  $\omega_{Н,М}$  – частота модуляції для генератора та навантаження;  $П_{Г,М}$  та  $П_{Н,М}$  – множина параметрів модуляції для генератора та навантаження. Функції модуляції  $f_{Г,М}(t, П_{Г,М}, \omega_{Г,М})$  і  $f_{Н,М}(t, П_{Н,М}, \omega_{Н,М})$  можуть бути як заздалегідь відомі, так і задаватися в реальному масштабі часу системою управління чи визначатися характером протікання енерготехнологічних чи/та технологічних процесів, що детально розглянуто у [3].

Наступним етапом є побудова зображень функції сигналу еквівалентного генератора  $F_{Г}(p)$  функції сигналу  $u(t)$ . Наприклад, для випадку прямокутних імпульсів амплітудою  $U_i$  така функція має вигляд:

$$F_{II}(p) = \frac{1}{p} \frac{(1 - e^{-pT})}{(1 - e^{-pT_n})} \sum_{i=1}^n U_i e^{-(i-1)pT} \quad (1)$$

У таблиці 2 наведено зображення для різних типів простих функцій, що дозволяють змоделювати практично будь-який сигнал еквівалентного генератора.

Зображення струмів на інтервалах знаходиться відповідно до закону Ома, що діє і в області зображень, розраховується за формулою:

$$I_i(p) = U_i / Z_i, \quad (2)$$

відповідно, попередньо визначається зображення навантаження, яке на різних інтервалах може мати різні значення.

Оригінал струму на інтервалі знаходиться як різниця перехідного  $i_{P,i}(t)$  (що є результатом роботи генератора на інтервалі, який розраховується) та вільного (що є результатом роботи генераторів на всіх інших інтервалах, крім того, який розраховується)  $i_{V,i}(t)$  струмів за формулою:

$$i_i(t) = i_{P,i}(t) - i_{V,i}(t). \quad (3)$$

При визначенні перехідного струму враховуються складові функції генератора, що діють лише на інтервалі, що розраховується, в свою чергу при розрахунку вільного струму використовуються лише корені, що визначаються навантаженням.

**3.3. Можливості розрахунків характеристик роботи систем з ПЕЕ.** Аналітичний вигляд функцій напруги та струму дозволяє здійснити розрахунки у аналітичному вигляді характеристик електричної енергії. Відповідно до ДСТУ якості електроенергії, основними є діючий та середній струми, амплітудні максимуми та мінімуми, коефіцієнти форми, пульсацій за амплітудним значенням, пульсацій за діючим значенням, пульсацій за середнім значенням, амплітуди. При гармонічному аналізі функцію досліджують також коефіцієнти гармонік, амплітуди гармонік тощо. Отримання функцій струмів на інтервалах у аналітичному вигляді дає змогу здійснити точні розрахунки цих коефіцієнтів та уникнути застосування чисельних методів з похибками [14].

Наприклад, розрахунок середнього струму здійснюється за формулою:

$$i_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (4)$$

а розрахунок діючого струму – за формулою:

$$i_A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad (5)$$

де вигляд функцій струмів отримано з розрахунків за методом окремих складових.

Також однією з ключових проблем роботи систем роззосередженої генерації з ПЕЕ є стабільна робота системи під дією імпульсних періодичних завад, адже при роботі системи електроживлення використовуються різноманітні перетворювачі електроенергії, які є джерелом завад в мережі.

Одним з найбільш оптимальних шляхів розв'язання подібних задач у моделях «генератор» – «навантаження» (здійснення інженерних розрахунків при проектуванні, вибір оптимальних параметрів елементів систем з перетворювачами електроенергії, оптимізація процедур у системах керування, кількісний та якісний аналіз вихідних характеристик та проведення енергоаудиту систем з перетворювачами електроенергії тощо) є розширення використання аналізу на основі методу окремих складових, який дозволяє отримати функції струму та напруги у аналітичному вигляді.

Такі розрахунки дозволяють не лише визначати аналітичний розклад сигналів струму навантаження у гармонічний спектр, аналітичні вирази активної потужності  $P$ , реактивної потужності  $Q$ , потужності Фризе  $Q_{\Phi}$ , а також створює можливості для здійснення параметричного аналізу роботи системи з ПЕЕ при зміні початкових параметрів генератора та навантаження, зміні закону керування тощо. І, окрім того, дозволяє здійснити розрахунки параметрів та режимів роботи компенсатора реактивної потужності ( $C_k$ ).

#### **4. Інтелектуальні системи керування системами енергоживлення.**

Ключовим питанням для розуміння моделей споживання енергії у локальних енергосистемах населених пунктів і належних відповідей на виклики, пов'язані із стабільністю їх роботи та енергетичною безпекою необхідно є здійснення відповідного збору та аналізу даних і впровадження сучасних підходів до вдосконалення локальних енергосистем [24].

Наразі ці питання переважно відносяться до елементів загальної концепції «Розумного міста», одним з напрямків якої є управління генерацією та споживанням електроенергії – Smart Grid («розумні» мережі), що передбачає використання цифрових технологій для ефективного розподілу і споживання енергії [1].

*4.1. Підходи SmartGrid та MicroGrid у загальній концепції «Розумне місто».* Система «SmartGrid» або «MicroGrid», коли мова йде про більш локальний рівень з невеликою кількістю учасників і вищою автономізацією, є проміжним рівнем між сукупністю всіх кінцевих виробників, споживачів та зберігачів енергії та загальною Єдиною енергетичною системою на рівні країни та міждержавного регіону [8].

Місією таких систем є оптимізація енергопостачання на певному рівні спільноти – віддаленого поселення, промислового комплексу, мікрорайону, населеного пункту, регіону. Відповідно, і складність таких систем є досить різною – загалом спільного підходу: керування генерацією, збереженням та споживанням електроенергії на основі потоків даних у реальному часі, математичного прогнозування, забезпечення необхідних параметрів електроенергії та максимально стійкої роботи систем критичної інфраструктури [13].

Для прикладу, під MicroGrid можна розуміти мережу поєднаних між собою у мережу «розумних будинків», що є не лише споживачами електроенергії, а й мають власні альтернативні джерела генерації електроенергії (сонячні батареї, вітряки, дизель-генератори), а часом і системи збереження енергії. Сучасні можливості інформаційних технологій забезпечують якісно новий рівень управління такою локальною енергосистемою, що разом з тим залишається відкритою – тобто має підключення до Єдиної енергосистеми країни, як для споживання, так і для генерації електроенергії [16].

*4.2. Досвід та тенденції запровадження SmartGrid у сучасних містах.* Наразі ключовими ініціаторами запровадження підходів SmartGrid є великі міста – з одного боку, через значні коливання споживання, наявність великої кількості об'єктів критичної інфраструктури, з іншого – через потребу динамічного розвитку, технічні можливості для якого не завжди здатні забезпечити енергопостачальні компанії або ж такі заходи за традиційними технологіями є занадто витратними. Разом з тим муніципалітети виступають і як інвестори та оператори альтернативних генеруючих потужностей.

Наприклад, у другому за величиною японському місті Йокогама (населення 3,7 млн жителів) у 2010 році започатковано проект Yokohama Smart City, що забезпечив впровадження систем SmartGrid для управління енергетичними потребами домогосподарств, будівель та місцевих громад. Наразі містом встановлено понад 260 блоків сонячних батарей, які забезпечують близько 37 МВт генерації, розгорнуто систему прокату понад 2000 електромобілів та створено єдиний обчислювальний центр керування SmartGrid [18].

Відповідно до загальної концепції Yokohama Smart City, до SmartGrid передбачається інтегрувати зовнішню електрогенерацію, локальні джерела генерації енергії (сонячні та вітряні станції), системи збереження енергії, «розумні будинки», систему громадського транспорту (електробуси) з можливістю швидкої заміни батарей та інфраструктуру для електромобілів з швидкими зарядними станціями у місті та нічними зарядними пристроями у гаражах.

У січні 2018 року британська компанія Juniper Research опублікувала результати дослідження, назвавши п'ять міст світу, які активно розвивають Smart Grid-технології. Аналітики відзначають, що до 2022 року впровадження Smart Grid дозволить жителям економити близько \$ 14 млрд на рік [12].

Лідером рейтингу став Сеул, де наразі вже понад 160 тисяч домашніх сонячних електростанцій, а у 2022 році місто планує обладнати сонячними панелями всі громадські будівлі та понад 1 млн приватних будинків. У Південній Кореї передбачається вже у 2020 році встановити «розумні лічильники» у всіх домогосподарствах країни, а до 2030 року – обладнати системами SmartGrid всі електромережі та залучити близько 30% громадян як активних учасників енергоринку країни [23].

Серед системних можливостей для міст – і використання електромобілів для зберігання енергії. Застосування технології Vehicle to Grid та будівництво містами енергопаркінгів з відповідними мережами та підключеннями створює можливість залучати власників електромобілів до міського енергоринку. Також перспективним є застосування такого підходу при створенні мереж прокату електромобілів – коли користувачі їх отримують та залишають на спеціальних станціях, обладнаних зарядним обладнанням [25].

Для побудови таких систем доречно також використовувати існуючі міські електромережі освітлення, а особливо громадського електротранспорту. Підстанції метрополітену, трамвайних та тролейбусних мереж розташовані в різних районах міста, до того ж вночі вони практично не використовуються. Актуальним є і поширення електробусів – не лише як виду транспорту, а й як мобільних резервних джерел електроенергії для об'єктів критичної інфраструктури.

*4.3. Енергоринок громади: запит на нові економіко-правові моделі.* Головними інтересантами запровадження SmartGrid є громад населених пунктів – міст, селищ, сіл, адже далеко не всі виклики здатні опрацювати великі енергокомпанії, які, наприклад, не надто зацікавлені у енергозбереженні кінцевими споживачами. Поки поняття «енергетична політика міста» наразі стає більш ширшим поняттям ніж просто запровадження енергоефективних технічних рішень, особливо коли мова йде про забезпечення динамічного розвитку громади.

Енергосистеми міст пройшли історичний шлях від локального формування до інтеграції у Єдину енергосистему країни – однак наразі, як і в багатьох інших сферах життя, актуальною є децентралізація, в тому числі енергоринку, як генерації, так і передачі електроенергії, адже запровадження нових технічних рішень, у яких не надто зацікавлені енергетичні компанії і вкрай зацікавлені муніципалітети, потребують відповідних повноважень та ресурсів.

У кращому положенні знаходяться міста, що мають системи електротранспорту: їх енергетичні мережі та підстанції знаходяться у власності комунальних підприємств, тобто міської громади – як і сто років тому. Запровадження енергозберігаючих технологій у електротранспорті та нові виклики, пов'язані із забезпеченням роботи систем альтернативної розподіленої генерації у містах (сонячні батареї на дахах, сміттєпереробні заводи, вітряки), систем зберігання енергії, мережі електромобілів, електросамокатів та громадського електротранспорту дозволяють сформуванню нові цілі і завдання з розвитку інтегрованих міських електромереж, що знаходяться у власності муніципалітетів.

Таким чином, дерегуляція енергоринку в частині генерації, збереження, керування споживанням та передачі електроенергії, з передачею відповідних ресурсів енергокомпаній-постачальників та регуляторних повноважень органам місцевого самоврядування надасть великий стимул розвитку сучасних технологій SmartGrid у населених пунктах, залучення інвестицій та підвищення свідомості споживачів електроенергії у загальній справі скорочення споживання електроенергії та скорочення викидів, що впливають на зміни клімату у локальному та глобальному контекстах.

### **Висновки**

Нові технології у сферах енергетики та інформатизації надають нові можливості для вдосконалення енергосистем населених пунктів, що значно впливає і на якість життя мешканців, і на можливості для ділової активності, і на поліпшення екологічної ситуації. У поєднанні з концепцією децентралізації влади та підвищення значення населених пунктів і їх об'єднань це створює передумови для децентралізації енергосистем, підвищення енергоефективності та стійкості інфраструктур до природних та техногенних ризиків.

Ключовими напрямками розвитку енергосистем населених пунктів є подальша інформатизація та застосування технологій «великих даних», зокрема запровадження інтелектуальних лічильників, систем керування споживанням з диференціацією тарифів та визначенням критичних споживачів, застосування гнучких інтелектуальних алгоритмів координації роботи споживачів та систем розподіленої генерації та збереження електроенергії.

При цьому актуальним є використання методів розрахунків систем з ПЕЕ, що дозволяють отримати енергетичні характеристики і параметри електроенергії у аналітичному вигляді, зокрема, метод окремих складових, адаптованих для розрахунку систем зі складними формами еквівалентних генераторів та навантажень.

Разом з тим зростає роль домогосподарств та інших кінцевих споживачів електроенергії (офісні та торговельні центри, громадські заклади, невеликі підприємства) – завдяки новим технологіям вони мають змогу не лише здійснювати заходи з енергозбереження, а й долучитися до локального енергоринку, встановлюючи власні системи генерації, в тому числі резервної, зберігання електроенергії, і вносячи свій внесок до інформативної системи SmartGrid шляхом запровадження інтелектуальних технологій керування власними енергосистемами.

### **Список використаної літератури**

1. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика. – 2014. – № 1. – С. 7-21.
2. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Застосування перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів в системах з циклічно змінюваними параметрами елементів // Пр.Ін-ту електродинаміки НАН України. Зб.наук.пр. – 2003. – №3(6). – С. 102-108.
3. Денисюк С.П., Мельничук Г.В. Побудова перетворення Лапласа при аналізі електромагнітних процесів у колах з циклічно змінюваними параметрами // Електроніка і зв'язок. – 2005. – №26. – С.29-36.
4. Загальноукраїнська та статистична інформація європейських інституцій для надання споживачам ключової інформації про споживання ними енергоресурсів та надані комунальні послуги у 2018 році. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. 08.04.2019. URL: <https://www.facebook.com/nerc.gov.ua/posts/1058327981043141> (дата звернення 20 березня 2020 р.)
5. Кириленко О. В. Денисюк С. П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж // Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит. Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2014. – № 9. – Спец. вып. Т. 2 : Силовая электроника и энергоэффективность. – С. 82-94.



6. Лукомський Д.В. Облачне майбутнє для сонячних електростанцій в Україні. Економічна правда. 31.10.2019. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/10/31/653184/> (дата звернення 20 лютого 2020 р.)

7. Мазур М. В. Статистичний аналіз постачання та споживання енергії з відновлюваних джерел в Україні // Ефективна економіка – № 12. – 2014. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3618> (дата звернення 03 березня 2020 р.)

8. Мороз О.М. Використання технологій SmartGrid для підвищення ефективності електропостачання споживачів. Мороз О.М., Черемісін М.М., Савченко О.А., С.А. Попадченко, Дюбоко С.В.// Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. № 3

9. Підсумки роботи електроенергетики у 2003 році. Міністерство енергетики та захисту довкілля України. 20.02.2004. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art\\_id=93994](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=93994) (дата звернення 22 березня 2020 р.)

10. Про основні показники роботи паливно-енергетичного комплексу України за 2019 рік. Інформаційно-аналітичне дослідження стану паливно-енергетичного комплексу України. «Енергоінформ – Інформенерго». – № 577. URL: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review577-202001.pdf> (дата звернення 12 березня 2020 р.)

11. Рівні цін на універсальні послуги для побутових та малих непобутових споживачів, у тому числі для побутових та малих непобутових споживачів, які є користувачами малої системи розподілу, що вводяться в дію з 01 квітня 2020 року. ТОВ «Київська обласна енергопостачальна компанія». 10.03.2020 URL: <https://koec.com.ua/page?root=23> (дата звернення 11 березня 2020 р.)

12. «Розумним» містам потрібні «розумні» мережі. Новое время. 20.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/so-skorostyu-sveta/rozumnim-mistam-potribni-rozumni-merezhi-50060324.html> (дата звернення 18 лютого 2020 р.)

13. Типс Б., Тафт Дж. Концепция Cisco Smart Grid: Решения по автоматизации подстанций для диспетчерских служб. – Корпорация Cisco. – 2010. URL: [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid\\_qa\\_c67\\_532319.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf) (дата звернення 10 березня 2020 р.)

14. Чашко М.В. Передача электроэнергии импульсами // – Техн. Електродинаміка. Темат. випуск 2003. – С. 124-127.

15. Cities are at the frontline of the energy transition. 07.09.2016. URL: <https://www.iea.org/news/cities-are-at-the-frontline-of-the-energy-transition> (дата звернення 02 березня 2020 р.)

16. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №4(46). – С.7–17. (дата звернення 14 лютого 2020 р.)

17. Energy consumption in households. May 2019. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_consumption\\_in\\_households](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households) (дата звернення 01 березня 2020 р.)

18. Energy Management System. Yokohama Smart City Project (YSCP) Shinba H., Hirashima T., Hori Y., Uyama T. // Meiden Review Series. – №169. – 2017. URL: [https://www.meidensha.co.jp/rd/rd\\_02/rd\\_02\\_02/rd\\_02\\_02\\_06/rd\\_02\\_02\\_05\\_01/\\_icsFiles/afiedfile/2017/02/20/Review\\_169\\_01\\_web\\_170201.pdf](https://www.meidensha.co.jp/rd/rd_02/rd_02_02/rd_02_02_06/rd_02_02_05_01/_icsFiles/afiedfile/2017/02/20/Review_169_01_web_170201.pdf) (дата звернення 20 березня 2020 р.)

19. Energy storage systems: industrial and domestic. 09.04.2019. URL: [https://avenston.com/en/articles/energy\\_storage\\_systems/](https://avenston.com/en/articles/energy_storage_systems/) (дата звернення 24 березня 2020 р.)

20. Gerhard J. Home Automation & Wiring. New York: McGraw-Hill/TAB Electronics. 1999-03-31. URL: <https://archive.org/details/homeautomationwi0000gerh> (дата звернення 20 березня 2020 р.)

21. How much electricity does a home use? OVO Foundation. URL: <https://www.ovoenergy.com/guides/energy-guides/how-much-electricity-does-a-home-use.html> (дата звернення 10 березня 2020 р.)

22. How to Secure Reliable Power. Supply to Mega Cities. Final Report. October 30. – 2015. URL: [http://www.wec-france.org/DocumentsPDF/Etudes\\_CME/How\\_to\\_Secure\\_Reliable\\_Power\\_Supply\\_to\\_Mega\\_Cities.pdf](http://www.wec-france.org/DocumentsPDF/Etudes_CME/How_to_Secure_Reliable_Power_Supply_to_Mega_Cities.pdf) (дата звернення 22 лютого 2020 р.)

23. National Energy Technology Laboratory. NETL Modern Grid Initiative – Powering Our 21st-Century Economy journal. – United States Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2007. – August. – P. 17. (дата звернення 11 березня 2020 р.)

24. Pranab K.R., Weaver J.E., Weber E.M., Dalton L., LeDoux T.M., Rose A.N.. Electricity consumption patterns within cities: application of a data-driven settlement characterization method. International Journal of Digital Earth. № 13, 2020 – Issue 1: Patterns and Processes of Global Human Settlement Development and Dynamics. P.119-135. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2018.1556355> (дата звернення 16 лютого 2020 р.)

25. Ross, J.W.; Sebastian, I. M.; Beath, C.M. (2017). «How to Develop a Great Digital Strategy» (PDF). MITSloan Management Review. Vol. 58 (2). URL: [http://ilp.mit.edu/media/news\\_articles/smr/2017/58204.pdf](http://ilp.mit.edu/media/news_articles/smr/2017/58204.pdf) (дата звернення 17 березня 2020 р.)

26. Smart Grid: попасть в сеть. Новое время. 24.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukraine/so-skorostyusveta/smart-grid-popast-v-set-50057381.html> (дата звернення 24 березня 2020 р.)

**Н. Melnychuk**, master of industrial electronics, ORCID 0000-0002-8173-0472  
**Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine**

## **ENERGY MANAGEMENT OF SETTLEMENTS AND TERRITORIES BASED ON INTELLECTUAL SYSTEMS OF POWER SUPPLY CONTROL**

The purpose of the research is to determine the tendencies of development of power grids of settlements and optimal approaches to their analysis and calculations in the conditions of introduction of technological innovations in the field of information and energy technologies, as well as decentralization of settlements. The article reviews modern approaches and technical solutions, details the issues of SmartGrid formation by combining the introduction of smart approaches and integrated electricity generation, consumption and storage systems. Important aspects of SmartGrid formation in settlements include the need to develop municipal management systems within individual homes and complexes, as well as the formation of an integrated transportation system that includes both public transport and individual vehicles of various types and forms of ownership. In general, the combination of the efforts of local governments, commercial and non-profit institutions, homeowners and local residents is identified as an important prerequisite for successful SmartGrid formation in settlements. The result of the work is to identify current trends in the development of power systems of settlements, in particular, the need to form an intermediate link of energy policy - at the level of settlements and territories that connect local participants in the energy market (generation, storage and consumption of electricity) and act as integrated active participants of the national energy country and national energy market. There is also justification of the relevance of the methods of calculation of power systems, in particular, the extension of the method of individual components based on Laplace transformations and operator calculations, which allow to obtain energy characteristics and parameters of electricity in analytical form for use in intelligent power management systems. As a result, the study confirms the need to further refine the SmartGrid concept by integrating elements of energy systems, intellectualizing management processes and developing new approaches to energy market decentralization.

**Key words:** SmartGrid, power supply, power grids, energy management, settlements, decentralization, electric transport.

### **References**

1. Denysiuk S. Technological landmarks for the implementation of the Smart Grid concept in power systems // Power engineering. – 2014. – № 1. – P. 7-21. (in Ukrainian)
2. Denysiuk S., Melnychuk H. Застосування перетворення Лапласа для аналізу електромагнітних процесів в системах з циклічно змінюваними параметрами елементів // ПІН-ту електродинаміки НАН України. Зб.наук.п – 2003. – №3(6). – С. 102-108. (in Ukrainian)
3. Denysiuk S, Melnychuk H. Constructing Laplace transform in the analysis of electromagnetic processes in circles with cyclically changing parameters // Electronics and communication. – 2005. – №26. – P.29-36. (in Ukrainian)
4. National and statistical information from European institutions to provide consumers with key information on their energy consumption and utilities in 2018. National Commission for the State Regulation of Energy and Utilities. 08.04.2019. URL: <https://www.facebook.com/nerc.gov.ua/posts/1058327981043141> (accessed 20 March 2020). (in Ukrainian)
5. Kyrylenko O., Denysiuk S. Current tendencies of construction and management of modes of power grids // Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2014. – № 9. – P. 82-94. (in Ukrainian)
6. Lukomsky D. Cloud future for solar power plants in Ukraine. Economic truth. 31.10.2019. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2019/10/31/653184/> (accessed 20 February 2020) (in Ukrainian)
7. Mazur M. Statistical analysis of energy supply and consumption from renewable sources in Ukraine // Effective Economy – № 12. – 2014. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=3618> (accessed 03 March 2020) (in Ukrainian)
8. Moroz O. Use of SmartGrid technologies to improve the efficiency of electricity supply to consumers. Moroz O., Cheremisin M., Savchenko O., Popadchenko S., Dubko S. // Energy: Economics, Technologies, Ecology. – 2017. № 3 (in Ukrainian)

9. Results of the work of the electric power industry in 2003. Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine. 20.02.2004. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art\\_id=93994](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=93994) (accessed 22 March 2020) (in Ukrainian)
10. About the main performance indicators of the fuel and energy complex of Ukraine for 2019. Information-analytical study of the state of the fuel and energy complex of Ukraine. Energoinform - Informenergo. – № 577. URL: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review577-202001.pdf> (accessed 12 March 2020) (in Ukrainian)
11. Price levels for universal services for residential and small non-residential customers, including for residential and small non-residential customers who are users of a small distribution system, effective from 1 April 2020. LLC «Kyiv Regional Energy Supply Company». 10.03.2020 URL: <https://koec.com.ua/page?root=23> (accessed 11 March 2020). (in Ukrainian)
12. «Smart» cities need «smart» networks. New time. 20.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukr/ukraine/so-skorostyu-sveta/rozumnim-mistam-potribni-rozumni-merezhi-50060324.html> (accessed 18 February 2020). (in Ukrainian)
13. Tipes B., Taft J. Cisco Smart Grid Concept: Substation Automation Solutions for Dispatching Services. –Corporation Cisco. – 2010. URL: (in Ukrainian) [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid\\_qa\\_c67\\_532319.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf) (accessed 10 March 2020) (in Ukrainian)
14. Chashko MV Transmission of electricity by pulses // - Tech. Electrodynamics. Subject Issue 2003. – P. 124-127. (in Russian)
15. Cities are at the frontline of the energy transition. 07.09.2016. URL: <https://www.iea.org/news/cities-are-at-the-frontline-of-the-energy-transition> (accessed 02 March 2020)
16. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Energy: Economics, Technologies, Ecology. – 2016. – №4(46). – C.7–17. (accessed 14 February 2020)
17. Energy consumption in households. May 2019. URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_consumption\\_in\\_households](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_consumption_in_households) (accessed 01 March 2020)
18. Energy Management System. Yokohama Smart City Project (YSCP) Shinba H., Hirashima T., Hori Y., Uyama T. // Meiden Review Series. – №.169. – 2017. URL: [https://www.meidensha.co.jp/rd/rd\\_02/rd\\_02\\_02/rd\\_02\\_02\\_06/rd\\_02\\_02\\_05\\_01/\\_icsFiles/afieldfile/2017/02/20/Review\\_169\\_01\\_web\\_170201.pdf](https://www.meidensha.co.jp/rd/rd_02/rd_02_02/rd_02_02_06/rd_02_02_05_01/_icsFiles/afieldfile/2017/02/20/Review_169_01_web_170201.pdf) (accessed 20 March 2020)
19. Energy storage systems: industrial and domestic. 09.04.2019. URL: [https://avenston.com/en/articles/energy\\_storage\\_systems/](https://avenston.com/en/articles/energy_storage_systems/) (accessed 24 March 2020)
20. Gerhard J. Home Automation & Wiring. New York: McGraw-Hill/TAB Electronics. 1999-03-31. URL: <https://archive.org/details/homeautomationwi0000gerh> (accessed 20 March 2020)
21. How much electricity does a home use? OVO Foundation. URL: <https://www.ovoenery.com/guides/energy-guides/how-much-electricity-does-a-home-use.html> (accessed 10 March 2020)
22. How to Secure Reliable Power. Supply to Mega Cities. Final Report. October 30. – 2015. URL: [http://www.wec-france.org/DocumentsPDF/Etudes\\_CME/How\\_to\\_Secure\\_Reliable\\_Power\\_Supply\\_to\\_Mega\\_Cities.pdf](http://www.wec-france.org/DocumentsPDF/Etudes_CME/How_to_Secure_Reliable_Power_Supply_to_Mega_Cities.pdf) (accessed 22 February 2020)
23. National Energy Technology Laboratory. NETL Modern Grid Initiative – Powering Our 21st-Century Economy journal. – United States Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2007. – August. – P. 17. (accessed 11 March 2020)
24. Pranab K.R., Weaver J.E., Weber E.M., Dalton L., LeDoux T.M., Rose A.N.. Electricity consumption patterns within cities: application of a data-driven settlement characterization method. International Journal of Digital Earth. № 13, 2020 – Issue 1: Patterns and Processes of Global Human Settlement Development and Dynamics. P.119-135. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2018.1556355> (accessed 16 February 2020)
25. Ross, J.W.; Sebastian, I. M.; Beath, C.M. (2017). «How to Develop a Great Digital Strategy» (PDF). MITSloan Management Review. Vol. 58 (2). URL: [http://ilp.mit.edu/media/news\\_articles/smr/2017/58204.pdf](http://ilp.mit.edu/media/news_articles/smr/2017/58204.pdf) (accessed 17 March 2020)
26. Smart Grid: Get online. New time. 24.01.2020. URL: <https://nv.ua/ukraine/so-skorostyu-sveta/smart-grid-popast-v-set-50057381.html> (accessed 24 March 2020). (in Ukrainian)

Надійшла 08.11.2019  
Received 08.11.2019

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА

У статті наведено результати дослідження впливу способів керування комутатором на якість перетворення електроенергії вентильного двигуна. Показники якості перетворення енергії вентильним двигуном оцінюються показниками струму, напруги і потужності. Показано, що зі збільшенням навантаження двигуна коефіцієнти форми, амплітуди і гармонічні коефіцієнти прагнуть до значень характерних для синусоїдального струму. Для інженерних розрахунків при орієнтовній оцінці якості перетворення енергії вентильним двигуном показники струму досить визначити з урахуванням основної і кількох перших гармонік. Показники, які характеризують форму кривої напруги двигуна і її гармонічний склад, знаходяться в складній функціональній залежності від способу керування приводом, а також кутів випередження, комутації і запасу. Показники якості напруги погіршуються зі збільшенням кутів випередження і запасу. Для реальних кутів комутації і способу керування в підтриманні сталої величини кута запасу на мінімальному рівні, показники якості напруги та потужності вентильного двигуна відповідають кращим показникам частотно-регульованого привода з асинхронними двигунами. У статті показано, що так само, як і показники напруги, показники перетворення потужності значно вищі для способу керування підтримання сталої величини кута запасу на мінімальному рівні, ніж для підтримання сталого значення кута випередження. Розрахунки показують, що у разі реалізації способу керування в підтриманні сталої величини кута запасу на мінімальному рівні втрати у вентильних двигунах від вищих гармонічних складників невеликі і можуть бути зменшені за рахунок збільшення індуктивності згладжувального дротеля.

**Ключові слова:** вентильний двигун, якість перетворення енергії, перетворювач, кут випередження, комутації та запасу.

**Вступ.** Одним з критеріїв вибору типу регульованого електропривода є якість перетворення електричної енергії, яка характеризується формою і гармонічним складом струмів і напруг на виході комутатора (перетворювача) [1]. Показники якості перетворення енергії вентильним двигуном (ВД) оцінюються показниками струму, напруги і потужності.

Смуга пропускання перетворювача, керованого за положенням ротора синхронного двигуна (СД), регулюється зміною кута випередження  $\beta_0$  або  $\beta$  (кути між струмом і відповідно електрорушійною силою (ЕРС) неробочого ходу та напругою двигуна).

**Аналіз попередніх досліджень.** Існують такі способи керування перетворювачем ВД [2].

Перший та другий найпростіші способи керування полягають у підтриманні сталого значення кута випередження  $\beta_0 = \text{const}$  або  $\beta = \text{const}$ , де  $\beta_0 = \beta + \theta$ ;  $\theta$  - кут навантаження СД;  $\beta = \gamma + \delta$ ;  $\gamma$  - кут комутації;  $\delta$  - кут запасу (враховує похибку системи керування і тривалість відновлення замикаючих властивостей електронних ключів перетворювача).

За цими способами керування кут випередження лишається сталим у всіх режимах роботи привода й розраховується відповідно до максимальної величини навантаження. В цьому випадку струму холостого ходу відповідає найбільше значення кута запасу  $40^\circ \dots 50^\circ$ , хоч для відновлення замикаючих властивостей ключів достатньо  $3^\circ \dots 5^\circ$ .

Третій спосіб керування полягає в підтриманні сталої величини кута запасу на мінімальному рівні  $\beta = \beta_{\min} = f(\gamma)$  за умови  $\delta = \delta_{\min} = \text{const}$ .

**Метою роботи** є дослідження впливу способів керування комутатором на якість перетворення електроенергії ВД.

**Матеріали і результати досліджень.** Для встановлення впливу способів керування комутатором на якість перетворення електроенергії ВД проведемо аналітичне дослідження. Встановимо такі припущення: перетворювач працює в режимі джерела струму з випереджаючим коефіцієнтом потужності; для комутації ключів інвертора використовується реактивна енергія СД; відсутня широтно-імпульсна модуляція напруги; падіння напруги на ключах перетворювача відсутнє; напруга синусоїдальна, з комутаційними провалами й викидами, амплітуда яких дорівнює середньому значенню двох сусідніх напруг, а тривалість визначається кутом комутації; струм змінюється лінійно в процесі комутації, ідеально згладжений і має трапецеїдальну форму, а напівперіод струму складається з ділянок провідності  $120^\circ + \gamma$  і паузи  $60^\circ - \gamma$ ; кут навантаження, будучи внутрішнім параметром СД, не спричиняє впливу на енергетичні характеристики перетворювача.

Зв'язок між амплітудним  $I_m$ , середнім  $I_d$  і діючим за половину періоду  $I$  значеннями струму визнача-

© О.О. Закладний, 2019

ється коефіцієнтами форми  $k_\phi$  і амплітуди  $k_a$ , обчислюваними за відомими формулами:

$$k_\phi = \frac{I}{I_d}; \quad k_a = \frac{I_m}{I}. \quad (1)$$

Гармонічний склад струму якоря двигуна характеризується коефіцієнтами:

$$k_n = \frac{1}{I_d} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{(6p\pm 1)}^2}; \quad k_c = \frac{I_{(1)}}{I}; \quad k_r = \frac{1}{I_{(1)}} \sqrt{\sum_{p=1}^{\infty} I_{(6p\pm 1)}^2}; \quad i^* = \frac{1}{k_c}, \quad (2)$$

де  $k_n, k_c, k_r$  - коефіцієнти відповідно пульсації, спотворення і гармонік;  $i^*$  - відносна величина діючого значення струму;  $I_{(1)}$  і  $I_{(6p\pm 1)}$  - діючі значення першої і вищих гармонік струму.

Значення коефіцієнтів  $k_\phi, k_a, k_n, k_c, k_r, i^*$  для різних кутів комутації  $\gamma$ , обчислені за формулами (1) і (2) з урахуванням гармонік струму від першої до 43-ї, наведені в чисельнику умовного дробу табл. 1. Аналіз табл. 1 показує, що зі збільшенням навантаження двигуна коефіцієнти форми, амплітуди і гармонічні коефіцієнти прагнуть до значень характерних для синусоїдального струму.

Таблиця 1. Залежність коефіцієнтів струму ВД від кута комутації.

$\gamma$ , град	$k_\phi$	$k_a$	$k_n$	$k_c$	$k_r$	$i^*$
10	$\frac{1,21}{1,169}$	$\frac{1,242}{1,28}$	$\frac{0,261}{0,242}$	$\frac{0,967}{0,9}$	$\frac{0,222}{0,218}$	$\frac{1,034}{1,111}$
	$\frac{1,19}{1,164}$	$\frac{1,26}{1,26}$	$\frac{0,25}{0,22}$	$\frac{0,978}{0,917}$	$\frac{0,215}{0,2}$	$\frac{1,022}{1,09}$
20	$\frac{1,172}{1,147}$	$\frac{1,28}{1,307}$	$\frac{0,193}{0,183}$	$\frac{0,986}{0,937}$	$\frac{0,167}{0,168}$	$\frac{1,014}{1,067}$
	$\frac{1,155}{1,146}$	$\frac{1,299}{1,306}$	$\frac{0,142}{0,141}$	$\frac{0,992}{0,961}$	$\frac{0,124}{0,129}$	$\frac{1,008}{1,041}$
30	$\frac{1,137}{1,133}$	$\frac{1,319}{1,32}$	$\frac{0,092}{0,094}$	$\frac{0,997}{0,982}$	$\frac{0,081}{0,087}$	$\frac{1,003}{1,018}$
	$\frac{1,125}{1,117}$	$\frac{1,342}{1,34}$	$\frac{0,052}{0,048}$	$\frac{0,999}{0,995}$	$\frac{0,046}{0,045}$	$\frac{1,001}{1,005}$
40						
50						
60						

Для інженерних розрахунків при орієнтовній оцінці якості перетворення енергії ВД показники струму досить визначити з урахуванням основної і кількох перших гармонік [3]. В такому випадку коефіцієнти струму мають вигляд:

$$k_\phi = \frac{3\sqrt{6}\sin\frac{\gamma}{2}}{\pi\gamma}; \quad k_a = \frac{\pi\gamma}{2\sqrt{6}\sin\frac{\gamma}{2}}; \quad k_n = \frac{0,1}{\gamma} \sin 5\frac{\gamma}{2}; \quad k_c = \frac{\sin\frac{\gamma}{2}}{\sqrt{\sin^2\frac{\gamma}{2} + 0,01\sin^2 5\frac{\gamma}{2}}}; \quad k_r = 0,045 \frac{\sin 5\frac{\gamma}{2}}{\sin\frac{\gamma}{2}}. \quad (3)$$

Правомірність такого підходу підтверджується порівнянням чисельника і знаменника умовного дробу (табл. 1), в знаменнику якого наведені значення відповідних коефіцієнтів, обчислених за формулами (3). Похибка, яка допускається при такому розрахунку, не перевищує в середньому 5...10%, що цілком задовольняє вимогам орієнтовної оцінки.

Показники, які характеризують форму кривої напруги двигуна і її гармонічний склад, знаходяться в складній функціональній залежності від способу керування приводом, а також кутів випередження, комутації і запасу. Отримати аналітичні залежності для них, зважаючи на громіздкість виразів для діючих значень першої гармоніки  $U_{(1)}$ , вищих гармонічних  $U_{(2k+1)}$  і напруги  $U$ , не є можливим. Тому з метою полегшення інженерних розрахунків в табл. 2. наведені значення коефіцієнтів, розрахованих з урахуванням гармонік напруги від першої до 41-ї за формулами:

$$k'_\phi = \frac{U}{U_\phi}; \quad k'_a = \frac{U_m}{U}; \quad k'_n = \frac{1}{U_d} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(2k+1)}^2}; \quad k'_c = \frac{U_{(1)}}{U}; \quad k'_r = \frac{1}{U_{(1)}} \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_{(2k+1)}^2}; \quad U^* = \frac{1}{k'_c},$$

де  $U_d = k_{cx} U \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \cos\frac{\gamma}{2}$ ;  $k_{cx} = 1,35$  – коефіцієнт схеми трифазного мостового перетворювача.

Невиправдане збільшення кута запасу призводить до збільшення коефіцієнтів, які характеризують змінну складову напруги ( $k'_n, k'_r$ ), і зменшення коефіцієнту спотворення, що особливо виявляється в

номінальному режимі роботи привода ( $\gamma \approx 20$ ). Порівняння даних табл. 2 з опублікованими даними [4] показує, що для реальних кутів комутації і способу керування  $\beta_{\min}=f(\gamma)$  показники якості напруги ВД відповідають кращим показникам частотно-регульованого привода (ЧРП) з асинхронними двигунами.

Таблиця 2. Залежність коефіцієнтів напруги ВД від кутів випередження, комутації і запасу

$\beta$ , град	$\gamma$ , град	$\delta$ , град	$k'_{\phi}$	$k'_a$	$k'_{\Pi}$	$k'_c$	$k'_r$	$U^*$
20	10	10	0,8	1,355	0,252	0,949	0,331	1,054
30	10	20	0,913	1,339	0,349	0,924	0,413	1,082
	20	10	0,831	1,364	0,293	0,936	0,377	1,068
40	10	30	0,934	1,374	0,344	0,93	0,396	1,075
	20	20	0,886	1,387	0,343	0,922	0,42	1,085
	30	10	0,856	1,4	0,317	0,929	0,4	1,076
50	10	40	1,109	1,34	0,518	0,884	0,528	1,131
	20	30	0,977	1,421	0,418	0,904	0,474	1,106
	30	20	0,91	1,461	0,356	0,919	0,428	1,088
	40	10	0,87	1,48	0,309	0,935	0,38	1,07
60	10	50	1,348	1,358	0,663	0,871	0,564	1,148
	20	40	1,186	1,394	0,645	0,839	0,647	1,192
	30	30	1,032	1,487	0,508	0,872	0,56	1,147
	40	20	0,956	1,523	0,429	0,895	0,499	1,117
	50	10	0,852	1,558	0,327	0,926	0,407	1,08
70	10	60	1,81	1,38	0,914	0,862	0,588	1,16
	20	50	1,485	1,433	0,867	0,812	0,72	1,23
	30	40	1,287	1,466	0,842	0,79	0,777	1,266
	40	30	1,12	1,55	0,64	0,83	0,674	1,2
	50	20	1,04	1,57	0,542	0,854	0,61	1,17

Як видно з табл. 2, показники якості напруги погіршуються зі збільшенням кутів випередження і запасу. При цьому за способом керування  $\beta_{\min}=f(\gamma)$  ці показники значно вищі, ніж за  $\beta=\text{const}$  (рис. 1).

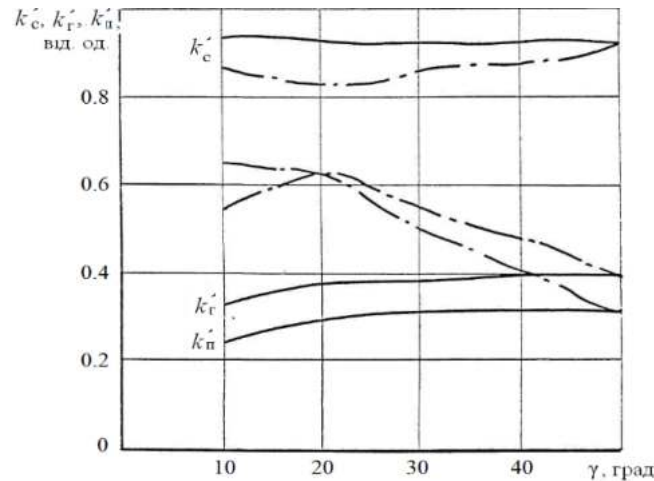


Рисунок 1– Криві залежності коефіцієнтів  $k'_c, k'_r, k'_{\Pi}$  від кута комутації: —  $\beta_{\min}=f(\gamma)$  за умови  $\delta=10^\circ$ ; — - —  $\beta=60^\circ=\text{const}$

Корисною потужністю у ВД є не сумарна активна потужність  $P_{\Sigma}$ , а потужність  $P_{(1)}$  перших гармонік напруги і струму. Поведінка ВД характеризується коефіцієнтами відносної активної потужності  $p^*$ , корисного застосування споживаної потужності  $C_k$  і термічним коефіцієнтом перевантаження  $C_t$ , які обчислюються за формулами [3]:

$$p^* = \frac{P_{\Sigma}}{P_{(1)}}; C_k = \frac{1}{p^*}; C_t = 1 + \frac{\sum_{k>1} P(k)}{\Sigma P}, \quad (4)$$

де  $P_{\Sigma} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} UI_m \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \cos \frac{\gamma}{2}$ ;  $P_{(1)} = 3U_{(1)} I_{(1)} \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})$ ;  $\Sigma P$  - сума втрат активної потужності в міді і сталі СД;  $\sum_{k>1}^{\infty} P(k)$  - додаткові втрати активної потужності від вищих гармонічних складників.

Оскільки в кожній фазі ВД за один оберт валу струм протікає протягом  $2(\frac{2}{3}\pi + \gamma)$ , статорні обмотки використовуються гірше, ніж у звичайного СД. Тому при заданому моменті обертання фазні обмотки двигуна нагріватимуться сильніше, тобто ККД привода  $\eta_{вд}$ , що розраховується за виразом

$$\eta_{вд} = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma p}{P_m \chi}} = \frac{\eta_c \chi}{\eta_c (\chi - 1) + 1}, \quad (5)$$

стане нижчим [3]. У виразі (5):  $\eta_c$ ,  $\chi$  - відповідно ККД СД і коефіцієнт використання ВД;  $P_m$  - механічна потужність.

Значення коефіцієнта використання  $\chi$  можна отримати з виразу потужності ВД за формулою

$$\chi = \frac{\gamma}{2} \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \operatorname{ctg} \frac{\gamma}{2}. \quad (6)$$

Несинусоїдалне живлення СД призводить до необхідності підвищення його габаритної потужності, яке можна врахувати коефіцієнтом цієї потужності

$$C_r = \sqrt{1 + \frac{p^* - 1}{1 - \eta_c}}. \quad (7)$$

Повна потужність двигуна  $S$  в схемі ВД визначається трьома складниками, які знаходимо за допомогою інтегральних методів:

$$S = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q^2 + P_c^2} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi k_c} UI_m; \quad Q = P_{\Sigma} \operatorname{tg}(\beta - \frac{\gamma}{2}); \quad P_c = \sqrt{(\frac{1}{k_c^2} - 1)(P_{\Sigma}^2 + Q^2)} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} UI_m \sqrt{\frac{1}{k_c^2} - 1}, \quad (8)$$

де  $Q$ ,  $P_c$  - відповідно реактивна потужність і потужність спотворення.

Коефіцієнт потужності  $k_p$  на затискачах статора СД розраховується за формулою

$$k_p = \frac{P_{(1)}}{S} = k_c k_3 \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{\frac{\gamma}{2}}, \quad (9)$$

де  $k_3 = \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})$  - коефіцієнт зсуву двигуна;  $\sin \frac{\gamma}{2} / \frac{\gamma}{2}$  - величина, яка враховує припущення  $U_{(1)} \approx U$ .

Таблиця 3– Залежності коефіцієнтів потужності ВД від кутів випередження, комутації і запасу

$\beta$ ,град	$\gamma$ ,град	$\delta$ ,град	$p^*$	$C_k$	$C_t$	$\chi$	$\eta_{вд}$	$C_r$	$k_3$	$k_p$
20	10	10	1,053	0,95	1,842	0,964	0,934	1,352	0,966	0,934
30	10	20	1,087	0,92	2,351	0,9	0,93	1,536	0,906	0,876
	20	10	1,06	0,943	1,958	0,93	0,932	1,392	0,94	0,919
40	10	30	1,079	0,927	2,229	0,817	0,923	1,495	0,819	0,792
	20	20	1,079	0,927	2,233	0,857	0,926	1,495	0,866	0,85
	30	10	1,04	0,962	1,629	0,886	0,928	1,275	0,906	0,894
50	10	40	1,139	0,878	3,171	0,71	0,912	1,781	0,707	0,684
	20	30	1,091	0,917	2,425	0,758	0,917	1,556	0,766	0,75
	30	20	1,046	0,956	1,714	0,8	0,921	1,311	0,819	0,808
	40	10	1,034	0,967	1,538	0,831	0,924	1,237	0,866	0,86
60	10	50	1,153	0,867	3,4	0,572	0,893	1,841	0,5736	0,555
	20	40	1,193	0,838	4,0	0,636	0,903	2,004	0,6428	0,63
	30	30	1,107	0,903	2,661	0,691	0,91	1,635	0,7071	0,697
	40	20	1,068	0,936	2,06	0,735	0,915	1,436	0,766	0,76
	50	10	1,008	0,992	1,127	0,77	0,918	1,06	0,8192	0,817
70	10	60	1,1	0,968	2,55	0,422	0,861	1,6	0,423	0,41
	20	50	1,165	0,858	3,6	0,495	0,88	1,89	0,5	0,489
	30	40	1,113	0,898	2,755	0,56	0,891	1,663	0,574	0,566
	40	30	1,083	0,923	2,314	0,616	0,9	1,516	0,643	0,638
	50	20	1,047	0,955	1,732	0,66	0,906	1,317	0,707	0,705

Коефіцієнти  $p^*$ ,  $C_k$ ,  $C_l$ ,  $\chi$ ,  $\eta_{вд}$ ,  $C_T$ ,  $k_3$  і  $k_p$ , розраховані для  $\eta_c = 0,936$  за формулами (4)...(9), наведені в табл.3, з якої видно, що так само, як і показники напруги, показники перетворення потужності значно вищі для способу керування  $\beta_{min}=f(\gamma)$ , ніж для  $\beta=const$ .

Так, наприклад, для  $\beta=60^\circ$  при  $\gamma=20^\circ$  коефіцієнти мають наступні значення:  $p^* = 1,193$ ;  $C_k=0,838$ ;  $C_l=4$ ;  $\chi=0,636$ ;  $\eta_{вд}=0,903$ ;  $C_T=2$ ;  $k_3=0,6428$ ;  $k_p=0,63$ .

Для закону  $\beta_{min}=f(\gamma)$  при  $\delta=10^\circ$  і  $\gamma=20^\circ$  ці величини такі:  $p^*=1,06$ ;  $C_k=0,943$ ;  $C_l=1,958$ ;  $\chi=0,93$ ;  $\eta_{вд}=0,932$ ;  $C_T=1,392$ ;  $k_3=0,94$ ;  $k_p=0,919$ . Але ці значення не є максимально можливими.

При  $\gamma \approx 20^\circ$  і малому часі відновлення вентилів коефіцієнти  $p^*$ ,  $C_k$ ,  $\chi$ ,  $k_3$ ,  $k_p$  близькі до одиниці, а  $\eta_{вд} \approx \eta_c$ . Порівняння даних табл. 3 з опублікованими даними [4, 5] показує, що для реальних кутів комутації і способу керування  $\beta_{min} = f(\gamma)$  показники якості потужності ВД не гірші за аналогічні показники ЧРП.

На рис. 2...4 наведені залежності коефіцієнтів  $p^*$ ,  $\chi$  і  $\eta_{вд}$  від кутових параметрів і способу керування.

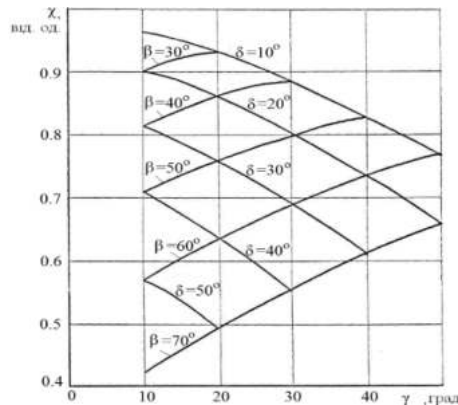


Рисунок 2– Залежності коефіцієнта відносної потужності ВД від кутових параметрів і способів керування

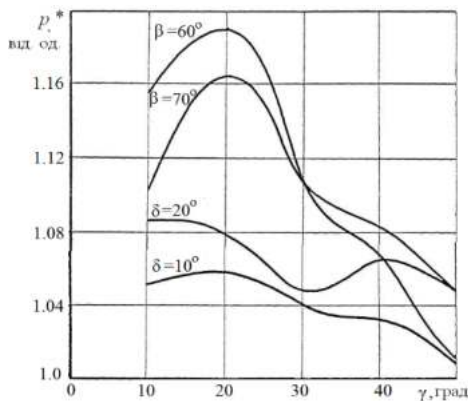


Рисунок 3– Залежності коефіцієнта використання ВД від кутових параметрів і способів керування

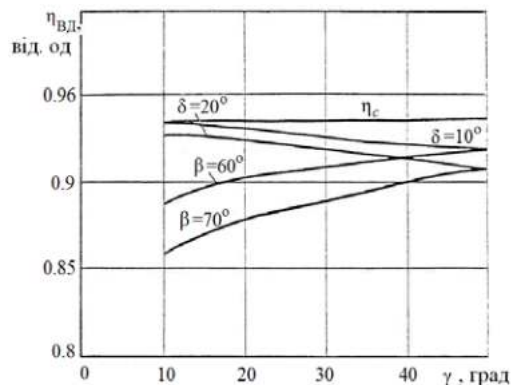


Рисунок 4– Залежності ККД ВД від кутових параметрів і способів керування



**Висновки.** Якщо кут випередження підтримувати сталим, то коефіцієнт потужності  $\cos\varphi = \cos\frac{\gamma}{2}$  залежить від навантаження, і СД працює з найбільшим коефіцієнтом потужності і найкращими енергетичними показниками лише в номінальному режимі. В усіх інших режимах, тобто зі зменшеним навантаженням привод працює з погіршеними енергетичними показниками.

Навпаки, виконання способу керування  $\beta_{\min} = f(\gamma)$  за умови  $\delta = \delta_{\min} = \text{const}$  забезпечує роботу СД із максимальною величиною коефіцієнта потужності  $\cos\varphi = \cos(\delta_{\min} + \frac{\gamma}{2})$ , тобто з мінімальним споживанням реактивної енергії і найкращими енергетичними показниками при всіх можливих значеннях частот машинної комутації і навантаження.

За реальних кутів комутації і малим часом відновлення ключів коефіцієнт потужності прямує до одиниці, а ККД привода – до ККД двигуна.

Розрахунки показують, що у разі  $\beta_{\min} = f(\gamma)$  втрати у ВД від вищих гармонічних складників невеликі і можуть бути зменшені за рахунок збільшення індуктивності згладжувального дроселя.

Отримані результати дозволяють конструктору при виборі електропривода і мінімізації встановленої потужності устаткування достатньо просто і з високою точністю врахувати вплив параметрів перетворювача, двигуна і способу керування на якість перетворення енергії у ВД.

#### Список використаної літератури

1. Закладний, О. М., Сучасні методи регулювання якості електроенергії [Текст] / О.М. Закладний, О.О. Закладний // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2007. – №2. – С. 25 – 30.
2. Закладной, А. Н. Разработка и исследования математической модели вентильного двигателя [Текст] / А.Н. Закладной, В.Ю. Передрий, В.В. Гром, И.В. Петин // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2004. – №2. – С. 46 – 54.
3. Закладной, А. Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями: Монография [Текст] / А.Н. Закладной, О.А. Закладной – К.: Издательство «Либра», 2012. – 185 с.: ил.
4. Алиев, И. И. Коэффициент мощности асинхронного энергосберегающего двигателя [Текст] / И.И. Алиев // Электротехника. – 2004. – №5. – С. 29...31.
5. Фираго, Б. И. Сравнительный анализ качества преобразования электрической энергии силовыми схемами циклоконверторов [Текст] / Б.И. Фираго, З.А. Лисс // Электротехн. пром-сть. Сер. Преобразоват. Техника. – 1978. – №6 (101). – С. 16–19.

**O. Zakladnyi**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692  
**National Technical University of Ukraine**  
**“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## QUALITY OF ELECTRICITY CONVERSION BRUSHLESS ELECTRIC MOTOR

*The results of the impact study ways to control the switch to electricity conversion quality valve engine. Quality energy conversion brushless estimated parameters of current, voltage and power. It is shown that an increase in engine load factors shape, amplitude and harmonic ratios tend to values characteristic sinusoidal current. For engineering calculations when assessing the quality indicative of power conversion valve motor current can sufficiently identify with the main and first few harmonics. The indicators characterizing the shape of the voltage curve of the engine and its harmonic components, are difficult depending on how functional the drive and advance angles, switching and stock. Quality deteriorate with increasing voltage angles and advancing stock. For real corners and mode switching control to maintain a constant angle stock at a minimum, quality voltage and power brushless correspond best indicator variable-frequency drive with induction motors. The article shows that as well as indicators voltage power conversion rates are much higher for the process control to maintain a constant angle stock at a minimum, to maintain than the angle of sustainable value. Calculations show that in the case of the control method to maintain a constant angle stock at a minimum loss in valve engine from the higher harmonic components are small and can be reduced by increasing the inductance smoothing choke.*

**Key words:** valve engine conversion quality power converter, timing angle, switching and stock.

#### References

1. Zakladnyi, A. and Zakladnyi, O. (2007), “Modern methods of regulating power quality”, *Electricity and electrical industries (Promelectro)*. – Vol. 2, pp. 25 – 30.

2. Zakladnyi, A., Perediy, V., Grom, V. and Petin, I. (2004), "Development and research of the mathematical model of the valve motor", *Energetika: ekonomika, tekhnologii, ekologiya*, Vol. 2, pp. 46 – 54.

3. Zakladnyi, A., and Zakladnyi O. (2012), *Energy efficient electric drive with valve motors*, Publishing house "Libra", Kyiv.

4. Aliyev, I.I. (2004), The power factor of an asynchronous energy-saving engine, *Electrical engineering*, Vol. 5. pp. 29 – 31.

5. Firago, B.I. and Liss, Z.A. (1978), Comparative analysis of the quality of conversion of electrical energy by power circuits of cycloconverters. - *Electrotechnical industry. Conversion series. Technique*, Vol. 6 (101), pp. 16-19.

**УДК 62-83-52.003(082)**

**О.А. Закладной**, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0003-2813-3692**  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*В статье приведены результаты исследования влияния способов управления коммутатором на качество преобразования электроэнергии вентильным двигателем. Показатели качества преобразования энергии вентильным двигателем оцениваются показателями тока, напряжения и мощности. Показано, что с увеличением нагрузки двигателя коэффициенты формы, амплитуды и гармонические коэффициенты стремятся к значениям характерным для синусоидального тока. Для инженерных расчетов при ориентировочной оценке качества преобразования энергии вентильным двигателем силу тока достаточно определить с учетом основной и нескольких первых гармоник. Показатели, характеризующие форму кривой напряжения двигателя и ее гармонический состав, находятся в сложной функциональной зависимости от способа управления приводом, а также углов опережения, коммутации и запаса. Показатели качества напряжения ухудшаются с увеличением углов опережения и запаса. Для реальных углов коммутации и способа управления в поддержании постоянной величины угла запаса на минимальном уровне, показатели качества напряжения и мощности вентильного двигателя соответствуют лучшим показателям частотно-регулируемого привода с асинхронными двигателями. В статье показано, что так же, как и показатели напряжения, показатели преобразования мощности значительно выше для способа управления поддержания постоянной величины угла запаса на минимальном уровне, чем для поддержания постоянного значения угла опережения. Расчеты показывают, что в случае реализации способа управления в поддержании постоянной величины угла запаса на минимальном уровне потери в вентильных двигателях от высших гармонических составляющих небольшие и могут быть уменьшены за счет увеличения индуктивности сглаживающего дросселя*

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, качество преобразования энергии, преобразователь, угол опережения, коммутации и запаса.

Надійшла 19.11.2019  
Received 19.11.2019

П.О. Барабаш, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1252-494X  
 А.С. Соломаха, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1061-6277  
 В.В. Серета, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-4645-3123  
 М.В. Совінський, магістр, ORCID 0000-0001-8734-1411  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ПРИ ТЕЧІЇ ПЛІВКИ РІДИНИ ВЕРТИКАЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ З ПОВЗДОВЖНІМ ОРЕБРЕННЯМ

*Розглянуто особливості розподілу плівки рідини при її течії по вертикальній поверхні з поздовжніми ребрами. На основі аналізу сил, які діють у плівці рідини при відсутності міжфазного тертя між рідиною та газовим середовищем, отримані залежності, які описують форму поверхні рідини у міжреберному проміжку. Показано, що коли густина зрошення більша за мінімальну, при якій оребрена поверхня буде гарантовано повністю змоченою (мінімальна товщина плівки на середині міжреберного проміжку  $>0$ ), поверхня плівки рідини приймає форму з рівною кривизною. В залежності від конкретних поперечних геометричних розмірів труби, ребра і міжреберного проміжку поверхня рідини може мати як ввігнуту, так і випуклу форму. Отримані результати дають можливість визначити граничні умови на міжфазній поверхні (рідина – газ), які необхідні для аналітичних та експериментальних досліджень гідродинаміки і тепломасообміну при течії рідини по вертикальній оребреній поверхні.*

**Ключові слова:** плівка рідини, поздовжнє оребрення, мінімальна густина зрошення, краєвий кут змочування, інтенсифікація процесів тепломасообміну.

### Мета дослідження

Для інтенсифікації тепломасообмінних процесів у плівкових апаратах з вертикальною теплообмінною поверхнею використовують різноманітне оребрення [1-10]. Враховуючи тісний зв'язок питань гідродинаміки плівки рідини та інтенсивності теплообміну, доцільно проаналізувати основні параметри плівки та мінімальної щільності зрошення рідиною поверхні з повздовжнім оребренням. З метою спрощення проведення експериментальних досліджень ці ребра можна моделювати дротами різного діаметра, закріплених на плоскій, чи трубчастій базовій поверхні з необхідним кроком.

### Аналітичні залежності для визначення основних параметрів плівки рідини

При течії плівки рідини гладкою вертикальною поверхнею параметри плівки (товщина плівки, режим течії і т.д.) обумовлені такими факторами як сила тяжіння, сила в'язкого тертя всередині рідини, а також умовами на зовнішній поверхні плівки, тобто наявністю або відсутністю дотичного напруження на поверхні розподілу рідкої та газоподібної фази. Течія ламінарної плівки рідини описується рівнянням Нав'є-Стокса, яке для випадку стікання рідини з гладкої поверхні, з врахуванням загальноприйнятих припущень, записується у вигляді:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{g}{\nu} = 0 \quad (1)$$

Граничні умови та рівняння нерозривності роблять систему рівнянь замкнутою, що дозволяє отримати достатньо прості вирази для товщини плівки рідини, величина яких визначається інтенсивністю теплообміну, як при плівковій конденсації, так і при пароутворенні в плівці рідини, що стікає гладкою поверхнею.

При течії плівки рідини поверхнею з повздовжнім оребренням (тут та надалі розглядається випадок, коли рідина змочує поверхню та ребро) швидкість течії змінюється не тільки за напрямком осі  $y$  (рис. 1), але і в напрямку осі  $x$ . Тому, рівняння Нав'є-Стокса, з врахуванням аналогічних загальноприйнятих припущень, набуває вигляду:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{g}{\nu} = 0 \quad (2)$$

Граничні умови:

- а) при  $y = 0$  і  $w = 0$ ;
- б) при  $x = l$  та  $x = -l$  і  $w = 0$ ;

в) при  $y = \delta$  і  $\frac{\partial \omega}{\partial y} = 0$  умова яка має місце при відсутності дотичного напруження на поверхні плівки.

У випадку, коли товщина плівки рідини не перевищує висоту ребра, поверхня рідини підходить до точки дотику з ребром під кутом рівним краєвому куту змочування  $\theta_p$ . При цьому на поверхню рідини, в горизонтальній площині, діють лише сили поверхневого натягу і тиск парової фази, оскільки проекція сили тяжіння на горизонтальну площину рівна нулю. Формування поверхні плівки в цьому випадку відбувається в умовах, які нагадують умови при нульовій гравітації, коли поверхня рідини набуває сферичної форми. З цього випливає, що при течії рідини пласкою поверхнею з дротяним оребренням (якщо товщина плівки менша висоти ребра) поверхня рідини має прийняти увігнуту форму з рівною кривизною (рис. 1). Відомо що тиск парової фази на рідину більше над вигнутою поверхнею ніж над гладкою, а над гладкою – більше, ніж над увігнутою. Якщо припустити, що поверхня плівки в проміжку між двома сусідніми ребрами має змінну кривизну, то на поверхні рідини буде діяти градієнт тиску, спричиняючи переміщення рідини, там де поверхня плівки має більшу позитивну кривизну (позитивно будемо вважати кривизну увігнутою поверхні). Перетікання рідини припиниться тільки тоді, коли зникне градієнт тиску, а він буде рівним нулю, коли поверхня плівки прийме форму однакової кривизни.

Радіус кривизни поверхні залежить від кроку  $s$  між ребрами, діаметра (висоти ребра)  $d = 2 \cdot r$ , краєвого кута змочування ребра  $\theta_p$  та мінімальної товщини плівки  $\delta_0$ , значення якої змінюється зі зміною витрати рідини.

Для визначення  $R_{nl}$  для пласкої поверхні з дротяним оребренням (рис. 1) використаємо теорему косинусів. Тоді з трикутника  $\Delta O_1OK$  (рис. 1), в якому сторона  $OK$  – шуканий радіус кривизни плівки  $R_{nl}$ , а  $O_1K$  – радіус дротяного ребра, отримаємо:

$$O_1O^2 = R_{nl}^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot R_{nl} \cdot \cos(180 - \theta_p) \quad (3)$$

З врахуванням того, що  $\cos(180 - \theta_p) = -\cos \theta_p$ , а  $O_1O^2 = \left(\frac{s}{2}\right)^2 + (R_{nl} - r + \delta_0)^2$ , і прийнявши

$\frac{s}{2} = l$ , маємо

$$l^2 = (R_{nl} - r + \delta_0)^2 = R_{nl}^2 + r^2 + 2 \cdot r \cdot R_{nl} \cdot \cos \theta_p \quad (4)$$

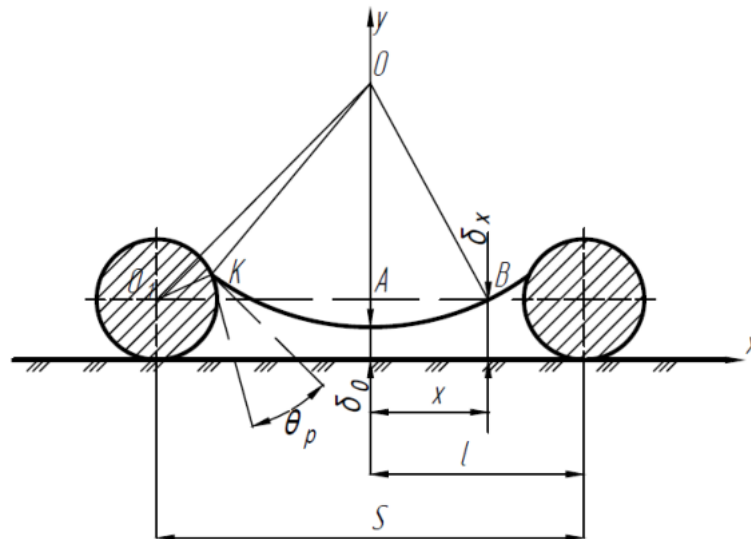


Рис. 1. Форма поверхні плівки на вертикальній пластині з дротяними ребрами

Перетворивши вираз (4) і вирішивши його відносно  $R_{nl}$  отримаємо:

$$R_{nl} = \frac{l^2 + 2 \cdot r \cdot \delta_0 + \delta_0^2}{2 \cdot (r + r \cdot \cos \theta_p - \delta_0)} \quad (5)$$

За  $R_{nl}$  з  $\Delta OAB$  нескладно визначити товщину плівки в будь-якому перерізі  $x$  (рис. 1).

$$\delta_x = R_{nl} + \delta_0 - OA$$

$$OA = \sqrt{R_{nl}^2 + x^2}$$

Тоді:

$$\delta_x = R_{nl} + \delta_0 - \sqrt{R_{nl}^2 - x^2} \quad (6)$$

Середньо-інтегральну товщину плівки можна знайти діленням площі, обмеженої поверхнею плівки і стінкою на  $s-d$  (якщо знехтувати кількістю рідини, що знаходиться під дротом). Шукана площа визначається як різниця між площею прямокутника  $(s-d)dx$  та сегменту, що утворився в наслідок перетину радіусу  $R_{nl}$  лінією паралельною осі  $x$  і проведеною на відстані  $h$  від стінки, де:

$$h = \delta_x = l = R_{nl} + \delta_0 - \sqrt{R_{nl}^2 - (l-r)^2} \quad (7)$$

Якщо, площу сегменту знайти за наближеною формулою  $s_{сегм} = 2/3 \cdot (h - \delta_0) \cdot (s - d)$ , то середньо-інтегральну товщину плівки, можна буде визначити з виразу:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{3} \cdot h + \frac{2}{3} \cdot \delta_0 \quad (8)$$

Для гладкої поверхні з прямокутними ребрами (рис.2) необмеженої висоти радіус кривизни поверхні плівки рідини (якщо змочено весь простір між ребрами) можна визначити з виразу, що використовується для визначення радіусу меніска у капілярах:

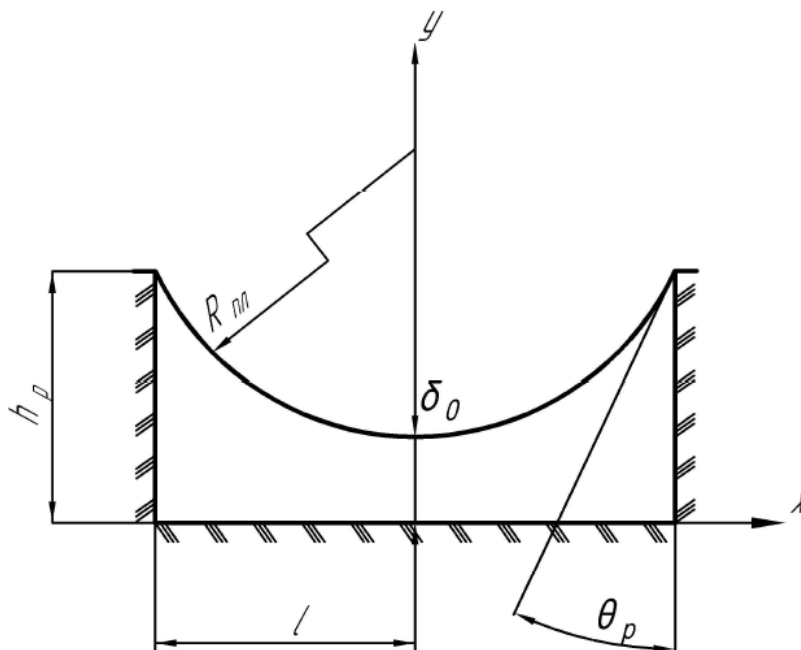


Рис. 2. Форма поверхні плівки на вертикальній пластині з прямокутними ребрами

$$R_{nl} = \frac{l}{\cos \theta_p} \quad (9)$$

Підстановка в (6) значення  $R_{nl}$  з (9), при  $x=l$ , дає висоту підйому плівки біля ребра:

$$h = \frac{l}{\cos \theta_p} + \delta_0 - \sqrt{\frac{l^2}{\cos^2 \theta} - l^2} \quad (10)$$

У випадку, коли ребро нижче  $h$  – поверхня плівки буде підходити до нього під кутом, більшим від кута крайового змочування  $\theta_p$ . При цьому ребро по всій висоті змочене, а це означає, що радіус кривизни поверхні плівки нескладно отримати з виразу для сегменту  $h_p - \delta_0 = R_{nl} - \sqrt{R_{nl}^2 - l^2}$ , якщо розв'язати його відносно  $R_{nl}$ :

$$R_{nl} = \frac{l^2}{2(h_p - \delta_0)} + \frac{h_p - \delta_0}{2} \quad (11)$$

Локальні товщини плівки знаходяться з рівняння (6), а середнє інтегральне значення з рівняння (8), для якого  $h=h_p$ .

В промислових апаратах теплообмінна поверхня в більшості випадків виготовляється з труб різного діаметру, тому доцільно отримати залежності аналогічні рівняння (5), (6), (7) та (8) для випадку коли кривизна поверхні з дротяним оребренням співрозмірна з кривизною плівки рідини.

В залежності від співвідношення діаметра труби, висоти ребр і їх кількості, поверхня плівки може приймати, як увігнуту форму (рис.3а), так і вигнуту (рис.3б).

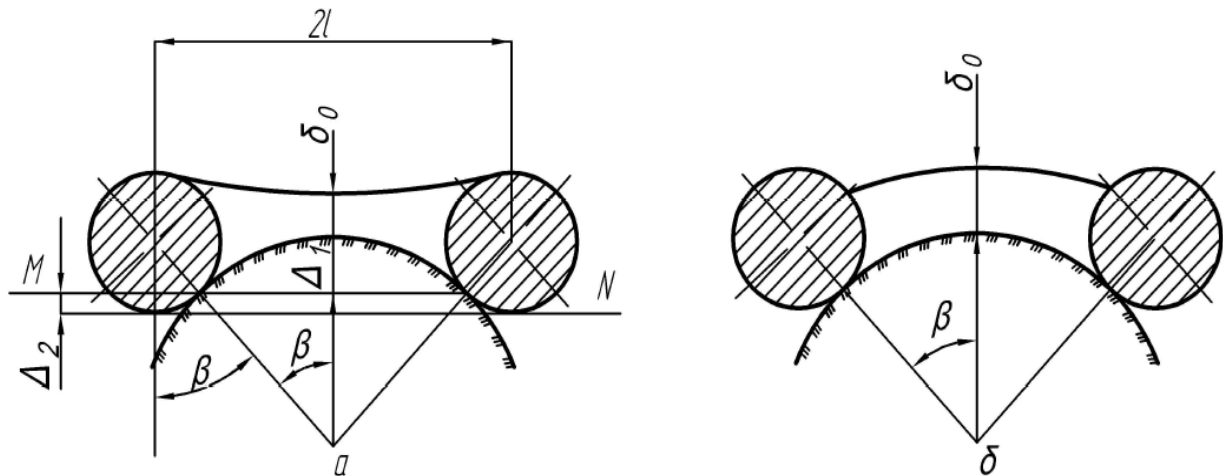


Рис. 3. Форма поверхні плівки на вертикальній трубі з дротяними ребрами: а – увігнута; б – вигнута

З рис.3а видно, що радіус кривизни плівки на циліндричній поверхні буде рівним радіусу для гладкої поверхні MN з тими самими ребрами, якщо мінімальна товщина плівки рівна:

$$\delta'_0 = \delta_0 + \Delta_1 + \Delta_2 \quad (12)$$

Враховуючи, що:

$$\Delta_1 = R_{нов} \cdot (1 - \cos \beta) \quad (13)$$

$$\Delta_2 = r \cdot (1 - \cos \beta) \quad (14)$$

Після підстановки (12), (13) та (14) в (5) отримаємо вираз для радіусу кривизни плівки на циліндричній поверхні з дротяними ребрами:

$$R_{nl} = \frac{[\delta_0 + (r + R_{нов}) \cdot (1 - \cos \beta)]^2 - 2r \cdot [\delta_0 + (r + R_{нов}) \cdot (1 - \cos \beta)] + l^2}{2[r \cos \theta_p - \delta_0 - (R_{нов} + r) \cdot (1 - \cos \beta) + r]}$$

Позначимо комплекс  $\delta_0 + (r + R_{нов}) \cdot (1 - \cos \beta) = \delta_0^*$ , тоді:

$$R_{nl} = \frac{(\delta_0^*)^2 - 2 \cdot \delta_0^* \cdot r + l^2}{2 \cdot (r \cdot \cos \theta_p - \delta_0^* + r)} \quad (15)$$

де  $l = (R_{нов} + r) \cdot \sin \beta$ ,  $\beta = 360/2N$

$N$  – кількість ребер.

Рівняння (15) можна використовувати і для випадку, коли плівка рідини стає випуклою (рис.3б); значення радіусу кривизни  $R_{nl}$  в цьому випадку – від'ємне. Перевірити це твердження можливо шляхом виводу залежності для радіусу кривизни випуклої плівки методом, що вже використовувався при отриманні формул (5) та (15). Враховуючи простоту виведення, опустимо його, зазначивши лишень, що прийнявши кривизну випуклої плівки від'ємною, залежність для  $R_{nl}$  буде ідентичною (15).

За локальну товщину плівки рідини, що стікає циліндричною поверхнею з дротяним оребренням будемо приймати товщину по нормалі до поверхні труби. Тому вираз для неї доцільно шукати в циліндричних координатах, за вісь яких прийнято вісь труби.

З рис.4, видно, що локальна товщина плівки є

$$\delta_\varphi = AK = OK - OA \quad (16)$$

Позначивши  $OK=\eta$  та  $O_1O=\eta_0$  з трикутника  $\Delta O_1OK$  можливо отримати з теореми косинусів

$$\eta^2 = 2\eta\eta_0 \cos \varphi + \eta_0^2 - R_{nl}^2 = 0$$

Розв'язуючи квадратне рівняння відносно  $\eta$ , знайдемо:

$$\eta = \eta_0 \cos \varphi \pm \sqrt{\eta_0^2 \cos^2 \varphi - \eta_0^2 + R_{nl}^2}$$

Цим умовам задовольняє корінь

$$\eta = \eta_0 \cos \varphi - \sqrt{\eta_0^2 \cos^2 \varphi - \eta_0^2 + R_{nl}^2} \quad (17)$$

При  $\varphi = 0$ , отримуємо  $\eta=R_{nl}$ , що узгоджується з рис. 4.

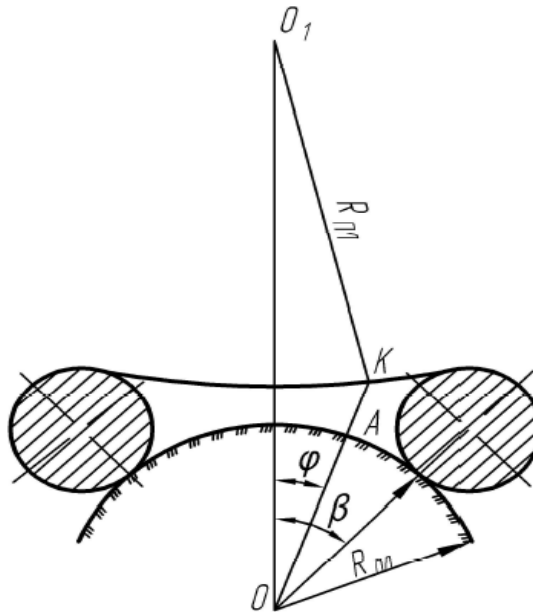


Рис. 4 До розрахунку увігнутої форми поверхні півки на вертикальній трубі з дротяними ребрами

Підставивши (17) в (16), отримаємо вираз для локальних товщин увігнутої півки рідини на циліндричній поверхні з поздовжньо-дротяним оребренням:

$$\delta\varphi = \eta_0 \cos \varphi - \sqrt{\eta_0^2 \cos^2 \varphi - \eta_0^2 + R_{nl}^2} - R_{нов} \quad (18)$$

З рис.4 видно, що  $\eta_0 = R_{nl} + R_{нов} + \delta_0$

Якщо поверхня півки випукла, то шляхом аналогічних міркувань можна отримати

$$\delta\varphi = \sqrt{\eta_0^2 \cos^2 \varphi - \eta_0^2 + R_{nl}^2} - \eta_0 \cos \varphi - R_{нов} \quad (19)$$

де  $\eta_0 = |R_{nl}| - R_{нов} - \delta_0$ .

Середня товщина півки рідини, що стікає циліндричною поверхнею з дротяним оребренням, простіше отримати з виразу для локальної товщини її в декартових координатах. Скориставшись рис.3а, знайдемо:

$$\delta_x = R_{нов} + \delta_0 - \sqrt{R_{нов}^2 - x^2} + R_{nl} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_{nl}^2}} \right) \quad (20)$$

Площа поперечного перерізу півки  $F$  на ділянці  $0+l$ , де  $l_1 = R_{нов} \sin \beta$ , буде виражена інтегралом:

$$F = \int_0^{l_1} \delta_x dx = x(R_{нов} + \delta_0 + R_{nl}) - 0,5 \cdot \left( x\sqrt{R_{нов}^2 - x^2} + R_{нов}^2 \arcsin \frac{x}{R_{нов}} \right) - 0,5 \cdot \left( xR_{nl} \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_{nl}^2}} + \arcsin \frac{x}{R_{nl}} \right) \Bigg|_0^{l_1} \quad (21)$$

Підстановку радіусу профілю півки у виразах (20) та (21) варто виконувати з врахуванням його знаку, тобто від'ємним, якщо поверхня півки – випукла (рис.3б).

Знаючи  $F$ , не складно отримати вираз для  $\bar{\delta}$ , якщо розділити  $F$  на довжину дуги  $l^* = \pi R_{нов} \beta / 360$ .

$$\bar{\delta} = \frac{l_1 \cdot (R_{нов} + R_{пл} + \delta_0) - 0,5 \cdot \left( l_1 \sqrt{R_{нов}^2 - l_1^2} + R_{нов}^2 \cdot \arcsin l_1 / R_{нов} \right) - 0,5 \cdot \left( R_{пл} \cdot l_1 \sqrt{1 - l_1^2 / R_{пл}^2} + \arcsin l_1 / R_{пл} \right)}{\pi R_{нов} \beta / 360} \quad (22)$$

$\beta = \frac{360}{2N}$ , де  $N$  – кількість ребер.

### Висновки

В роботі отримані аналітичні залежності для параметрів плівки рідини на вертикальній оребреній поверхні. Ці залежності можуть бути використані у якості краєвих умов при розрахунку поля швидкостей у плівці рідини на оребреній поверхні, витрат рідини, мінімальної густини зрошення та дослідженні коефіцієнтів тепловіддачі при нагріванні плівки рідини та при її випаровуванні.

### Список літератури

1. Xuehu Ma, A. Briggs, J. Rose. Heat transfer and pressure drop characteristics for condensation of R113 in a vertical micro-finned tube with wire insert. International communications in heat and mass transfer. 2004, Vol. 31, № 5, pp. 619-627.
2. Park, I.S. Numerical analysis for flow, heat and mass transfer in film flow along a vertical fluted tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1-3), pp. 309–319.
3. Dengliang, Z., Hong, X., Yan, S., & Baojin, Q. (2010). Numerical heat transfer analysis of laminar film condensation on a vertical fluted tube. Applied Thermal Engineering, 30(10), 1159–1163.
4. Cho, J. M., Kim, Y. J., & Kim, M. S. Experimental studies on the characteristics of evaporative heat transfer and pressure drop of CO2/propane mixtures in horizontal and vertical smooth and micro-fin tubes. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(1), 170–179.
5. Aroonrat, K., & Wongwises, S. Evaporation heat transfer and friction characteristics of R-134a flowing downward in a vertical corrugated tube. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(1), 20–28.
6. Tong, P., Fan, G., Sun, Z., & Ding, M. Experimental study of steam–air condensation over a vertically longitudinal finned tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89, 1230–1238.
7. Tong, P., Fan, G., Sun, Z., Ding, M., & Su, J. An experimental investigation of pure steam and steam–air mixtures condensation outside a vertical pin-fin tube. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 69, 141–148.
8. Yildiz, S., Duymaz, G., Ziegler, F., & Auracher, H. Heat transfer during reflux condensation of R134a inside a micro-fin tube with different tube inclinations. International Journal of Refrigeration, 2017, 74, 425–434.
9. Talesh Bahrami, H. R., Saffari, H. Theoretical study of stable dropwise condensation on an inclined micro/nano-structured tube. International Journal of Refrigeration, 2017, 75, 141–154.
10. Fan, G., Tong, P., Sun, Z., Chen, Y. Experimental study of pure steam and steam–air condensation over a vertical corrugated tube. Progress in Nuclear Energy, 2018, 109, 239–249.

УДК 66.045.12

**П.А. Барабаш**, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-1252-494X  
**А.С. Соломаха**, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-1061-6277  
**В.В. Серeda**, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-4645-3123  
**Н.В. Совинский**, магистр, **ORCID** 0000-0001-8734-1411  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПРОДОЛЬНОМ ОРЕБРЕНИЕМ

*Рассмотрены особенности распределения пленки жидкости при ее течении по вертикальной поверхности с продольными ребрами. На основе анализа сил, действующих в пленке жидкости при отсутствии межфазного трения между жидкостью и газовой средой, получены зависимости, описывающие форму поверхности жидкости в межреберном промежутке. Показано, что когда плотность орошения больше минимальной, при которой оребренная поверхность будет гарантировано полностью смоченной (минимальная толщина пленки на середине межреберных промежутков  $> 0$ ), поверхность пленки жидкости принимает форму с ровной кривизной. В зависимости от конкретных поперечных геометрических размеров трубы ребра и межреберных промежутков поверхность жидкости*



может иметь как вогнутую, так и выпуклую форму. Полученные результаты дают возможность определить граничные условия на межфазной поверхности (жидкость - газ), которые необходимы для аналитических и экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена при течении жидкости по вертикальной оребренной поверхности.

**Ключевые слова:** пленка жидкости, продольное оребрение, минимальная плотность орошения, краевой угол смачивания, интенсификация процессов теплообмена.

**P. Barabash**, Cand. Sc. Sciences, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-1252-494X

**A.S. Solomakha**, Cand. Sc. Sciences, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-1061-6277

**V. Sereda**, Cand. Sc. Sciences, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-4645-3123

**M. Sovinskyi**, Msc., **ORCID** 0000-0001-8734-1411

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

## **STUDY OF THE HYDRODYNAMICS OF THE LIQUID FILM FLOW ON A VERTICAL SURFACE WITH LONGITUDINAL FINNING**

*The features of the flow of a liquid film on a vertical surface with longitudinal ribs are considered. The forces that are present in the liquid film in the absence of interfacial friction between the liquid and the gas medium are analyzed. Dependencies are obtained that describe the shape of the surface of the fluid in the space between fins. It was shown that when the irrigation density is greater than the minimum at which the finned surface is guaranteed to be completely wetted (the minimum film thickness in the middle between the fins is greater than zero), the surface of the liquid film has a shape with smooth curvature. Depending on the specific transverse geometric dimensions of the pipe, the ribs and the gaps between the ribs, the surface of the liquid can have either a concave or convex shape. The results obtained make it possible to determine the boundary conditions on the interphase surface (liquid - gas), which are necessary for analytical and experimental studies of hydrodynamics and heat and mass transfer during fluid flow along a vertical fin surface.*

**Key words:** liquid film, longitudinal finning, minimum irrigation density, contact angle, intensification of heat and mass transfer processes.

### **References**

1. Xuehu Ma, A. Briggs, J. Rose. Heat transfer and pressure drop characteristics for condensation of R113 in a vertical micro-finned tube with wire insert. International communications in heat and mass transfer. 2004, Vol. 31, № 5, pp. 619-627.
2. Park, I.S. Numerical analysis for flow, heat and mass transfer in film flow along a vertical fluted tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1-3), pp. 309-319.
3. Dengliang, Z., Hong, X., Yan, S., Baojin, Q. (2010). Numerical heat transfer analysis of laminar film condensation on a vertical fluted tube. Applied Thermal Engineering, 30(10), 1159-1163.
4. Cho, J. M., Kim, Y. J., & Kim, M. S. Experimental studies on the characteristics of evaporative heat transfer and pressure drop of CO<sub>2</sub>/propane mixtures in horizontal and vertical smooth and micro-fin tubes. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(1), 170-179.
5. Aroonrat, K., & Wongwises, S. Evaporation heat transfer and friction characteristics of R-134a flowing downward in a vertical corrugated tube. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(1), 20-28.
6. Tong, P., Fan, G., Sun, Z., & Ding, M. Experimental study of steam-air condensation over a vertically longitudinal finned tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89, 1230-1238.
7. Tong, P., Fan, G., Sun, Z., Ding, M., & Su, J. An experimental investigation of pure steam and steam-air mixtures condensation outside a vertical pin-fin tube. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 69, 141-148.
8. Yildiz, S., Duymaz, G., Ziegler, F., & Auracher, H. Heat transfer during reflux condensation of R134a inside a micro-fin tube with different tube inclinations. International Journal of Refrigeration, 2017, 74, 425-434.
9. Talesh Bahrami, H. R., Saffari, H. Theoretical study of stable dropwise condensation on an inclined micro/nano-structured tube. International Journal of Refrigeration, 2017, 75, 141-154.
10. Fan, G., Tong, P., Sun, Z., Chen, Y. Experimental study of pure steam and steam-air condensation over a vertical corrugated tube. Progress in Nuclear Energy, 2018, 109, 239-249.

Надійшла 19.11.2019

Received 19.11.2019

# МІЖГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ І СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПАЛИВНО- ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ CROSS-SECTORAL PROBLEMS AND SYSTEM STUDIES IN THE FUEL AND ENERGY SECTOR

---

H. Strelkova, Cand. Sc. (Phys. & Math.), ORCID 0000-0002-5708-1134

M. Strelkov, Cand. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0000-0002-4320-7162

I. Dango, Msc.

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## INDICATOR-BASED ANALYSIS OF PRECONDITIONS FOR DEPLOYMENT OF INNOVATIVE SOLUTIONS FOR EXPANDING ACCESS TO ELECTRICITY IN SUB-SAHARAN COUNTRIES

*In the article, there was conducted an indicator-based analysis for assessing the preconditions for the deployment of innovative energy solutions in Sub-Saharan countries for extending access of their population to electricity. This type of analysis was used to assess the state of investigated Sub-Saharan countries with certain criteria over a defined period of time regarding their abilities to attract investments in innovative energy solutions for extending access to electricity. The criteria and indicators necessary for assessing preconditions on the deployment of innovative energy solutions in Sub-Saharan countries in the frame of indicator-based analysis were determined. The middle-income economy, the institutional and social stability, the acceptable level of security, the lasting economic growth, and the rate of electrification were chosen as the key criteria attractive for investments in the energy sector. The criteria were based on the set of universal typical indicators that define the state of the economic, institutional and social environment across the countries in the identical qualitative definitions and quantitative features. To avoid the bias of inferences and reduce the vulnerability of the decision-making process, information modeling techniques were applied for data processing. Grounded on these techniques, the binary matrix table was designed to manage and arrange the descriptive informational data about countries. As a result of the indicator-based analysis, the group of Sub-Saharan countries, which confirmed the criteria for attracting investment in innovative energy solutions, was defined. These countries were analyzed in detail regarding the dynamics of the electrification rate. The number of inhabitants without access to electricity and the approximate number of households that need to get access to electricity were evaluated. The possible innovative solutions for improving access to electricity were also considered.*

**Key words:** *indicator-based analysis, electrification rate, access to electricity, innovative solutions, Sub-Saharan countries.*

**Introduction.** Economic growth accelerates the industrial and urbanization processes, increases households' purchasing energy that have a strong impact on the level of electricity consumption. As stated by the latest research of the International Energy Agency (IEA) the rapid economic and population growth in Africa will have considerable consequences not only for the regional energy sector but also for the global one. Projected by the International Monetary Fund in 2019, the average economic growth in developing Sub-Saharan countries will rise to 3,6 %. However, the real level of per capita income will significantly vary between the countries in this region. It will be much higher for 24 non-resource-intensive countries with a total population about 500 million people. The average economic growth expected for this group of countries is about 6 %. There is an obvious relationship between economic activity and electricity demand. The use of electrical technologies impacts significantly on the economic productivity that makes a background for increasing economic growth. It is one of the most essential factors that drive progress in the industrial, transport and agriculture sectors and services. As the growth of energy demand in developing countries is accompanied by an existing world trend in decreasing the cost of key renewable technologies, the combination of these two tendencies may open the ways for stimulating consumer interest in the introduction of renewable energy. However, the financial and social measures in developing countries should not be

© Г.Г. Стрелкова, М.Т. Стрелков, І.Данго, 2019

limited only to the issues on increasing the penetration of renewable energy technologies at themselves. To ensure sustainable economic growth and raise the living standards together with developing green-electricity generation, the modern-day solutions require innovative approaches regarding the new digital technologies for energy service. These matters are crucial and challenging issues for developing economies of Sub-Saharan countries because to solve them efficiently sufficient access to electricity is needed [1-4].

As it is well known the affordable and reliable access to electricity is a foundation of economic development. In the context of Sub-Saharan countries, the most difficult obstacles to ensure universal electricity access are related to economic, social or institutional problems. In 2018, according to IEA data on Sub-Saharan Africa, the average level of electrification was 45%. This level is almost twice lower than the global access level, which equals 87 %. Totally there are about 600 million people without access to electricity in Sub-Saharan countries and more than 80 % of them are living in rural areas. The concept of modern access to electricity covers a wide range of economic activities of market economy entities. Ensuring modern access to electricity is considered both in the context of the activities of individual households and small industrial enterprises or small agricultural firms. Also, the availability of modern access to electricity is an important condition for the provision of various socially significant goods and services by state municipalities: street lighting, the activities of medical institutions, schools, etc. Simultaneously with electricity access, related issues of electricity supply, such as quality, safety, and availability, are often appeared. The range of actions to improve access to electricity is defined not only by economic, regulatory and social factors but also by the characteristics of the spatial factor. This matter is especially true for communities placed in remote and rural areas. In cases where the problem of improvement is considered at the level of regional electricity networks, there is already a significant amount of experience that has been successfully implemented in many countries around the world [2-5].

Successfully addressing the problem of extending access to electricity for rural and remote areas remains a challenge for many developing countries. A possible way, which may be considered as a solution to extend access to electricity, is the transfer and adaptation of innovative technologies and processes, which have shown the positive results in other countries with a similar problem. However, this approach needs significant funding and favorable conditions for investments in innovative energy solutions for extending access to electricity. To define the developing Sub-Saharan African countries, which have the opportunities to attract investment in energy innovations to extend access to electricity, this study was conducted.

#### **Goal and tasks of research**

The goal of the research is to conduct indicator-based analysis for assessing preconditions for the deployment of innovative energy solutions in Sub-Saharan countries for extending access of the population to electricity.

To achieve the goal the next tasks were defined.

1. To determine criteria and indicators for assessing preconditions for the deployment of innovative energy solutions in Sub-Saharan countries.
2. To conduct an indicator-based analysis comparing the Sub-Saharan countries on their abilities to attract investments in innovative energy solutions for extending access to electricity.
3. To consider the innovative solutions for improving access to electricity for populations in Sub-Saharan countries.

#### **Materials and results of research**

To solve the problem with limited access to electricity and overcome the barriers to sufficient electricity supply, significant financial support is required for developing Sub-Saharan countries. These countries must meet certain conditions concerning the investment climate. The pattern of these Sub-Saharan countries significantly varies in economic conditions. For identifying the country-specific challenges to meet the key criteria essential for attracting investments in improving access to electricity, the indicator-based analysis was used. This type of analysis is widely used for assessing the state of the investigated countries with certain criteria for defined periods. The criteria must be based on the set of universal typical indicators that define the state of economic, institutional and social environment in the same qualitative definitions and quantitative features. Assessment obtained by indicator-based analysis allows us to avoid the bias of inferences and reduce the vulnerability of the decision-making process.

As the key criteria attractive for investments in the energy sector, the middle-income economy, the institutional and social stability, the acceptable level of security, the lasting economic growth, and the rate of electrification were chosen. The choice of criteria was grounded on the following preconditions. As stated in [6-7], for the middle-income economies there is a strong relationship between income, consumption, and gross domestic product (GDP). The consistent increase in GDP is an attractor of foreign direct investment. In Sub-Saharan countries, the positive relationship between the consumption and the GDP per capita growth is detected as well. These indicators also depend on institutional and social stability. The conflicts lead to a large and persistent decline in the GDP per capita, make strains on countries' public finances, lowering revenue, and take the resources away from economic and social development. Usually, non-resource-intensive countries are more desirable for investments related to energy innovations. And finally, to attract investments in energy solutions it is necessary to have a positive dynamics of the electrification rate that shows the changes in the percentage of the population that got access to electricity in Sub-Saharan countries.

For country grouping and arrangement, the methodological approaches, used by the International Monetary Fund [1] and the World Bank [8], were applied. By these methodologies, all Sub-Saharan countries can be aggregated into a few different groups. One of the groupings divides resource-intensive and non-resource-intensive economies. The oil exporting countries and the non-renewable natural resource exporting countries belong to resource-intensive economies. The countries, which do not belong to the first two groups, are classified as non-resource-intensive economies. Another grouping varies the countries by their income in high-, middle-, and low-income economies. The next type of grouping classifies countries according to levels of institutional and social fragilities, which are identified by public indicators. Finally, the countries are classified as countries affected by conflict and countries not affected by conflict. Thus, to meet the lasting economic growth criterion, the economy of the country must be classified as at least low-middle-income and non-resource-intensive. To meet the criteria of institutional and social stability, there must be absent institutional fragility in the country. To meet the acceptable level of security, the country must be defined as not affected by conflicts. To attract investments, the country must also have a consistent increasing GDP.

Based on the criteria given above, the comparative qualitative and quantitative indicator-based analysis of developing Sub-Saharan countries was conducted. To avoid the bias of inferences and reduce the vulnerability of the decision-making process, information modeling techniques [9] were applied. Grounded on these techniques the binary matrix table was designed to manage and arrange the descriptive informational data about countries. This matrix supported the checkup process regarding the country's conformity to the key criteria. In binary matrix table, the text informational data were converted to numbers by the following rules: if information about the country meets criteria, the value is equal one, and if it does not - the value is equal zero.

To provide the investigation, the informational and statistical open databases [1, 8] were used. The most recent qualitative and quantitative information was given by these sources for 2018.

In 2018 there were 48 developing Sub-Saharan countries and all these countries must be evaluated by macroeconomic, institutional, and social criteria. At using the binary matrix table, the checkup process was started with the primary criterion - an economy with at least low-middle-income. This criterion was confirmed only for 18 countries, which made it possible to reduce the list of the examined countries by almost 2.5 times. The results of the checkup process, obtained for 18 countries on their confirmation to key criteria, were performed as a binary matrix and given in Table 1.

Table 1. Evaluation of Sub-Saharan countries on confirmation to economic, institutional, and social criteria required for investments in innovative energy solutions (state on 2018)

Countries	Criteria			
	middle-income economy	non-resource-intensive	absence of institutional fragility	not affected by conflicts
Angola	1	0	1	1
Botswana	1	0	1	1
Cabo Verde	1	1	1	1
Cameroon	1	0	1	0
Côte d'Ivoire	1	1	0	1
Equatorial Guinea	1	0	1	1
Eswatini	1	1	1	1
Gabon	1	0	1	1
Ghana	1	0	1	1
Kenya	1	1	1	1
Lesotho	1	1	1	1
Mauritius	1	1	1	1
Namibia	1	0	1	1
Nigeria	1	0	1	0
Republic of Congo	1	0	0	1
São Tomé & Príncipe	1	1	0	1
Senegal	1	1	1	1
Seychelles	1	1	1	1

The comparative cross-country analysis of the data in the matrix table showed that there were only seven countries from eighteen examined ones that completely confirmed the requirements of criteria. These countries are Cabo Verde, Eswatini, Kenya, Lesotho, Mauritius, Senegal, and Seychelles. According to the World Bank data, the

economies were specified as a lower-middle-income for Cabo Verde, Eswatini, Kenya, Lesotho, Senegal, and as an upper middle-income for Mauritius. The level of the economy for Seychelles was classified as a high-income economy.

To evaluate the lasting economic growth, the next step was related to the analysis of the annual rate of GDP growth in the group of selected countries in 2018. The annual percent changes in GDP growth for these countries are given from the highest to the lowest values: Senegal - 6.7%; Kenya - 6.3 %; Cabo Verde - 5.1%; Seychelles - 4.1%; Mauritius - 3.8%; Lesotho - 2.8% and Eswatini - 2.4%.

The group of Sub-Saharan countries, for which the key criteria were confirmed, was analyzed in detail regarding the dynamics of the electrification rate. There are three types of indicators that describe the electrification rate in the country. The total access to electricity reflects the percentage of the country's population with access. The urban access to electricity shows the percentage of the population with access in urban areas. The rural access to electricity is stated by the percentage of the population with access in rural areas. For analysis, the more recent data on access to electricity offered by [10] were used.

In Fig. 1 the comparative diagram about the levels of access to electricity in investigated countries is given from the highest level of electrification to the lowest one.

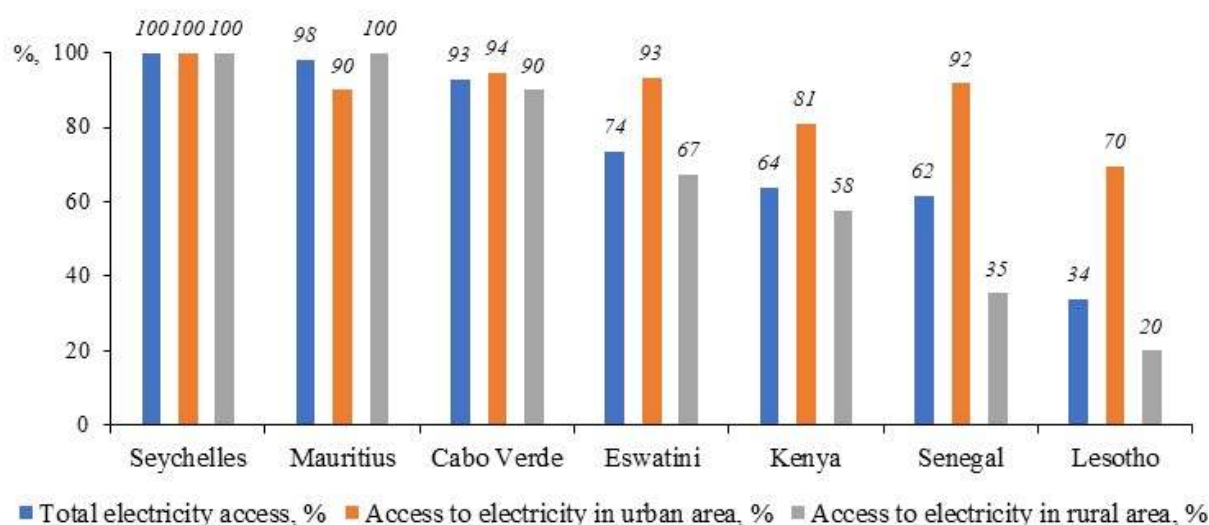


Figure 1 – The level of access to electricity in the selected group of developing Sub-Saharan countries, 2017

The comparative analysis of countries' indicators showed that among these countries Seychelles has reached universal access. With having 98% of total access to electricity and 100% access to electricity for the rural population, Mauritius is also on the way to achieve it soon. Cabo Verde can be considered as a country where access to electricity for total, urban and rural populations is higher than the average global level of electrification rate equal to 87 %. Other countries, in 2017, had the levels of total access to electricity lower than the global one, and significantly lower access was observed for the rural population compared to the urban population.

At the same time, it should be noted that during the two last decades all countries had considerable progress in solving the access problem and undertaken activities to expand access. For Eswatini the first available data about electricity access are dated by 2001 when the level of total access to electricity was only 27%. In 2017, it grew up to 74% with rising the urban access from 53% to 93% and the rural access from 19% to 67%. From 2000 to 2017 Kenya has also shown a high-positive dynamic with a rising access level for the total population from 15% to 64%. The access level for urban population grew up almost twice – from 50% to up 81 %, and the access level for the rural population – from 7% to 58%. Today, the country's energy policy is aimed to reach universal access by 2022, and the grid would be the main least-cost solution for most of the population with lacking access. In Senegal, the total access level was increased from 38% in 2000 to 62% in 2017, wherein the access level in urban areas increased from 75% to 92%, and the access level in rural areas rose from 13% to 35%. With a successful energy policy regarding the electrification and the adoption of a comprehensive integrated plan, it is planned to achieve full access in 2025. The grid represents the least-cost option for most of the population in this country, which are currently without access to electricity. For rural and most remote areas the decentralized solutions are foreseen. In 2000, among these countries, the worst situation with electrification was in Lesotho, where only 4% of the total population had access to electricity. In 2017 this indicator grew up to 34 % together with rising level of access for the urban population from 14% to 70%, and for the rural population – from 2% to 20%. A few years ago, Lesotho established its energy policy for 2015-2025 with the target of reaching total access to electricity for 40% of the total population for 2020. In the country's energy policy, renewable energies were indicated as one of the tools for increasing access

to electricity and it was also planned to develop the program on renewable energy feed-in-tariffs to attract investments.

The selected countries varied significantly not only in the electrification rate but also by numbers of inhabitants and the pattern of population. Defining the number of people and households without access to electricity in selected developing Sub-Saharan countries can be used as a background for further studying the projected electricity demand caused by electrification. From the practical point of view, defining the value of electricity demand projected for the country under its electrification will help to evaluate the installation capacities needed to cover demand as well as the necessary investment. Based on the average household size and amount of populations in these countries [11-12], the number of people and households without access to electricity were calculated. The results are given in Table 2.

Table 2. Populations and households without access to electricity in selected countries, 2017

Country	Average household size	Population without access, mln			households without access, mln		
		total	urban	rural	total	urban	rural
Cabo Verde	4.2	0.04	0.020	0.019	0.009	0.005	0.004
Eswatini	4.7	0.30	0.018	0.282	0.064	0.004	0.060
Lesotho	3.3	1.40	0.181	1.212	0.423	0.055	0.367
Senegal	8.3	6.07	0.621	5.411	0.732	0.075	0.652
Kenya	3.9	18.60	2.630	15.912	4.769	0.674	4.080

The worst state with access to electricity in the number of populations and households was observed for Kenya. In 2017, in this country, the number of populations without access was equal to 18.60 million people.

The quantitative indicators obtained, together with the values of average annual electricity consumption per capita or per household, will make it possible to make forecasts regarding the demand for electricity caused by electrification in the investigated countries.

Today the implementation of targets on improving access to electricity needs the deployment of innovative energy solutions. They are conducted in the context of the existing Agenda about the sustainable economic development of Sub-Saharan countries and addressing access to electricity. There exist significant opportunities for these countries in the renewable energy sector, but this potential remains mostly unused. The development of society and the formation of sustainable economies require reforms in the electricity sector. The global tendencies in innovative energy solutions must also be launched for the energy transition in these countries to implement the following tasks: decarbonization, decentralization and digitization. Over the past decade, innovative reform in energy sectors has widely deployed throughout the world. Recently, there has been growing interest in the development and implementation of innovative approaches to the organization and functioning of electricity markets. Significant attention is paid to the formation of energy communities and local electricity markets. All these tendencies must be taken into account under the implementation of innovative energy solutions in Sub-Saharan countries. Based on Sustainable Development Goal 7 on ensuring access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all, the several options have been modelled by IEA for improving the electrification of the Sub-Saharan countries. The further discussion about the deployment of energy innovations for improving access to electricity is given together with technical measures projected by the IEA modelling and opinions concerning the economic viability of suggested solutions [13-16].

According to the IEA projections, there is no single universal approach regarding access to electricity and the practical solutions will be different in different countries. There are three options for improving access to electricity in Sub-Saharan countries. By the first on-grid option, access to electricity for households will be provided through a connection to the local network, which is linked to the transmission network, or through the extension of the existing grid. For this case, electricity supply is usually provided through the operation of large centralized power plants operating on typical conventional resources such as coal, natural gas, and hydro. However, in some circumstances, the improvement of access in the frame of this option will be realized through the implementation of distributed generation. This case involves the installation of solar photovoltaic systems or biogas plants and connection to the grid at low voltage. The on-grid option of extending access to electricity is considered by the IEA as the least costly. But investments in the development of transmission and distribution networks will have economic benefits only under certain conditions. The most important among them are the high density of potential consumers, their closeness to existing networks, as well as the appropriate region terrain.

The second option for extending access to electricity is the installation of mini-grid systems. This option is offered for those areas where, for various reasons, electricity supply cannot be provided with the on-grid option. Thus, mini-grid system is a local solution for electrification designed to serve customers in a certain region. Technically, a mini-grid system can be described as a combination of three subsystems: a production system for

generating electricity, a distribution system for delivering electricity to customers, and an end-user system for connecting and providing customers with electricity. This type of system does not have infrastructure for electricity transmission outside the served region. Mini-grid systems operate due to a set of small-scale electricity generators based on available renewable energy resources (such as solar photovoltaic modules, wind turbines, small-scale hydropower plants etc.) as well as the diesel generators. But electricity generation by solar and wind installations is intermittent and cannot be completely predictable. For the stable operation of mini-grid systems, small low-power diesel generators and energy storages (like back-up battery systems) are also required. From an economic point of view, supplying electricity to customers via mini-grid system usually requires higher costs. To attract investment, an initial level of demand for electricity in the served region is needed. In most cases, this must be confirmed by a certain level of electrical load of public, industrial and commercial facilities and services. The mini-grid option will also give economic benefits when trading in electricity in rural areas with a fairly dense population.

The third option for extending access to electricity is related to off-grid systems or stand-alone systems. This option will be the most cost-effective for electrification of sparsely populated and remote areas. Technically, the stand-alone system is composed of one or more electrical generators and is not connected to transmission and distribution systems. It operates independently by providing electricity to several individual households. One of the benefits of stand-alone systems with renewable energy technologies is that they can be designed for any scale to cover basic household electricity needs, and can be scaled-up in the event of increasing demand. From an economic point of view, stand-alone systems can be considered as a cost-competitive solution under declining the cost of the components that make up off-grid systems. However, among the other available options for extending access to electricity, the levelised costs of electricity, considered as the ratio of the sum of all costs over the lifetime to the total amount of electricity generated over the lifetime, is still the highest for stand-alone systems.

Nevertheless, reforming the energy sectors using any of the previously discussed options requires modern solutions that should not be limited to existing traditional measures on improving access to electricity. Delivering modern energy services to rural communities and remote areas also requires the dissemination of digital technologies in Sub-Saharan countries.

The growing rate of electrification will lead to an increasing demand for electricity. As shown above, the practical realization of an innovative solution will also require forecasts regarding electricity demand, which should be met along with improved access to electricity.

### **Conclusions**

For future growth, overcoming poverty, and private sector development, innovative solutions are needed to expand access to electricity. The indicator-based qualitative and quantitative analysis was applied to compare Sub-Saharan countries by their ability to attract investments in innovative energy solutions. The middle-income economy, the institutional and social stability, the acceptable level of security, the lasting economic growth, and the rate of electrification were chosen as the key criteria attractive for investments in the energy sector.

Matching the results of the indicator-based qualitative and quantitative analysis of Sub-Saharan countries, it is possible to say that only 7 countries from 48 examined ones – Cabo Verde, Eswatini, Kenya, Lesotho, Mauritius, Senegal, and Seychelles – have the highest potential to attract investments in innovative energy solutions to expand access to electricity. Over the past two decades, in these countries, the level of access to electricity for the entire population, urban and rural population, has been constantly increasing. Such tendencies were also enforced by the respective goals and strategic plans of the energy policies of these countries.

Since there is no single universal approach regarding access to electricity and practical solutions to this problem will be different in different countries, three main options as innovative solutions for improving access to electricity in selected Sub-Saharan countries may have the following order of priority from a technical point of view, namely: stand-alone (off-grid) systems, mini-grid systems, and on-grid systems. But from an economic point of view, they may have the opposite order of priority and will have economic benefits only under certain conditions, such as the high density of potential consumers, their closeness to existing networks, the appropriate region terrain, and the cost of elements that make up the system.

Increasing rates of electrification will increase electricity demand. Any practical realization of any of the innovative solutions will require forecast of electricity demand, which must be met along with improved access to electricity. Defining the level of access to electricity for selected developing Sub-Saharan countries together with the suggested indicators can be used as a background for forecasting electricity demand in countries under electrification.

### **References**

1. Regional economic outlook. Sub-Saharan Africa: navigating uncertainty / International Monetary Fund, 2019. – 65 p.
2. IEA (2019), Africa Energy Outlook 2019, IEA, Paris. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019>



3. IEA (2019), SDG7: Data and Projections, IEA, Paris. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections>
4. Analysis from Africa Energy Outlook 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/articles/senegal-energy-outlook>
5. Blimpo, Moussa P., and Malcolm Cosgrove-Davies. 2019. Electricity Access in Sub-Saharan Africa: Uptake, Reliability, and Complementary Factors for Economic Impact. Africa Development Forum series. Washington, DC: World Bank. – 140 p. doi: 10.1596/978-1-4648-1361-0.
6. Diacon, P.E. and Maha, L.G. The relationship between income, consumption and GDP: A time series, cross-country analysis. Procedia Economics and Finance, Vol. 23, 2015. -pp.1535-1543. doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00374-3.
7. Encinas-Ferrer, Carlos, and Eddie Villegas-Zermeño. "Foreign direct investment and gross domestic product growth." Procedia Economics and Finance 24 (2015): pp. 198-207.
8. Classification of Fragile and Conflict-Affected Situations. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/en/topic/fragilityconflictviolence/brief/harmonized-list-of-fragile-situations>
9. [West M. Developing high quality data models / Morgan Kaufmann Publishers. Elsevier, 2011. – 389 p.](#)
10. The World Bank. Data. Access to electricity (% of population) [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>
11. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. [Online]. Available: <https://population.un.org/Household/index.html#/countries/840>
12. World Bank | Data 2018. [Online]. Available: <https://www.worldbank.org/>
13. Sustainable development goal 7. Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg7>
14. Defining energy access: 2019 methodology. [Online]. Available: <https://www.iea.org/articles/defining-energy-access-2019-methodology>
15. [IRENA \(2019\), Innovation landscape brief: Utility-scale batteries, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.](#) [Online]. Available: [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications)
16. Advancing renewables in developing countries / IRENA and ADFD, 2019. – 48 p.

УДК 621.311+620.91

Г.Г. Стрелкова, канд. фіз.-мат наук, ORCID 0000-0002-5708-1134  
М.Т. Стрелков, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., ORCID 0000-0002-4320-7162  
І. Данго, магістр  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **ІНДИКАТОРНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ РОЗГОРТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ РОЗШИРЕННЯ ДОСТУПУ ДО ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В КРАЇНАХ НА ПІВДЕНЬ ВІД САХАРИ**

*У статті було проведено індикаторний аналіз оцінки передумов розгортання інноваційних енергетичних рішень в країнах на південь від Сахари для розширення доступу їх населення до електроенергії. Цей тип аналізу був використаний для оцінки стану досліджуваних країн на південь від Сахари за певними критеріями протягом визначеного періоду часу щодо їх здатності залучати інвестиції в інноваційні енергетичні рішення для розширення доступу до електроенергії. Визначено критерії та показники, необхідні для оцінки передумов розгортання інноваційних енергетичних рішень у країнах на південь від Сахари в рамках індикаторного аналізу. В якості ключових критеріїв, привабливих для інвестицій в енергетику, були обрані економіка із середнім рівнем доходу, інституційна та соціальна стабільність, прийнятний рівень безпеки, тривале економічне зростання та динаміка електрифікації. Критерії ґрунтувалися на наборі універсальних типових показників, які визначають стан економічного, інституційного та соціального середовища в різних країнах в однакових якісних визначеннях та кількісних ознаках. Щоб уникнути упередженості висновків та зменшити вразливість процесу прийняття рішень, для обробки даних були застосовані засоби інформаційного моделювання. Гуртуючись на цих засобах, була розроблена бінарна таблична матриця для управління та упорядкування описових інформаційних даних про країни. В результаті індикаторного аналізу була визначена група країн на південь від Сахари, яка підтвердила критерії для залучення інвестицій в інноваційні енергетичні рішення. Ці країни були детально проаналізовані щодо динаміки електрифікації. Було оцінено кількість жителів без доступу до*



*електроенергії та приблизну кількість домогосподарств, яким потрібно отримати доступ до електроенергії. Також були розглянуті можливі інноваційні рішення для поліпшення доступу до електроенергії.*

**Ключові слова:** *індикаторний аналіз, рівень електрифікації, інноваційні рішення, країни на південь від Сахари.*

Надійшла 14.12.2019

Received 14.12.2019

Z. Weijie, postgraduate PhD, ORCID 0000-0001-8537-8528  
 G. Varlamov, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 000-0002-4818-2603  
 National Technical University of Ukraine  
 “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
 S. Rongfeng, Bachelor, Prof.  
 L. Suxiang, Master, Prof.  
 Energy Research Institute of Shandong  
 Academy of Sciences (Jinan, China)

## EXPERIMENTAL STUDY OF FEATURES BIOGAS PRODUCTION BY PYROLYSIS OF CORN PELLETS

*The material in the article contains useful information for studying and analyzing the production processes of biogas with a low tar content by pyrolysis and gasification of corn straw pellets in a composite fixed bed of a pilot plant. The results show good adaptability of the installation to this fuel, the ability to ensure optimal temperature distribution in each zone. Temperature control in the resin cracking zone is carried out by supplying the required volume of secondary air, which can significantly reduce the presence of resin in biogas while maintaining the calorific value of the gas at 4700 kJ/nm<sup>3</sup>.*

**Key words:** biomass; pellets; pyrolysis; gasification; resin cracking; biogas, environmental cleanliness.

### Introduction

The modern world challenge is that mankind needs to move to sustainable development with a stable rate of energy production in compliance with the basic principle of development of the fuel and energy complex - the principle of ecological balance [1]. Recently, the world has formed the opinion that energy facilities should not use organic (fossil) fuel and nuclear energy for the subsequent increase in energy capacities in connection with negative environmental consequences. As an alternative energy source, it is advisable to consider the use of biomass for these purposes.

Table 1. Data on the energy use of biomass (BM) in different countries [4]

Indicators	USA	Denmark	Austria	Sweden	Finland
BM share of total energy resource consumption	3,2	6,0	12,0	18,0	23,0
Share of different types of BM in total energy production from BM.%:					
- Firewood	85	37,0	74,2	83,0	73
- Straw	-	24,7	-	-	-
- Liquid fuel	5,5*	-	-	-	-
- Peat	-	-	-	4,8	25,2
- Solid household waste	9,5	40,5	18,9	5,2	1,8
- Biogas	5,5*	0,33	-	-	-

\* – This figure is a combined indicator for biogas and liquid fuel.

Table 2. Energy potential of biomass in Ukraine [4]

Type of biomass	Croppage, million tons	Waste coefficient	Accessibility coefficient	Amount of wastes, million tons	Q <sup>h</sup> , MJ/kg	Amount of BM, accessible near energy receiving		Energy potential of BM, accessible to energetics	
						%	million tons	PJ	million tons
Cereals	28,53	1,771	0,85	42,95	15,7	20	8,59	134,8	4,6
Corn for grains	5,34	1,2	0,7	4,49	13,7	50	2,24	30,72	1,05
Sugar beet	17,66	0,4	0,4	2,83	13,7	50	1,41	19,36	0,66
Sunflower	2,31	3,7	0,7	5,97	13,7	50	2,99	40,94	1,39
Wood	5,94	0,55	0,9	2,94	15,0	40	1,18	17,65	0,60
Manure (dry substance)	7,39	—	0,62	4,58	15,0	100	4,58	68,7	2,34
Total	—	—	—	63,76	—	—	20,98	312,15	10,64

At the same time, the sustainable development of industrial potentials of various countries should be based on the stable development of energy production at a pace that should outpace the pace of energy consumption of all sectors combined [2]. A promising paradigm for the development of the energy industry, it is advisable to name the New energy-ecological paradigm [3], which reads: "Sustainable development in harmony with nature."

In this sense, it is advisable to pay attention to renewable energy sources. Solar and wind energy can not be fully used as stable sources of energy production to satisfy axioms, principles and development paradigms [1-3] of energy industry. In this regard, the most favorable is the possibility of a more rational use of biomass for energy production as one of the types of renewable energy sources [4].

Recently, more and more attention has been paid to this type of energy source, since the use of biomass in the process of production of heat and electric energy solves a set of problems: obtaining energy and processing agricultural waste. Table 1 shows data on the level of bioenergy development in developed countries [4].

Table 2 presents the energy potential of biomass (BM) in Ukraine [4], which is now actively considered as an alternative to using fossil fuels in energy production processes [5].

**The purpose and objective of the study**

The aim of the research is to study the process of pyrolysis of biomass fuel pellets obtained from corn straw using an experimental gasification unit in a composite fixed layer with determination of the structure and optimal conditions for the pellet gasification to produce biogas with a low resin content.

The objective of the research is to study the gasification characteristics of corn pellets in the gasifier of a composite fixed layer depending on the amount of primary and secondary air supplied, determine the temperature and depth of the pyrolysis reaction, determine the temperature distribution in the furnace and in the cracking zone of the resin, the effect of temperature on the depth of cracking of the resin, and the effect of the volume of secondary air on the thermal value of the obtained biogas.

Compared with other energy production technologies, the use of biomass energy has two technological routes: direct combustion and gasification, which can use biomass on a large scale [6]. Power plants with direct biomass burning, in which coal is replaced by agricultural and forest waste, significantly contribute to the use of biomass energy [7,8].

However, the efficiency of using direct biomass burning is low due to its low specific gravity, inconvenient collection, storage and transportation [9-11]. Moreover, biomass energy is the only material energy with carbon among all types of renewable energy, so it's a pity to use it directly as coal.

The technical route of gasification utilization can realize the co production of biomass gas, biomass carbon and wood vinegar according to the regional resource status. It can also realize the combined power supply of electricity, gas, cold and heat according to the regional energy demand. According to the investment scale, the technical route of gasification can further extend the development of biomass chemical industry, such as hydrogen production from biomass, methanol production from biomass and dimethyl ether production from biomass. With the development of biomass gas tar removal and purification technology, the tar problem in gasification utilization has been solved gradually. The utilization of gasification technology for the comprehensive utilization of agricultural and forestry wastes has attracted more and more attention of researchers. Ukraine and China has a wide corn planting area and rich corn straw resources. It is widely used to compress corn straw into pellet fuel by pelletizer to improve its bulk density and energy density. In this case, it is possible to widely use the compression of corn straw into granular fuel using a granulator in order to improve its bulk density and specific calorific value.

**Corn straw pellet fuel**

To create effective technological processes of energy conversion based on the use of pellet fuel, it is necessary to take into account its characteristics for the management of gasification processes based on pyrolysis. Element analysis, industrial analysis, heat value and ash fusibility test were carried out for corn straw pellet fuel according to relevant test standards. The analysis results are shown in Table 3. According to the results of element analysis of fuel, the theoretical air quantity is calculated, and different gasification equivalence ratio is selected to determine the sum of primary and secondary air volume. The results of industrial analysis can be used to determine the ratio of primary and secondary air volume. The heat value analysis can provide a basis for determining the raw material treatment capacity according to the volume load of the gasification unit. The ash fusibility of pellet fuel can be used to guide the determination of the upper temperature limit of the combustion zone in the test run, so as to avoid excessive fuel slagging.

Table 3 - Comprehensive analysis of the properties of corn straw fuel pellets

Elemental analysis (%)		Component composition (%)		Thermal dynamics (°C)		Low heat value (kJ/kg)
C	31,19	Volatile matter	54,68	Deformation temperature	1030	
H	4,24	Fixed carbon	13,31	Softening temperature	1050	
O	31,31	Moisture content	3,93	Hemisphere temperature	1080	
N	0,96	Ash content	28,07	Flow temperature	1100	
S	0,29	Volatile matter	0,01	Flow temperature	1100	

### Introduction to the pilot plant of low tar gasification in composite fixed bed

The traditional biomass fixed bed gasification devices are mainly divided into two types: up draft and down draft [12,13]. The up draft gasifier has high gasification and thermal efficiency, but it has the disadvantages of high tar content of crude gas and. The quality of gas produced by the down draft gasifier is stable, and the amount of tar formed by the down draft gasifier is lower than that of the up draft gasifier. However, the down draft gasifier has the disadvantages of low gasification efficiency and thermal efficiency. In the process of biomass pyrolysis and gasification, tar components are formed in the stage of fuel pyrolysis and decomposed in the stage of high temperature oxidation [14,15]. The thermal decomposition of tar components is mainly related to temperature [16,17]. However, in the traditional fixed bed gasifier, no matter up draft or down draft, the reaction stages of pyrolysis, combustion and reduction are not clearly separated in the furnace space which makes the two forms of gasifier difficult to provide a stable high temperature environment for tar cracking in physical space. The composite fixed bed low tar gasifier involved in this study integrates the advantages of the up draft fixed bed and the down draft fixed bed. In the composite gasification unit, the internal pyrolysis tube is used to separate the space in the furnace, and the three stages of the gasification process, namely dry pyrolysis, combustion reduction and tar cracking, are relatively separated in the same unit.

The pilot plant of this study is shown in Figure 1. The inner diameter of the gasifier is 1,5 m, the height is 4m, and the raw material processing capacity is 0.4 t/h. The diameter of corn straw pellet fuel is 8 mm, its length is 20-50 mm, and its bulk density is about 650 kg/m<sup>3</sup>.

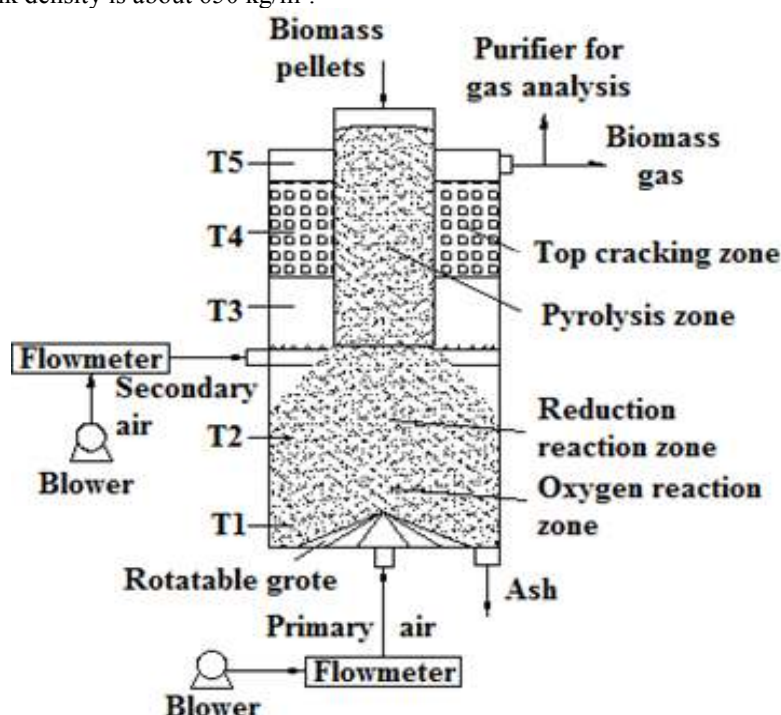


Fig. 1 - Scheme of experimental setup for studying biomass gasification processes in a composite stationary layer

The pellet fuel is uniformly and continuously fed into the gasifier from the top of the gasifier. Firstly, the fuel is indirectly heated by high temperature gas at about 1000 °C in the pyrolysis zone to carry out pyrolysis reaction. The generated pyrolysis gas is led to the middle of the gasifier by the induced draft fan and burns with the secondary air. A small part of the pyrolysis gas is burned through the control of the secondary air volume. A slight decrease in the heat value of the pyrolysis gas causes the combustion temperature to remain around 1100 °C. After partial combustion, the pyrolysis gas heated up the tar cracking area in the gasifier. The tar cracking area is built with heat storage bricks. The cracking zone absorbs the sensible heat of the pyrolysis gas and forms a high temperature field to crack the tar in the pyrolysis gas into small molecule non condensable gas, so as to remove the tar in the furnace. The fuel is pyrolyzed in a pyrolysis tube to produce semi coke. Under the action of gravity, semi coke forms a carbon layer about 1.8m high above the grate. The primary air at the bottom of the furnace is evenly distributed through the annular gap of the tower grate and then sent into the furnace. Under the action of primary air, the carbon in the upper part of the grate is completely burned, and the generated ash is discharged out of the grate continuously by the rotary grate and then cooled by the slag cooler. The generated flue gas will go up through the carbon layer to generate carbon monoxide, which will be discharged from the top of the gasifier together with the pyrolysis gas.

The speed of induced draft fan, primary fan and secondary fan can be adjusted by frequency conversion. The

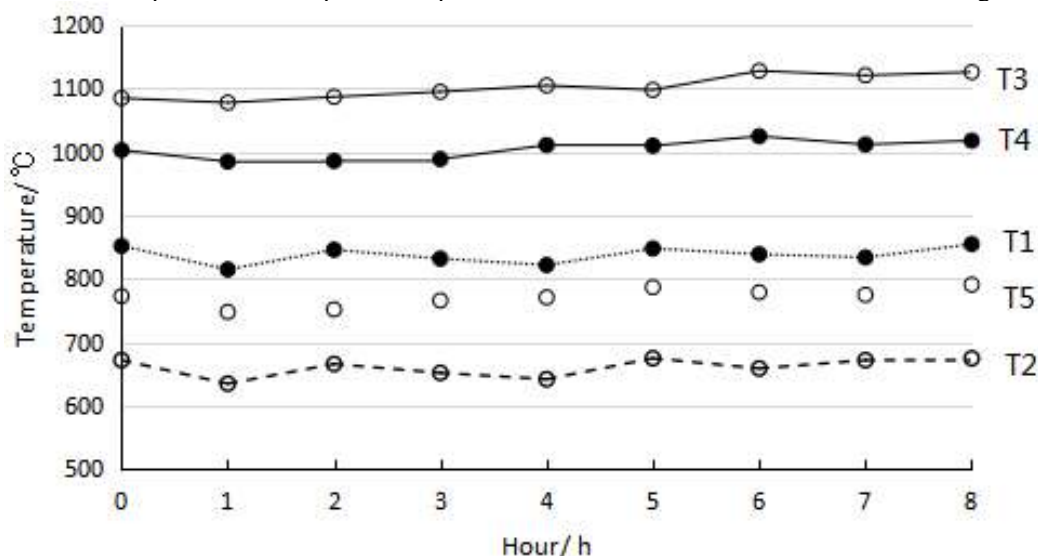
gasifier body is equipped with five temperature measuring points, and the temperature of five areas, including combustion area, reduction area, gas combustion area, tar cracking area and gas outlet area, is detected respectively from T1 to T5. The gas sampling port is connected by the infrared gas analyzer (Gasboard-3100p), and the gas composition is detected and recorded online.

#### Experimental results and their analysis

Through the experiment, the gasification characteristics of corn straw pellet fuel in the composite fixed bed gasifier were studied. By adjusting the parameters of primary air quantity, secondary air quantity and feed quantity, the temperature and reaction depth of each reaction zone are controlled. The temperature distribution in the furnace, the influence of secondary air volume on the temperature of tar cracking zone, the influence of temperature of tar cracking zone on tar cracking and the influence of secondary air volume on the heat value of gas were studied.

#### Temperature distribution in the furnace

During the operation of biomass gasification plant, the change of temperature in the furnace is a direct characterization of chemical reaction. With corn straw particles as fuel, the gasification unit has reached a stable operation state after a period of start-up. The temperature of each zone in the furnace is shown in Figure 2.



T<sub>1</sub>-temperature of the oxidation zone; T<sub>2</sub> - temperature of the reduction zone; T<sub>3</sub> - temperature gas oxidation zone; T<sub>4</sub> - temperature of tar cracking zone; T<sub>5</sub>- temperature of biomass gas outlet point

Fig. 2 - Temperature distribution in the furnace during the study period

When the temperature T<sub>1</sub> of the oxidation zone at the bottom of the installation (Fig.1) is between 810 °C and 860 °C, the biomass carbon is oxidized by the action of primary air. The reaction rate depends on the rate of chemical reaction of the interaction of oxygen and carbon on the surface of carbon particles. In other words, oxidation is largely controlled by dynamic factors. In the experiment, the temperature of the oxidation is controlled in a reasonable range by adjusting the primary air volume. On the one hand, overtemperature T<sub>1</sub> above 800 °C can provide enough heat for reduction zone. On the other hand, it should be below 900 °C to avoid slugging. The temperature of the reduction zone T<sub>2</sub> is between 640-690 °C, which means that the temperature of the reduction reaction between C and CO<sub>2</sub> remains high after the completion of the reduction reaction, so as to ensure that the reduction reaction can be carried out normally. The temperature T<sub>3</sub> of gas oxidation zone is in the range of 1080-1130 °C. The temperature of tar cracking zone T<sub>4</sub> ranges from 980 °C to 1025 °C. By controlling the air intake of the secondary air burner, a small part of the pyrolysis gas is burned to provide the heat needed to maintain the high temperature in the tar cracking area. The outlet temperature T<sub>5</sub> is between 750 °C and 790 °C. The temperature difference between T<sub>5</sub> and T<sub>4</sub> within 200 °C indicates that the heat is continuously supplied to the new fuel entering the pyrolysis drum and the cracking heat of the tar components in the tar cracking zone.

#### Influence of secondary air volume on temperature of tar cracking zone

The volatile content of corn straw pellet fuel is 54.68 %. After the fuel is indirectly heated in the pyrolysis tube, the volatilization analysis goes into the gas combustion area. The pyrolysis gas can react with the secondary air quickly when the ambient temperature is higher 300 °C. As shown in Fig. 3, under the condition of stable feed and ash output, the secondary air intake is adjusted to 130 Nm<sup>3</sup>/h, 200 Nm<sup>3</sup>/h and 270 Nm<sup>3</sup>/h respectively by motor frequency conversion, and the temperature changes of tar cracking zone T<sub>4</sub> is investigated. With the increase of secondary air volume, the combustion share of pyrolysis gas transported from pyrolysis cylinder is increasing, and the temperature T<sub>4</sub> of tar cracking zone is increasing. This shows that the design of the secondary air burner is reasonable and the method of adjusting T<sub>4</sub> by adjusting the secondary air volume is feasible.

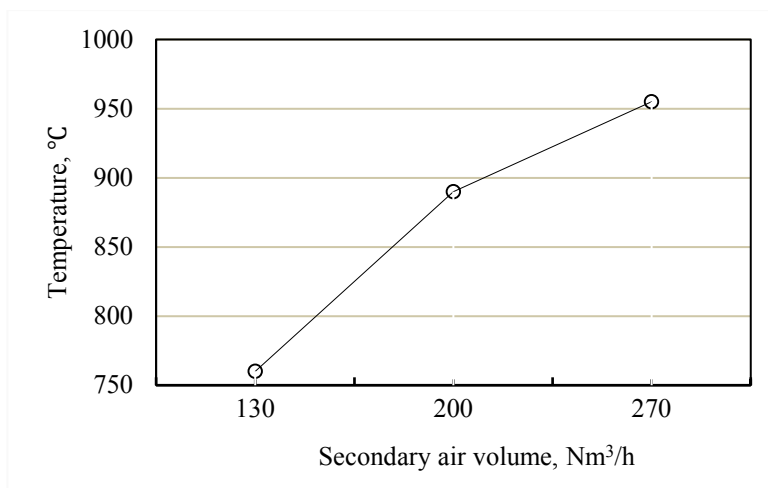


Fig. 3 - The influence of secondary air flow on temperature  $T_4$  of tar cracking zone

#### Effect of temperature in tar cracking zone on tar cracking

As shown in Table 4, after high temperature cracking at 1060 °C, the hydrogen content in the biomass gas increased from 16,77 % to 20,82 %. Other components in the biomass gas such as CO, CH<sub>4</sub> and C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> all decreased in varying degrees. In particular, the content of light hydrocarbon gas C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> decreased from 4,03 % to 0,49 %.

Table 4 - Biogas composition data

Sample number	Temperature in tar cracking zone (°C)	H <sub>2</sub> volume percent (%)	CO volume percent (%)	CH <sub>4</sub> volume percent (%)	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> volume percent (%)	Tar content (mg/Nm <sup>3</sup> )
1	750	16,77	19,26	5,17	4,03	1875,41
2	1060	20,82	18,03	2,24	0,49	19,56

This is because the tar group of larger molecules is split into light hydrocarbon components, and the light hydrocarbon is further split into CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>. The significant decrease of the proportion of light hydrocarbon gas indicates the almost complete cracking of tar components in the furnace. The tar content in the gas is detected by sampling. The test results are shown in Table 4. When the temperature of tar cracking zone is 750 °C, the tar content is 1875,41 mg/Nm<sup>3</sup>. When the temperature of tar cracking zone increased to 1060 °C, the tar content decreased to 19,56 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### Influence of secondary air volume on heat value of gas

As shown in Figure 4, when the secondary air volume is 130 Nm<sup>3</sup>/h the heat value of gas is as high as 7266 kJ/nm<sup>3</sup>. As the volume of secondary air increases, more pyrolysis gases participate in the oxidation reaction and the flue gas mixes with the not yet oxidized combustible components so that the calorific value of the biomass exhaust gas decreases.

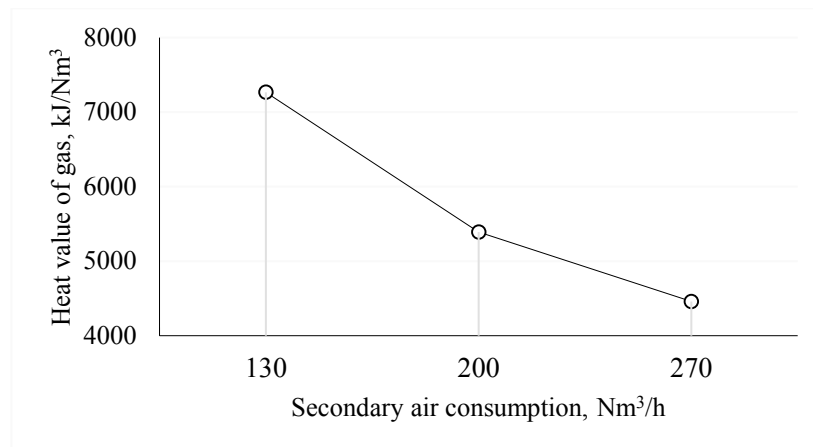


Fig. 4 - Influence of secondary air consumption on the heat value of biogas

When the secondary air volume increases to 270 Nm<sup>3</sup>/h the heat value of gas decreases to 4460 kJ/Nm<sup>3</sup>. The constancy of gas oxidation zone T<sub>3</sub> temperature about 1060 °C and tar cracking zone T<sub>4</sub> temperature about 955 °C provides a relatively stable high temperature environment for the cracking zone of tar components. It is feasible to use the energy of pyrolysis gas to create a high temperature field in the cracking zone of tar in order to remove the tar components in the gas.

### **Conclusions**

1. The use of energy from burnt fossil fuels and nuclear fission in nuclear reactors for energy production at energy facilities has recently been limited for a number of reasons, one of which is a negative impact on the environment.
2. As an alternative source of energy, it is advisable to consider the use of biomass for these purposes.
3. The study of the gasification characteristics of fuel pellets from corn straw was carried out using an experimental gasification unit in a composite fixed bed and allowed to obtain positive results.
4. The results of the study provide useful information for the production of biogas for energy purposes by pyrolyzing biomass and producing biogas without burning tar.
5. A stable equilibrium of the chemical reaction in the installation was achieved in the pyrolysis zone, the reduction zone, the gas oxidation zone and the resin cracking zone by optimizing the temperature distribution in each of these zones.
6. The 1000 °C high-temperature cracking zone of the resin can be adjusted in the furnace by adjusting the secondary air supply. This zone can separate almost all groups of resins in biogas.
7. Flexible adjustment of the secondary air supply for the gasification of pellets in a gas generator with a composite fixed bed allows optimizing the high-temperature medium for cracking the resin while maintaining the calorific value of biogas at 4700 kJ / nm<sup>3</sup>.
8. The ability to control the volume of secondary air supply allows you to accurately maintain the required temperature in the cracking zone of the resin with a decrease in its content in biogas.
9. The results obtained make it possible to achieve high gasification of corn pellet granules for biogas production with high ecological purity, which contributes to the increase in their use in energy production processes with the simultaneous utilization of agricultural waste.

### **References**

1. G. Varlamov, O. Daschenko, S. Kasianchuk, M. Ocheretyanko. The principle of ecological equilibrium as a key to increasing environmental security. Collective monograph. Sustainable development of the 21st century: management, technology, models, 590 c. Bielsko-Biala (PL), Kiev (UA) 2016, -C. 153-158.
2. G. Varlamov, Jie Shi. Sustainable development in harmony with nature: axioms and principles of a new energy-ecological paradigm. -C. 361-369. / Sustainable development - 21st century: management, technologies, models. Discussions 2018: a collective monograph / Minenko MA, Bendyug VI, Komarista BM [etc.]; NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; National University of Kyiv-Mohyla Academy; Higher School of Economics and Humanities / in science. ed. prof. Khlobistova EV - Kyiv, 2018. - 620 p. Adopted by Academic Council No. 12; date 14/12/2018.
3. G. Varlamov, O. Dashchenko, K. Romanova. Sustainable development of megacities on the basis of the introduction of a new ecological-energy paradigm / IV International Scientific Conference on Sustainable Development - 21st Century: Governance, Technologies, Models. Discussions 2017: collective foreign monograph, 11.05.2017, -C.355-358.
4. G. Varlamov, Yu. Landau, V. Malyarenko, K. Priymak. Environmental aspects of energy generation. Power engineering within renewable sources: tutorial allowance. - K.: NTUU "KPI", 2014. - 376 p.
5. G. Geletukha, V. Kramar, A. Epik T. Antoshchuk, V. Titkov. Comprehensive analysis of the Ukrainian market of biomass pellets. -K.: United Nations Development Program, 2016.- 334 p.
6. N. Scarlatn, J. Dallemand and F. Monforti. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts/ Environmental Development, no. 15, pp. 3-34, 2015.
7. Y. Zhenhong, W. Chuangzhi, M. Longlong. Principle and technology of utilization of biomass energy. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
8. F. Fabby, C. Rehmet, V. Rohani. Waste gasification by thermal plasma: A review/ Waste & Biomass Valorization, no. 4, pp. 421-439, 2013.
9. Y. Guolai. Experimental study on catalytic pyrolysis of biomass in a fluidized bed/ Huazhong University of Science and Technology, 2007.
10. H. Junjun, H. Chengpeng, D. Jun. Present situation and Prospect of straw power generation technology / Energy and Environment, no. 5, pp. 95-97, 2006.
11. S. Changdong, Z. Jun. Characteristics and advantages of co-combustion biomass power generation technology in pulverized coal fired boiler / Heat Generate Electricity, no. 3, pp.10-11, 2006.
12. S. Deren, Y. Xiuli, W. Chuangzhi. Study on synthesis gas from biomass fluidized bed oxygen rich



gasification /Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, vol. 3, no. 42, pp. 100-104, 2011.

13. <https://www.dissertationtopic.net/school/Nanjing+Normal+University/> Experimental study on the characteristics of low temperature pyrolysis carbonization and denitrification by reburning way of biomass. Dissertation W. Qinchao: Nanjing Normal University, 2012.

14. [https://www.google.com/search?rlz=1C1AOHY\\_ruUA835UA835&sxsrf=ALeKk00xOBQr0p7YGm5608NjPp1Eyh1cPw%3A1587546341725&ei=5QigXqfsK6-Ik74P6aarsAI&q=National+Renewable+Energy+Laboratory%2C+report+1998&oq=National+Renewable+Energy+Laboratory%2C+report+1998&gs\\_lcp=CgZwc3ktYWlQAzoECCMQJzoFCCEQoAE6CAghEBYQHRAeULoUWPpJYOWIAWgBcAB4AIABpgGIAeoHkgEDMi43mAEAoAEBqgEHZ3dzLXdppeg&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwjn8oz-1vvoAhUvxMQBHWnTCiYQ4dUDCAw&uact=5](https://www.google.com/search?rlz=1C1AOHY_ruUA835UA835&sxsrf=ALeKk00xOBQr0p7YGm5608NjPp1Eyh1cPw%3A1587546341725&ei=5QigXqfsK6-Ik74P6aarsAI&q=National+Renewable+Energy+Laboratory%2C+report+1998&oq=National+Renewable+Energy+Laboratory%2C+report+1998&gs_lcp=CgZwc3ktYWlQAzoECCMQJzoFCCEQoAE6CAghEBYQHRAeULoUWPpJYOWIAWgBcAB4AIABpgGIAeoHkgEDMi43mAEAoAEBqgEHZ3dzLXdppeg&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwjn8oz-1vvoAhUvxMQBHWnTCiYQ4dUDCAw&uact=5) / Biomass gasifier “tars”: their nature, formation and conversion. T. Milne, N. Abatzoglou and R. Evans. Technical Report National Renewable Energy Laboratory. Information Resources Catalogue, 1998.

15. [https://ru.qwe.wiki/wiki/Energy\\_Research\\_Centre\\_of\\_the\\_Netherlands](https://ru.qwe.wiki/wiki/Energy_Research_Centre_of_the_Netherlands) / The Energy Research Centre of the Netherlands: H. Boerrigter, V. Paasen and P. Bergman. Section "Biomass", report 2005.

16. <https://www.zju.edu.cn/english/research/list.htm> / Experimental and mechanism research on biomass gasification and catalytic tar cracking. Dissertation Z. Xiaodong: Zhejiang University, 2003.

17. S. Bhattacharya, A. Mizanur and H. Pham “A study on wood gasification for low-tar gas production”, Energy, no. 24, pp. 281-283, 1999.

**УДК 620.952**

**Ч. Вейце**, PhD-аспірант, **ORCID** 0000-0001-8537-8528

**Г. Варламов**, д.т.н., професор, **ORCID** 000-0002-4818-2603

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**С. Ронгфенг**, бакалавр, науковий співробітник

**Л. Сусянг**, магістр, провідний науковий співробітник

**Дослідницький інститут енергетики Академії**

**наук провінції Шаньдун (Цзинань, Китай)**

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ ПРОЛІЗОМ КУКУРУДЗЯНИХ ПЕЛЕТ**

*Матеріал статті містить корисну інформацію для вивчення та аналізу виробничих процесів отримання біогазу з низьким вмістом смоли шляхом піролізу і газифікації гранул кукурудзяного соломки в композитному нерухомому шарі експериментальної установки. Результати показують хорошу пристосованість установки до цього палива, можливість забезпечення оптимального розподілу температури в кожній зоні. Контроль температури в зоні крекінгу смоли здійснюється шляхом подачі необхідного обсягу вторинного повітря, що дозволяє значно зменшити присутність смоли в отриманому біогазі при збереженні теплотворної здатності газу на рівні 4700 кДж / нм<sup>3</sup>.*

**Ключові слова:** біомаса; пелети; піроліз; газифікація; крекінг смоли; біогаз, екологічна чистота.

Надійшла 15.11.2019

Received 15.11.2019



# ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

N. Remez, Doctor of technical sciences, Professor, ORCID 0000-0001-8505-0266

V. Bronytskyi, TF, ORCID 0000-0001-6882-2295

National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## ESTIMATION OF RISKS FOR DEVELOPMENT OF NATURALLY TECHNOGENIC ENVIRONMENTS

The risks of development of such natural-tech environments as landfills of solid household waste, tailings dams, waste heaps at extraction of minerals for the possibility of their re-use as a basis of structures for civil and industrial construction are carried out in the work. The example of the Boryspil solid waste landfill highlights the main indicators of sources of risk: human impact, risk of explosions and fires, respiratory response, sanitary-epidemic danger, effect on the atmospheric air, impact on the ground cover, accumulation of heavy metals on groundwater in the presence of systems for collecting and draining filtration water, deformation of the surface. The methodology of Failure Mode and Effects Analysis was used to expertly assess the risks of reuse of areas occupied by natural and man-made environments for the construction of civilian and industrial sites. The experts were asked to rank the action by paired comparisons. A pairwise comparison consisted in a consistent comparison of each action with each other. The methodology assumes a risk rating based on the Risk priority number, which is a product of the rankings obtained by expertly assessing the severity of the consequences and the likelihood that an object will not be detected, by the frequency of emergencies. First, the risks with the highest Risk priority number are eliminated. Possible scenarios and combinations of risk spectrum scenarios (technical, environmental, social, economic) have been identified. These priorities were ranked in descending order (from 10 to 0): the highest score was assigned to the maximum value (the most dangerous) that was given effect. The results of the expert evaluation of the signs of severity and non-detection obtained from one expert are presented. We show matrices of related trait severity and non-detection traits, compiled by all experts. 16 experts participated in our work. Based on the ranking of expert indicators, matrices for estimating the impact of sources of risk for the choice of remediation direction and subsequent use of natural-tech environments were constructed. The result was used to quantify the risk presented by the criticality matrix of this indicating system, a measure of its impact on its reliability.

**Key words:** naturally technogenic environments, solid waste landfill, risk assessment, Risk priority number, sustainability.

**Introduction.** The urgency of solving problems related to the development of landfills, dumps, tailings and landfills closed for the reception of solid household waste is determined by the shortage of free space in urbanized territories and the need for high-cost rehabilitation of old landfill formations, potentially dangerous in environmental and sanitary and epidemiological terms. Risk assessment in the development of these territories is a key factor in reducing potential negative impacts. The most common method of waste management in Ukraine is their disposal at solid household waste landfills or landfills. Every year Ukraine produces more than 10 million tons of solid household waste at existing landfills and polygons with a total area of 9.4 thousand hectares [1].

Field researches by determination of composition of municipal solid waste were conducted in 2010-2011 on municipal solid waste landfill of Boryspil of Kiev region, the average on classification of Public service of statistics of Ukraine the city with the population of 57.5 thousand inhabitants placed in 15 km from Kiev with big business activity and a share of the population living in the private sector. According to local management of housing and communal services from total amount of municipal solid waste a third is the share of administrative and commercial agencies; at the same time 67% of waste are the share of the inhabited sector from which 50.1% – inhabited apartment houses, and 49.9% – the private sector [1-4].

Considering specifics of Boryspil, it was separately studied municipal solid waste which was formed in apartment buildings, the private sector and office rooms. In spite of the fact that such distribution is rather conditional, the composition of municipal solid waste in these three sources considerably differs, and such approach allowed to estimate correctly different streams of municipal solid waste and their contribution to the general the number of formation of municipal solid waste in Boryspil.

Classification of components of the studied municipal solid waste in Boryspil provided in tab. 1 [1-4]. It differs from classification of organic components of the guidelines of IPCC a little, was developed and claimed 2006 for

all member countries of the SWC Env Ind project: To Ukraine, Lithuania, Georgia and Russia.

Table 1 Classification of components of municipal solid waste, Boryspil

№	Fraction	Subfraction	Note
1	Paper and cardboard	Mixed paper	
		Office paper	
		Glossy paper	
		Newsprint	
		Cardboard	
2	Plastic	PET bottles	White, Blue, Green, Brown *
		HDPE	Products from rigid polyethylene
		PVC	Polyvinyl chloride products
		PS	Polystyrene products
		Another plastic	Plastic not in other categories
3	TetraPack		Cardboard based multilayer packaging
4	Food waste		All food waste except bone
5	Landscaping waste		Grass, branches, plant residues and other plant material
6	Wood		Large branches, bars, furniture and more
7	Another Organic		Textiles, leather, rubber and more
8	Ferrous metals		
9	Non-ferrous metals	Aluminum	
		Other non-ferrous metals	
10	Glass	Transparent	
		Brown	
		Green	
		Blue	
		Not packing	
		Mixed	
11	Another inorganic		Construction debris, ceramics, stones, sand, bones and more
12	Hazardous waste		Batteries, lamps, sharp objects, medical waste, etc.

The absence of a civilized waste management system for many decades has led to a large variety of old landfill bodies, many of which, despite long lifetimes (60 or even 100 years), the presence of sanitary backfilling from the ground remains sources of methane and groundwater pollution.

**Goal and tasks.** The purpose of the work is to carry out a risk assessment of the development of natural engineering environments for further use as the basis of civil and industrial construction structures.

**Presentation of the main research material.** Analysis of physical and chemical processes in the landfill body of the technogenic environment, engineering and technical problems arising on the natural technical environments at the final stages of the life cycle, allows to determine the following environmental risks caused by deposited without preliminary treatment of natural technical environments and prevent active urban planning development (reuse) of the territories of technogenic environments [1-4]:

- emissions and migration of biogas;
- contamination of groundwater, soils with filtrate;
- deformation of polygon working body;
- sanitary-epidemic danger of the territory of solid household waste landfill.

Thus, in order to ensure the most optimal and economical set of measures to prepare the territories for economic use, taking into account the required minimization of risks, it is necessary to find out which of these risks should be managed first.

Ranking risks of this kind is a complex technical and economic task, involving diverse, sometimes disparate, factors. This problem can be solved by means of mathematical and statistical methods combined with heuristic

methods, which have been increasingly recognized in recent years by mathematicians, economists and ecologists, which have been developed in ISO 14000 standards in particular [5].

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is a special system reliability and safety assessment technique designed to detect and eliminate technical problems in complex systems and to analyze and assess risks that differ in nature and direction of impact, strength and time of occurrence [6].

The FMEA analysis methodology is based on an expert assessment of the problem being studied. Experts make up for the lack of quantitative information to a large extent. The methodology involves risk assessment by RPN rank, which is the product of ranks obtained by expert assessment of severity of consequences (A) and probability of non-detection (B) of the object, by frequency of emergency situations (E). First of all, the risks with the highest RPN are eliminated [6].

Expert Group was asked to consider the impact of landfills closed for receiving solid waste on the environment and in terms of the risk of accidents, the severity of the consequences and possibilities of their discovery, and then rank the impact and justify their answers. The severity of the consequences for the environment and humans was determined taking into account legal liability in accordance with ISO 14000 [5]:

- there are no public or legislative restrictions - low hazard potential,
- increased attention in society, presence of special legislative restrictions - medium potential of danger,
- great risk of accidents, causes debate in society, significant legislative restrictions - great potential danger.

Experts were invited to rank impacts by paired comparisons. The pair comparison consisted in a consistent comparison of each exposure with each other: if A is more important than B, 1.0 point is assigned; If B is more important than A, 0 is assigned; If A and B are equal, 0.5 points are assigned. The following were considered as impacts in the post-culturing period:

- human effects:
  - danger of explosions and fires ( $x_1$ );
  - effects on the respiratory tract ( $x_2$ );
  - sanitary and epidemic hazard ( $x_3$ );
- effects on atmospheric air (greenhouse effect, depletion of the ozone layer  $x_4$ );
- influence on soil cover (death of the root system of plants in case of violation of the gas regime of soil  $x_5$ );
- accumulation of heavy metals in soil ( $x_6$ );
- effects on groundwater with filtration water collection and discharge systems ( $x_7$ );
- surface deformations ( $x_8$ ).

For each criterion, a matrix of conjugate characteristics was compiled and the priority value  $P_k$  and the total value of all priorities  $P$  were determined.

$$P_k = \sum_{i=1}^8 x_i, \quad k = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$P_i = \sum_{k=1}^n P_k, \quad i = \overline{1, x_i}; \quad (2)$$

where  $n$  is the number of independent experts.

Normalization of the priority value was carried out for each impact according to the formula:

$$P_{k,rel} = P_i / \sum P_i. \quad (3)$$

The ranking of these priorities was carried out in descending order (from 10 to 0): the highest score was assigned to the maximum value (the most dangerous) that received the impact [6]. Tables 2, 4 show the results of an expert assessment of the signs according to the severity of consequences and non-detection, obtained from one expert. Tables 3, 5 show matrices of conjugate signs by severity of consequences and by non-detection, compiled according to the results of evaluations by all experts. 16 experts took part in our work.

Table 2 Table of ranging on weight of consequences by one expert

Impacts	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	P <sub>k</sub>
X <sub>1</sub>	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	1	4,5
X <sub>2</sub>	0,5	0,5	1	1	0	0	0	0,5	3,5
X <sub>3</sub>	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	3,5
X <sub>4</sub>	0,5	0	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0	3,5
X <sub>5</sub>	1	1	1	0	0,5	0	0,5	0,5	4,5
X <sub>6</sub>	0	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0	4
X <sub>7</sub>	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	4,5
X <sub>8</sub>	0	0,5	0,5	1	0,5	1	0	0,5	4

Table 3 Matrix of conjugated characteristics by severity of consequences (A)

Impacts	Experts														$P_i$	$\sum P_i$	$P_{k\_rel}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
X <sub>1</sub>	4,5	1,5	0,5	3,5	3,5	4,5	0,5	3,5	3,5	7,5	1,5	3,5	0,5	6,5	45	459	0,0980
X <sub>2</sub>	3,5	6,5	4,5	2,5	2,5	3,5	4,5	2	2,5	0,5	6,5	2,5	4,5	5,5	51,5		0,1122
X <sub>3</sub>	3,5	5	4,5	1,5	1,5	3,5	4,5	1	1,5	6,5	5	1,5	4,5	2,5	46,5		0,1013
X <sub>4</sub>	3,5	5,5	5,5	6,5	6,5	3,5	5,5	5	6,5	1,5	5,5	6,5	5,5	1,5	68,5		0,1492
X <sub>5</sub>	4,5	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	3,5	4,5	3,5	5	4,5	4,5	5,5	63		0,1373
X <sub>6</sub>	4	5	6	2,5	3,5	4	6	4,5	3,5	4,5	5	3,5	6	1,5	59,5		0,1296
X <sub>7</sub>	4,5	1	5	4,5	5,5	4,5	5	6,5	5,5	4,5	1	5,5	5	4,5	62,5		0,1362
X <sub>8</sub>	4	2,5	2	6,5	7,5	4	2	6,5	7,5	3,5	2,5	7,5	2	4,5	62,5		0,1362

Table 4 Ranking table by non-detection by one expert

Impacts	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	$P_k$
X <sub>1</sub>	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0,5	1,5
X <sub>2</sub>	1	0,5	1	0,5	0,5	1	1	1	6,5
X <sub>3</sub>	1	0	0,5	0	0	0,5	1	1	4
X <sub>4</sub>	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	1	6
X <sub>5</sub>	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	1	6
X <sub>6</sub>	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	4,5
X <sub>7</sub>	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0	1
X <sub>8</sub>	0,5	0	0	0	0	0,5	1	0,5	2,5

Table 5 Matrix of conjugated characteristics by probability of non-detection (B)

Impacts	Experts														$P_i$	$\sum P_i$	$P_{k\_rel}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
X <sub>1</sub>	1,5	4,5	1,5	6,5	6,5	1,5	4,5	6,5	5,5	6,5	5,5	5,5	5,5	3,5	65	440,5	0,1476
X <sub>2</sub>	6,5	5,5	6	5,5	5,5	6	5,5	2,5	2,5	5,5	5	2,5	2,5	3	64		0,1453
X <sub>3</sub>	4	1,5	4,5	3,5	3,5	4,5	1,5	3,5	2,5	3,5	7	2,5	2,5	2	46,5		0,1056
X <sub>4</sub>	6	6,5	5,5	0,5	2,5	5,5	6,5	1,5	7,5	0,5	4,5	7,5	7,5	4	66		0,1498
X <sub>5</sub>	6	4,5	2,5	5,5	6,5	2,5	4,5	4,5	1,5	5,5	2,5	1,5	1,5	5	54		0,1226
X <sub>6</sub>	4,5	5,5	5,5	2,5	3,5	5,5	5,5	3,5	3,5	2,5	2	3,5	3,5	4	55		0,1249
X <sub>7</sub>	1	1,5	4,5	2,5	2,5	4,5	1,5	3,5	2,5	2,5	1,5	2,5	2,5	6	39		0,0885
X <sub>8</sub>	2,5	2,5	1	5,5	1,5	1	2,5	1,5	6,5	5,5	3,5	6,5	6,5	4,5	51		0,1158

Table 6 Ranking table by RPN

Impacts		A	B	E	RPN	
X <sub>1</sub>	0,098	4	0,1476	9	9	<b>324</b>
X <sub>2</sub>	0,1122	6	0,1453	8	8	<b>384</b>
X <sub>3</sub>	0,1013	5	0,1056	4	6	120
X <sub>4</sub>	0,1492	10	0,1498	10	7	<b>700</b>
X <sub>5</sub>	0,1373	9	0,1226	6	3	162
X <sub>6</sub>	0,1296	7	0,1249	7	5	245
X <sub>7</sub>	0,1362	8	0,0885	6	4	192
X <sub>8</sub>	0,1362	8	0,1158	5	10	<b>400</b>

Based on the resulting conjugate feature matrices according to the FMEA methodology, factors are ranked by the total criterion RPN (Table 6), the value of which is defined as the product of ranks A, B, E:

$$RPZ = A \cdot B \cdot E. \quad (4)$$

The RPN risk parameter indicates the relationship between the causes of the hazards. First of all, the risks with RPN index most exceeding the allowed value of RPN = 125 are eliminated. If one of indicators A, B, E is 9 or 10, risk reduction measures should be developed. RPN values from 40 to 100 mean risk, RPN < 40 negligible risk. Correction parameters for risk reduction are developed in the following sequence: elimination of causes of emergency situation (reduction of parameter E); Decrease of cause effect (decrease of parameter A); High probability of detecting an emergency situation for this reason (reduction of parameter B).

Based on the evaluation of expert views on RPN, it can be concluded that the indicators with high severity of effects (RPN > 125) are:

- atmospheric air exposure (greenhouse effect, ozone depletion  $x_4$ ) RPN = 700;
- surface deformations ( $x_8$ ) RPN = 400;
- airway exposure ( $x_2$ ) RPN = 384;
- explosion and fire hazard ( $x_1$ ) RPN = 324.

It should be noted that experts find it difficult to assess the sanitary and epidemic danger of landfill soils and the degree of danger of developing vehicle surface deformations.

Selection of the direction of recultivation and subsequent use of the CAT territory should be carried out taking into account minimization of these risks, first of all - formation, accumulation, migration of landfill gas, reduction of impact on the ozone layer, reduction of risk of surface deformation.

A set of measures, including preliminary mechanical and biological treatment of natural media before burial, filtrate collection-removal systems and biogas, will also reduce RPN environmental risks to medium and negligible risks.

**Conclusion.** The work using the methodology Failure Mode and Effects Analysis carried out an assessment of the risks of re-development of the territory using the example of Boryspil landfill of solid household waste. The main indicators of the sources of risks are identified: human impact; Danger of explosions and fires; Effects on the respiratory tract; sanitary and epidemic danger; Effects on atmospheric air; Impact on soil cover; Effects on groundwater when filtration water collection and discharge systems are available; deformations of a surface. Possible scenarios and their combinations of risk spectrum (technical, environmental, social, economic) were identified. Based on the ranking of experts' indicators, matrices are constructed to estimate the impact of risk sources. Based on an evaluation of the expert opinion on RPN, it was found that the high-severity indicators were atmospheric air effects (greenhouse effect, ozone depletion RPN = 700; deformations of a surface RPN=400; Respiratory effects RPN = 384; Explosion and fire hazard RPN = 324. The result was used to select the direction of recultivation and subsequent use of natural-man-made media.

### References

1. Remez N.S., Osipova T.A., Kraichuk O.V., Kraichuk S.A. Simulation of the solid waste landfill settlement taking into account underlying soil [Text] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774, 3/10 (81) 2016, p.p. 2 – 17.
2. Dychko, A., Remez, N., Kraychuk, S., Ostapchuk, N., Yevtieieva, L. Modelling of Two-Stage Methane Digestion with Pretreatment of Biomass. [Text] / Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. Volume 55, Issue 2, 1 April 2018, Pages 37-44. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0011>.
3. Remez N. Forecasting the stability of the solid waste landfill under its creation. [Text] / N. Remez, V. Bronytskyi // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2018. №1 – С. 146–151.
4. Remez N. Stress-strain state of the solid waste landfill with account of underlying soils. Remez N., Bronytskyi V. [Text] // "Актуальные научные исследования в современном мире." журнал - Переяслав-Хмельницький, 2018. - Вып. 4(36), ч. 10.
5. International standards ISO 14000 series [Electronic resource] // Access mode: <https://www.iso.org/iso-14001-environmental-management.html>
6. Failure mode and effects analysis [Electronic resource] // Access mode: <https://www.fmea-fmea.com/fmea-examples.html>

Н.С. Ремез, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-8505-0266  
В.О. Броницький, ас., ORCID 0000-0001-6882-2295  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОЦІНКА РИЗИКІВ ПРИ ОСВОЄННІ ПРИРОДО-ТЕХНОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ

У роботі проведена оцінка ризиків освоєння таких природно-техногенних середовищ як полігони твердих побутових відходів, хвостосховища, відвали при видобутку корисних копалин для можливості їх повторного використання як основи споруд для цивільного і промислового будівництва. На прикладі Бориспільського полігону твердих побутових відходів виділені основні показники джерел виникнення ризиків: дії на людину, небезпека вибухів і пожеж, дія на дихальні шляхи, санітарно-епідемічна небезпека, дія на атмосферне повітря, вплив на ґрунтовий покрив, накопичення важких металів в ґрунті, впливи на ґрунтові води за наявності систем збору і відведення фільтраційних вод, деформації поверхні. Використовувалася методологія проведення аналізу Failure Mode and Effects Analysis для експертної оцінки ризиків вторинного використання територій, зайнятих природно-техногенними середовищами для будівництва цивільних і промислових об'єктів. Проведено визначення можливих сценаріїв і комбінацій сценаріїв спектру ризику (технічного, екологічного, соціального, економічного). На основі ранжирування показників експертів побудовані матриці оцінка впливу джерел ризику для вибору напряму рекультивациі і подальшого використання природно-техногенних середовищ. Результат використовувався для кількісної оцінки ризиків, представлений матрицею критичності цієї системи тієї, що показує, міру впливу на її надійність.

**Ключові слова:** природно техногенні середовища, полігон твердих побутових відходів, оцінка ризиків, RPN, стійкість.

Надійшла 22.11.2019  
Received 22.11.2019

Т. В. Гребенюк, канд. техн. наук, доц; ORCID 0000-0002-9287-2919  
О. Я. Тверда, д-р. техн. наук, доц; ORCID 0000-0003-3163-0972  
М. В. Репін, канд. техн. наук; ORCID 0000-0002-0318-8278  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПОКАЗНИКА ВОЛОГОСТІ ПРИ СПАЛЮВАННІ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

*В статті розглянуто актуальне для сьогодення питання поводження з твердими побутовими відходами та акцентовано увагу на те, що найбільш ефективним методом скорочення обсягу відходів є термічна обробка. Приділено увагу такому важливому параметру при спалюванні твердих побутових відходів як вологість та наведено дані типової вологості. Проведено огляд впливів забруднюючих речовин, що виділяються в процесі спалювання побутових відходів. Проведено аналіз концентрації основних хімічних сполук при спалюванні твердих побутових відходів в залежності від ступеня їх вологості. Розраховано показник прийнятної вологості для спалювання відходів, при якому кількість викидів буде мінімальною. Для спрощення розрахунку застосовувались програмні забезпечення Microsoft Excel та MathCad. При визначенні використовувались реальні значення вологості та концентрації викидів. Шляхом перетворень, співвідношень та розрахунків встановлено залежності для кожного з викидів. Використовуючи коефіцієнти, які враховують клас небезпеки речовин та додавши всі значення було знайдено мінімальне значення викидів та вологість, при якій спостерігається це значення. Створено алгоритм розрахунку, за яким можна визначити кількість викидів, що утвориться при спалюванні конкретної суміші твердих побутових відходів.*

**Ключові слова:** *тверді побутові відходи, забруднюючі речовини, вологість, утилізація, викиди, хімічні сполуки.*

### Вступ

Утилізація твердих відходів є гострою та поширеною проблемою як у міських, так і в сільських районах багатьох розвинених країн та країн, що розвиваються. Збір та захоронення твердих побутових відходів (ТПВ) є однією з головних проблем міського середовища в більшості країн світу сьогодні. Рішення щодо управління ТПВ повинні бути фінансово стійкими, технічно здійсненими, соціально, юридично прийнятними та екологічними. Поводження з твердими відходами – найбільший виклик для влади як малих, так і великих міст.

У свою чергу, саме енергетична утилізація поділяється на три основних типи:

1. Збір біогазу на полігонах і звалищах ТПВ з наступним виробництвом електро- та/або теплової енергії;

2. Механо-біологічна обробка ТПВ з можливим виробництвом біогазу та/або твердого палива з ТПВ з подальшим використанням на цементних заводах або в спеціалізованих ТЕЦ/котельнях;

3. Термічна обробка/переробка змішаних (залишків після сортування) ТПВ з подальшим виробництвом електроенергії та/або тепла

Термічна обробка ТПВ [1] є найбільш ефективним методом скорочення відходів і необхідності їх видалення. Можливі такі види утилізації побутових відходів:

1) виробництво тепла і електроенергії з RDF (Refuse Derived Fuel)/SRF(Solid Recovered Fuel), отриманого після механічної та біологічної обробки;

2) класична сміттєспалювальна установка – спалювання змішаних ТПВ після вилучення цінної сировини;

3) експериментальні технології: піроліз, газифікація.

Проте в процесі спалювання ТПВ в атмосферу виділяються забруднюючі речовини та хімічні сполуки, що залежать від багатьох факторів і здійснюють негативний вплив на довкілля.

### Мета та завдання.

Метою роботи є визначення показника прийнятної вологості для спалювання твердих побутових відходів, при якому кількість викидів буде мінімальною.

### Матеріал і результати досліджень.

При плануванні процесу спалювання суміші ТПВ враховується чимало параметрів: технологія, за якою буде утилізуватись сміття, морфологічний склад, необхідність попередньо підготовки (сортування,

подрібнення), агрегатний стан відходів, фракційний склад, теплота згорання відходів тощо. Не менш важливою характеристикою є і вологість відходів.

Волога – кількість води, що вбирається в матеріал у вигляді пари або рідини. Її можна виразити двома окремими способами, як відсоток від мокрої маси зразка або як відсоток від сухої маси зразка. Перший метод використовується частіше, і формула для його вираження:

$$M = \frac{w - d}{w} * 100\% \quad (1)$$

де М – вміст вологи, %;

w – вага свіжого зразка;

d – вага зразка після висихання.

Різні відходи мають різні характеристики, що стосуються вмісту вологи та питомої ваги [2]. Як видно з табл.1, типовий вміст вологи змінюється від 80% до 0% залежно від матеріалів.

Таблиця 1 – Дані щодо типової вологості у відходах

Тип відходів	Вологість, % маси	
	Діапазон	Типова
<b>Житлові відходи</b>		
Харчові відходи (змішані)	50-80	70
Папір	4-10	6
Картон	4-8	5
Пластик	1-4	2
Текстиль	8-15	10
Гума	1-4	2
Шкіра	8-12	10
Дворові відходи	30-80	60
Деревина	15-40	20
Скло	1-4	2
Жерстяні банки	2-4	3
Алюміній	2-4	2
Інші метали	2-4	3
Бруд, зола тощо	6-12	8
Попіл	6-12	6
Інше сміття	5-20	15
<b>Комерційні відходи</b>		
Харчові відходи	50-80	70
Прилади	0-2	1
Дерев'яні вироби	10-30	20
Обрізки з дерев	10-80	15
Сміття (горюче)	10-30	15
Сміття (негорюче)	5-15	10
Сміття (змішане)	10-25	15
<b>Будівництво та знесення</b>		
Змішане знесення (негорюче)	2-10	4
Змішане знесення (горюче)	4-15	8
Змішана конструкція (горюча)	4-15	8

Зазвичай муніципальні відходи містять більше вологи, ніж комерційні. Це відбувається тому, що харчові відходи змішуються з муніципальними відходами, тому вміст вологи може підвищуватися до 40%, а в комерційних відходах - до 30%.

Згідно [3] при різних кількостях вологи у суміші ТПВ під час спалювання у довікля надходять забруднюючі речовини з різною концентрацією. Дані речовин та їх концентрацій наведено в табл.2.



Таблиця 2 – Концентрація основних хімічних сполук при спалюванні

Вологість ТПВ, %	Хімічні сполуки, мг/м <sup>3</sup>					
	HCL	NH <sub>3</sub>	HCN	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	CS <sub>2</sub>
34	2,5	0,05	0,73	16,3	0,3	0,75
17	3,0	0,01	0,85	14	0,3	1,7
5	6,5	0,006	1,0	7,9	0,4	2,4

Проведемо більш детальний аналіз кожної зі сполук. Дані речовини підлягають ефекту сумачії, тому можна визначити їх відсотковий склад та перевести значення концентрації в масові викиди (табл.3).

Таблиця 3 – Перераховані кількості забруднюючих речовин

Вологість ТПВ, %	Хімічні сполуки, мг/м <sup>3</sup>					
	HCL	NH <sub>3</sub>	HCN	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	CS <sub>2</sub>
34	0,359	0,0001399	0,028	12,88	0,0061	0,053
17	0,454	0,000008363	0,035	9,869	0,0051	0,143
5	2,307	0,000001145	0,042	3,428	0,0068	0,242

Далі графічно наводимо залежності кількості викидів від вологості спалюваної суміші (рис.1 – рис.6).

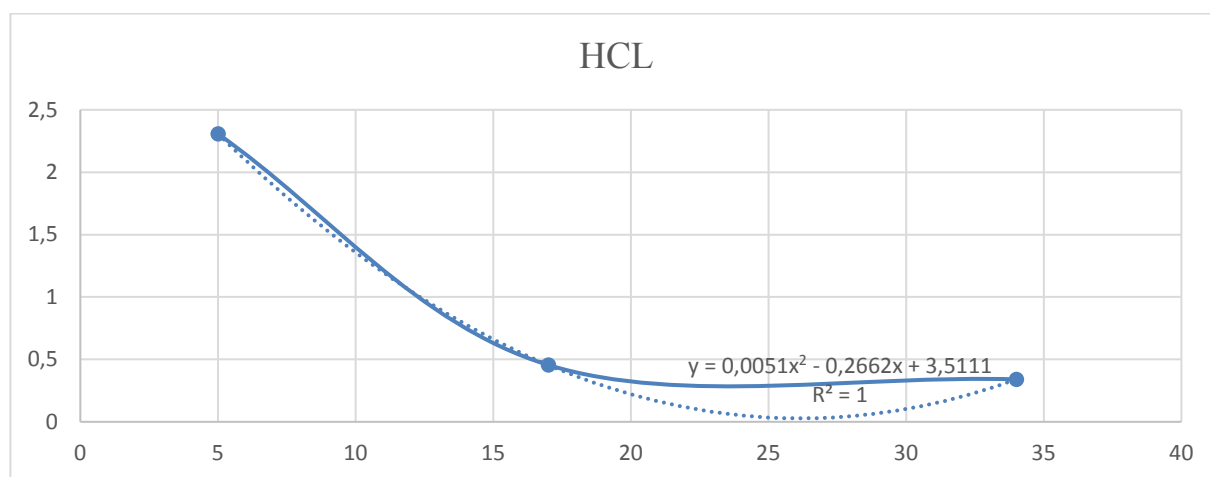


Рисунок 1 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для HCL

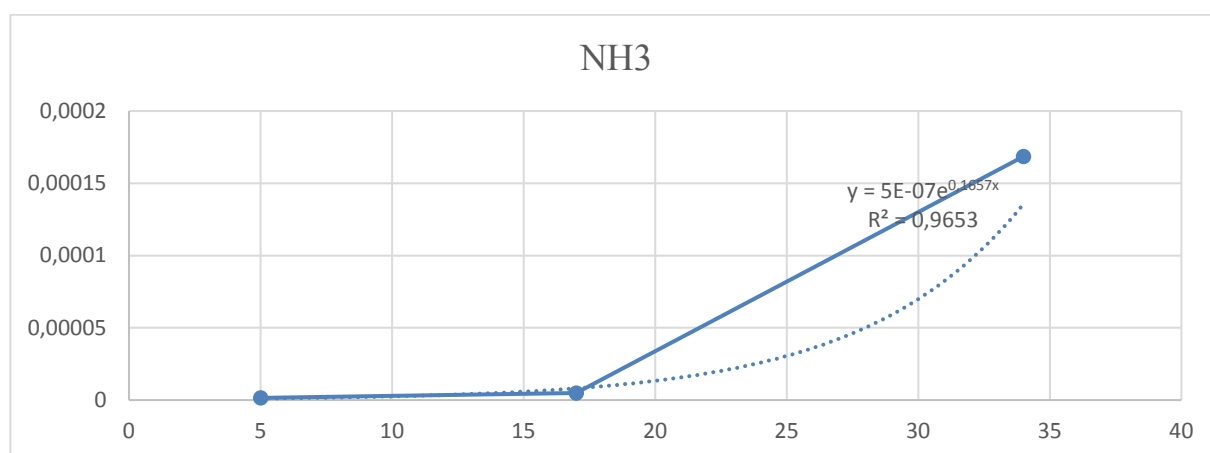


Рисунок 2 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для NH<sub>3</sub>

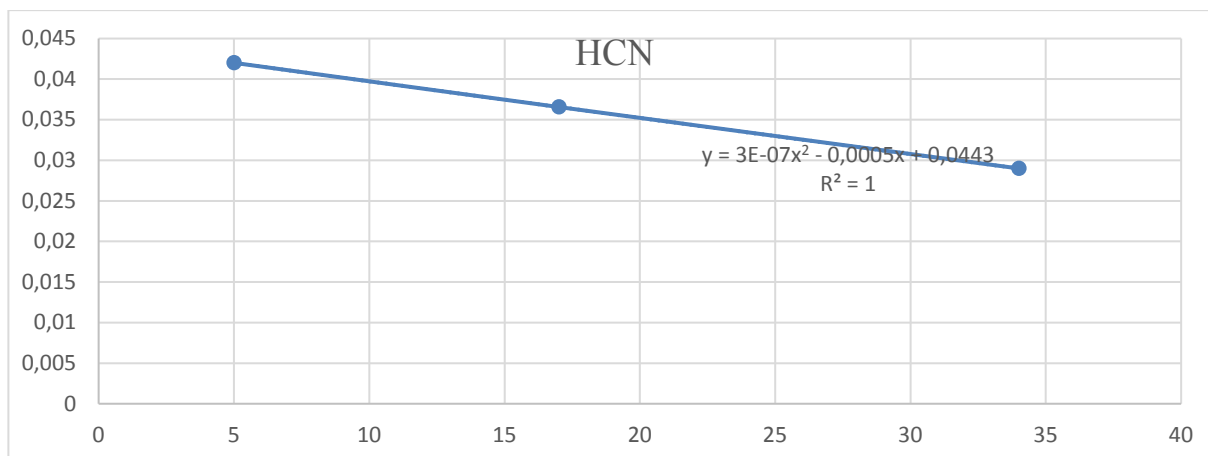


Рисунок 3 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для HCN

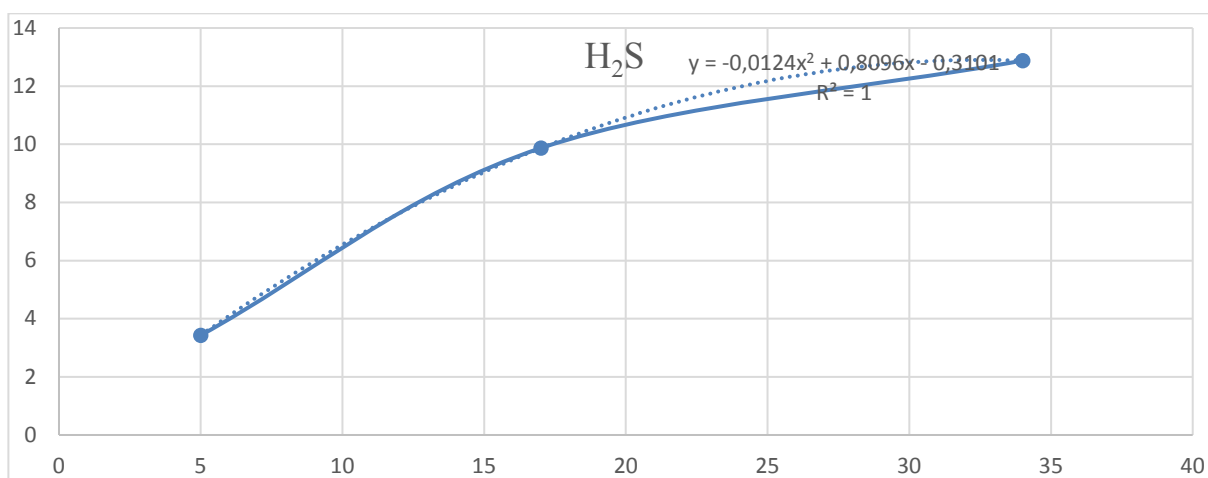


Рисунок 4 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для H<sub>2</sub>S

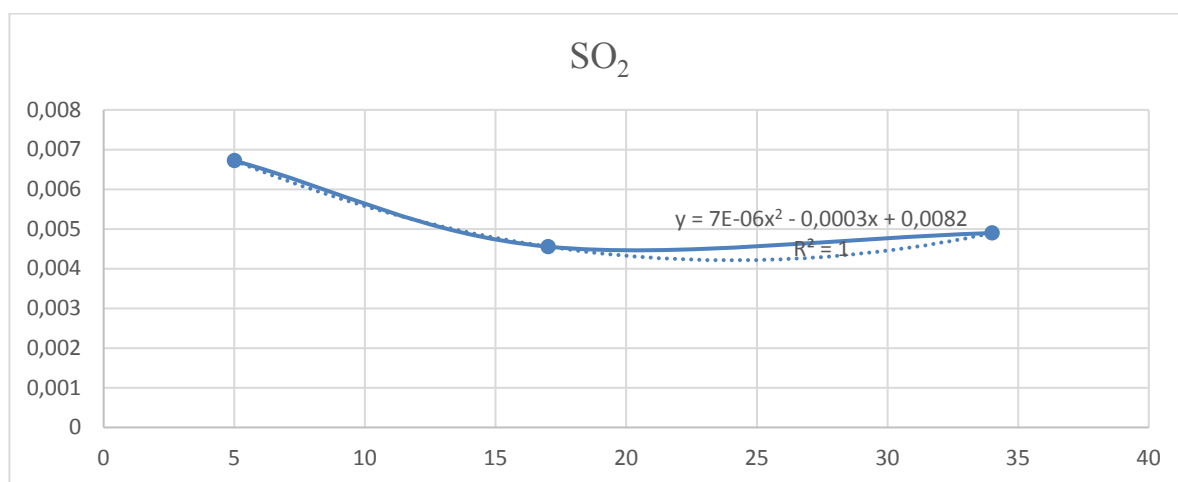
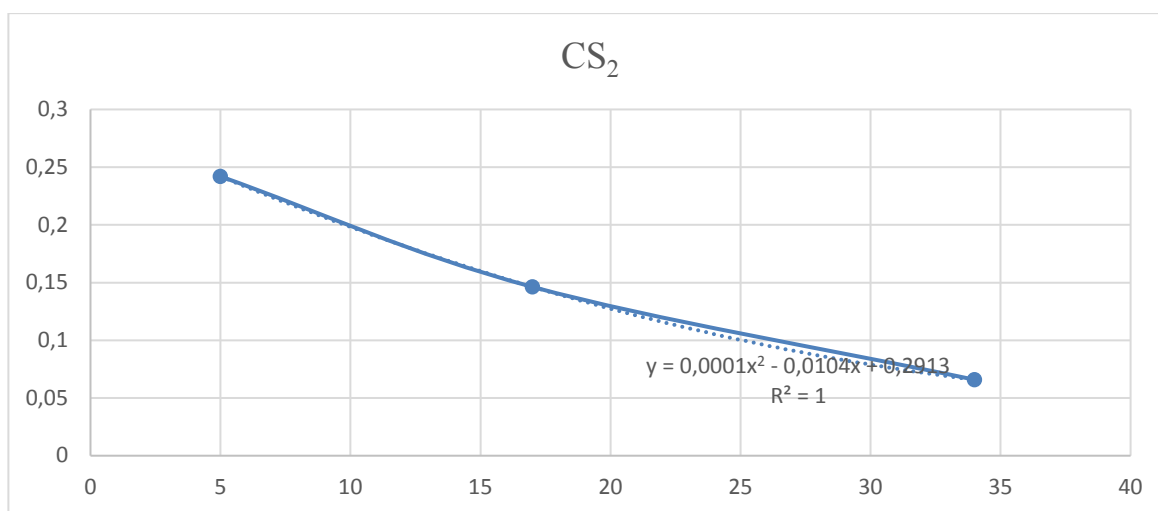


Рисунок 5 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для SO<sub>2</sub>

Згідно даних, у програмному середовищі MS Excel визначено лінію тренду для кожної із залежностей.

Лінія тренду використовується для прогнозування будь-якої події на основі уже наявних даних. За допомогою неї можна візуально зрозуміти, яку динаміку мають дані, з яких побудований графік. Маючи лінії тренду для даних викидів можна розрахувати їх кількість при різних значеннях вологості. Для цього використовується програмне забезпечення MathCad [4].

Рисунок 6 – Залежність кількості викидів від вологості спалюваної суміші для CS<sub>2</sub>

Значення вологості за якими розраховуватимуться кількість викидів:

$$x = (5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40) \quad (2)$$

Тепер для кожного випадку записуємо формулу тренду, за якою розраховуватиметься кількість викидів.

*Кількість викидів HCL:*

$$y_1 = 0,0051x^2 - 0,2662x + 3,5111 = (2,308; 1,359; 0,666; 0,227; 0,044; 0,115; 0,442; 1,023) \quad (3)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_1) = 0,044$  досягається при значенні температури  $x_5 = 25$ .

*Кількість викидів NH<sub>3</sub>:*

$$y_2 = 3 \cdot 10^{-7}x^2 - 5 \cdot 10^{-6}x + 2 \cdot 10^{-5} = (2,5 \cdot 10^{-6}; 0; 1,25 \cdot 10^{-5}; 4 \cdot 10^{-5}; 8,25 \cdot 10^{-5}; 1,4 \cdot 10^{-4}; 2,125 \cdot 10^{-4}; 3 \cdot 10^{-4}) \quad (4)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_2) = 0$  досягається при значенні температури  $x_2 = 10$ .

*Кількість викидів HCN:*

$$y_3 = 3 \cdot 10^{-7}x^2 - 0,0005x + 0,0443 = (0,042; 0,039; 0,037; 0,034; 0,032; 0,03; 0,027; 1,025) \quad (5)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_3) = 0$  досягається при значенні температури  $x_8 = 40$ .

*Кількість викидів H<sub>2</sub>S:*

$$y_4 = -0,0127x^2 + 0,7872x + 4,2607 = (7,879; 10,863; 13,211; 14,925; 16,003; 16,447; 16,255; 15,429) \quad (6)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_4) = 7,879$  досягається при значенні температури  $x_1 = 5$ .

*Кількість викидів SO<sub>2</sub>:*

$$y_5 = 7 \cdot 10^{-6}x^2 - 0,0003x + 0,0082 = (6,875 \cdot 10^{-3}; 5,9 \cdot 10^{-3}; 5,275 \cdot 10^{-3}; 5 \cdot 10^{-3}; 5,075 \cdot 10^{-3}; 5,5 \cdot 10^{-3}; \dots) \quad (7)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_5) = 5 \cdot 10^{-3}$  досягається при значенні температури  $x_4 = 20$ .

Кількість викидів  $CS_2$ :

$$y_6 = 0,0001x^2 + 0,0104x + 0,2813 = (0,232; 0,187; 0,148; 0,113; 0,084; 0,059; 0,04; 0,025) \quad (8)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(y_6) = 0,025$  досягається при значенні температури  $x_8 = 40$ .

Групи та класи небезпеки визначаються залежно від рівня впливу та рівня захисту, що запобігає цей вплив. Класи небезпеки визначаються за видами небезпеки.

Речовини, що надходять у довкілля при спалюванні відходів мають різний негативний вплив на довкілля, як результат – належать до різних класів небезпеки, їх класифікація наведена в табл. 4. [5]. Для подальших розрахунків речовинам надається коефіцієнт, який залежатиме від класу небезпечності речовини і показуватиме рівень впливу.

Таблиця 4 – Класи небезпеки речовин

Речовина	Клас небезпеки	Коефіцієнт
HCL	2	1,3
NH <sub>3</sub>	4	1,1
HCN	2	1,3
H <sub>2</sub> S	2	1,3
SO <sub>2</sub>	3	1,2
CS <sub>2</sub>	3	1,2

Згідно таблиці, наведеної вище розраховуємо загальну кількість викидів при даних температурах:

$$Y = 1,3y_1 + 1,1y_2 + 1,3y_3 + 1,3y_4 + 1,2y_5 + 1,2y_6 = (7,809; 10,571; 12,866; 14,692; 16,051; 16,941; 17,364; 17,318) \quad (9)$$

Мінімальне значення викидів  $\min(Y) = 7,809$  досягається при значенні температури  $x_1 = 5$ .

Таблиця 5 – Типи відходів для розрахунку викидів

№	Тип відходів	Вологість, % маси
1	Харчові відходи (змішані)	70
2	Папір	6
3	Картон	5
4	Пластик	2
5	Текстиль	10
6	Гума	2
7	Шкіра	10
8	Дворові відходи	60
9	Деревина	20
10	Скло	2
11	Жерстяні банки	3
12	Алюміній	2
13	Інші метали	3
14	Бруд, зола тощо	8
15	Попіл	6
16	Інше сміття	15

Для визначення вологості відповідної суміші потрібно занести дані щодо морфологічного складу відходів.

Оскільки спалювана суміш може бути утворена різними відсотковим та морфологічним складом, то був розроблений алгоритм, що дозволить розрахувати кількість викидів для конкретного морфологічного складу ТПВ. Для цього взято перелік груп побутових відходів та характеристики їх типової вологості (табл. 5).

$$I_1 = 10; I_2 = 10; I_3 = 5; I_4 = 5; I_5 = 5; I_6 = 5; I_7 = 5; I_8 = 5; \quad (10)$$

$$I_9 = 10; I_{10} = 5; I_{11} = 5; I_{12} = 5; I_{13} = 5; I_{14} = 5; I_{15} = 5; I_{16} = 5.$$

Вологість суміші (WW) визначається наступним чином:

$$WW = I \cdot W = 22,4 \quad (11)$$

де  $I = (I_1/100; I_2/100; I_3/100; I_4/100; I_5/100; I_6/100; I_7/100; I_8/100; I_9/100; I_{10}/100; I_{11}/100; I_{12}/100; I_{13}/100; I_{14}/100; I_{15}/100; I_{16}/100)$ ;  
 $W = (70; 6; 5; 2; 10; 2; 10; 60; 20; 2; 3; 2; 3; 8; 6; 15)$ .

Підставимо отримане значення в наявний діапазон значень:  $x = (5; 10; 15; 20; 22,4; 30; 35; 40)$

Далі розрахунки проводяться аналогічно попереднім і наприкінці отримусмо значення суми викидів при даній температурі. Розраховане значення вологості знаходиться на п'ятій позиції, тому відразу шукаємо значення викидів при п'ятому значенні (рис. 7).

$$Y = 1,3y_1 + 1,1y_2 + 1,3y_3 + 1,3y_4 + 1,2y_5 + 1,2y_6 =$$

$$= (7,809; 10,571; 12,866; 14,692; 15,403; 16,941; 17,364; 17,318) \quad (12)$$

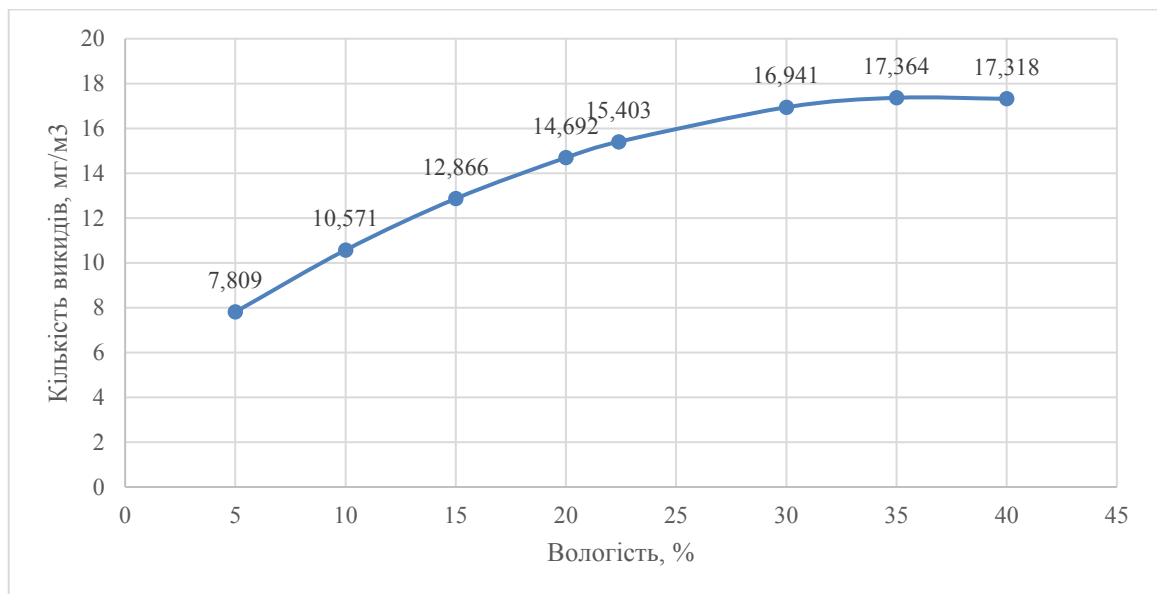


Рисунок 7 – Залежність викидів від вологості випадкової суміші

Таким чином, даний алгоритм можна застосовувати для будь якого складу ТПВ.

### Висновки

Досліджено типові вологості для різних груп відходів. Значення вологості може коливатись від 0 до 80% в залежності від типу сміття. Відходи від житлової галузі мають найбільшу ступінь вологості, оскільки там великий відсотковий склад органічний відходів. Встановлено залежності для кожного з викидів, наведено їх графічний вигляд. При зменшенні вологості під час процесу спалювання відходів, кількість викидів може зменшуватись або збільшуватись. Це пов'язано з ефективністю їх випалювання та характером викидів.

За допомогою існуючого програмного забезпечення для кожного викиду розраховано його кількість при заданих значеннях вологості суміші. Розраховано сумарне значення викидів при заданій вологості. Визначено оптимальне значення вологості для спалювання суміші – 5 %.

Розроблено алгоритм, за яким можна визначити сумарну кількість забруднюючих речовин що надходить у довкілля в процесі термічної утилізації відходів

### Список використаної літератури

1. Гребенюк Т.В., Попач М.В. Аналіз методів термічної обробки твердих побутових відходів. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2019. №11. С. 92–97.

2. Kanfoud S., Kouloughli S. Municipal Solid Waste Management in Constantine, Algeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2017. № 5. P. 25–31.
3. Круш П.В., Шевчук Н.А. Стартап-проект. Рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації «Розроблення стартап-проекту». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 50 с.
4. Кирьянов, Дмитрий Самоучитель Mathcad 13 / Дмитрий Кирьянов. - М.: БХВ-Петербург, 2006. - 761 с.
5. Трофімов І.Л., Яковлева А.В. Аналіз потенціалу твердих побутових відходів як сировини для виробництва альтернативних палив в Україні. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ, 2016. С. 105–111.

**T. Hrebeniuk**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.; **ORCID** 0000-0002-9287-2919

**O. Tverda**, Dr. Eng. Sc., Assoc. Prof.; **ORCID** 0000-0003-3163-0972

**M. Repin**, Cand. Sc. (Eng.); **ORCID** 0000-0002-0318-8278

**National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **DEFINITIONS OF A RATIONAL INDICATOR OF HUMIDITY AT COMBUSTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE**

*The article deals with the current issue of solid waste management for today and emphasizes that heat treatment is the most effective method of waste reduction. Under the heat treatment, the combustion process is considered. The impact of pollutants released during the incineration of household waste is reviewed. It is revealed that a number of certain parameters are taken into account while planning the process of incineration of a mixture of solid waste. Such as technology that will dispose of debris, morphological composition, the need for pre-treatment (sorting, grinding), the aggregate state of waste, fractional composition, heat of combustion of waste, etc. Equally important is the humidity of the waste to be recovered through incineration. Humidity is the amount of water absorbed into the material in the form of steam or liquid. It can be expressed in two separate ways, as a percentage of the wet weight of the sample or as a percentage of the dry weight of the sample. Therefore, this paper focuses on such an important parameter when burning solid waste as humidity, and presents typical humidity data. The analysis of the concentration of basic chemical compounds during the incineration of municipal solid waste, depending on the degree of their humidity was done. The acceptable waste incineration humidity is calculated, with minimum emissions. Microsoft Excel and MathCad software were used to simplify the calculation. Real values of humidity and emission concentration were used in the determination. The transformations, ratios and calculations determine the dependencies for each emission were established. Using the factors that take into account the hazard class of the substances and adding all the values, the minimum emission value and the humidity at which this value is observed were found. A calculation algorithm has been developed to determine the amount of emissions that will be generated by burning a specific mixture of solid waste.*

**Key words:** municipal solid waste, pollutants, humidity, recycling, emissions, chemical compounds.

### **References**

1. Hrebeniuk T.V., Popach M.V. Analiz metodiv termichnoi obrobky tverdikh pobutovykh vidkhodiv. Aktualnyie nauchnyie issledovaniya v sovremennom mire. 2019. №11. S. 92–97.
2. Kanfoud S., Kouloughli S. Municipal Solid Waste Management in Constantine, Algeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2017. № 5. P. 25–31.
3. Krush P., Shevchuk N. Startup project. Recommendations for the implementation of the Master's thesis section "Startup project development". Kiev: KPI them. Igor Sikorsky, 2019, P. 50.
4. Kiryanov, Dmitriy Samouchitel Mathcad 13 / Dmitriy Kiryanov. - М.: BHV-Peterburg, 2006. - 761 с.
5. TrofImov I.L., YakovlEva A.V. Anallz potentslalu tverdh pobutovih vidhodiv yak sirovini dlya virobnitstva alternativnih paliv v UkraYinI. *Energetika: ekonomIka, tehnologIyi, ekologIya*. KiYiv, 2016. S. 105–111.

Надійшла 13.12.2019

Received 13.12.2019

В.Д. Погребенник, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-1491-2356  
Національний університет "Львівська політехніка"  
А.А. Нестер, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1276-6068  
Хмельницький національний університет

## ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ГАЛЬВАНІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ: ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ

*В Україні є гостра потреба в міді, яку використовують в різних галузях промисловості. Гальванічне виробництво та цехи виробництва друкованих плат є джерелами екологічної небезпеки. Метою роботи є екологічне та економічне обґрунтування видалення міді з стічних вод та подальше її використання. Виявлено основні чинники негативного впливу відходів виробництва плат і гальванічного виробництва на довкілля. Щоб уникнути накопичення шламів на території підприємств запропоновано використовувати технологію регенерації відпрацьованих розчинів травлення, за якої виділений метал використовують як вторинну сировину для виробництва міді, а регенований розчин повторно використовують для травлення друкованих плат. Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропоновано підхід для отримання додаткової сировини із стічних вод виробництва друкованих плат. Практична значущість полягає у зменшенні впливу відходів виробництва на довкілля, а також отриманні дешевої сировини із стічних вод промислових підприємств. Отже, визначено сумарний індекс небезпеки шламу за існуючого стану збереження шламів на території підприємств (0.045) та після реалізації відновлення стічних вод (100). Оцінено економічні показники створеного на основі даного дослідження обладнання. Впровадження нової технології очищення стічних вод тільки однією установкою може принести більше 2,8 млн. грн економічного ефекту*

**Ключові слова:** мідь, гальванічне виробництво, стічні води, друковані плати, регенерація.

**Вступ.** В Україні є нагальна потреба в міді, яку застосовують у багатьох галузях промисловості. У той же час в Україні не розвідані родовища мідних руд. Перспективні та прогнозні ресурси мідних руд оцінено: у Волинському регіоні, на Донбасі і в Дніпровсько-Донецькій западині в межах Українського щита в Середньо-Придніпровському та Волинському регіонах. Загальні ресурси руд Волинського району з середнім вмістом міді 1,0 % оцінюються в 28 млн т металу. Все викладене свідчить про нестачу покладів мідних руд в Україні. Щорічні потреби України на цей метал становлять приблизно 120-140 тисяч тон, двадцять відсотків з яких забезпечують власним мідним брухтом, а решту у вигляді чорної міді доводиться завозити з сусідніх Росії та Польщі [1].

Гальванічне виробництво є одним з найнебезпечніших джерел забруднення довкілля, головним чином поверхневих і підземних водойм, через утворення великого обсягу стічних вод, а також великої кількості твердих відходів, особливо від реагентного способу знешкодження стічних вод. Сполуки металів, які виносяться стічними водами гальванічного виробництва, досить шкідливо впливають на екосистему ґрунт-рослина-тваринний світ-людина [2].

Під час використання гальванічних процесів в сучасному виробництві виникає ризик, пов'язаний з аварійними ситуаціями, який можна розглядати як ризик зберігання відходів і безпосередньо проведення технологічних процесів. При цьому прийнято виділяти технічні, технологічні, організаційні та інші причини розвитку несприятливих ситуацій. Зберігання відходів і технологічні процеси є небезпечними для навколишнього середовища, в якому перебуває людина, тваринний світ та фауна. Тому такий ризик можна називати екологічним.

Сучасні підприємства, які виробляли приблизно до  $4 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup> плат, накопичили на своїй території біля 1500-3000 тон відходів за рік у вигляді солей, які зберігаються в смостях, поліетиленових мішках та попадають під дію атмосферних осадів. У процесі дії на них атмосферних осадів солі вимиваються та переходять в ґрунти, поверхневі води, забруднюючи навколишнє середовище.

Виробництво друкованих плат в Україні представлено такими підприємствами: АТ НПО "ЕТАЛ" м. Кіровоград, яке випускає біля 4-5 тис. м<sup>2</sup> плат, маючи потужності для випуску до 50000 м<sup>2</sup> плат, ДП "Гальванотехніка" ПАТ "Київського заводу "Радар", ПАТ Новатор (м. Хмельницький) з випуском в межах 0,9 тис м<sup>2</sup>, ПАТ "Концерн-Електрон" – 0,8 тис м<sup>2</sup>. Це означає, що тільки одне підприємство може скинути з стічними водами або накопичити шламів за рік до 5-6 т міді, що явно не сприяє поліпшенню екологічної обстановки навколо підприємств, які займаються виробництвом плат. До 1992 р. тільки в Києві скидалось більше 20 т міді щорічно. Завод Електронмаш щорічно витравлював  $\approx 15000$  м<sup>2</sup> плат (а це призводить до виділення 7500 кг міді) [3].

Щоб уникнути нагромадження шламів на території підприємств пропонується використовувати технологію регенерації відпрацьованих розчинів травлення, при якій виділений метал використовують як вторинну сировину для виробництва міді, а регенований розчин повторно використовують для травлення друкованих плат [3].

Для видобування руди відкритим способом потрібно виконати розкривні роботи з переміщенням великої кількості ґрунтів та інших порід. Так, якщо 20-25 років тому граничний коефіцієнт розкривних робіт приймався у розмірі 2-4 м<sup>3</sup>/т, то нині під час розробки родовищ зі скельними гірськими породами він досягає значень 5-10 м<sup>3</sup>/т, а під час розроблення пологоспадних родовищ з м'якими покривними породами – 20-25 м<sup>3</sup>/т. Зараз відкрита розробка покладів корисних копалин може виконуватись на глибинах до 250 м. Це великі маси, які потрібно перемістити, укласти, що свідчить про значні затрати праці та матеріальні витрати [1, 3].

Природоохоронна діяльність у сфері надрокористування регламентується серед інших Гірничим законом України, який визначає такі основні вимоги до проведення гірничих робіт: забезпечення безпечного проведення гірничих робіт та раціональне видобування, використання корисних копалин і охорона надр [5].

Складність і гострота проблеми зумовлено тим, що українські споживачі, які гостро потребують міді, змушені закуповувати значну її частину за межами України та через відсутність іноземної валюти скорочувати виробництво товарів. У той же час наявні в Україні потужності з виробництва прокату міді та її сплавів не завантажено, оскільки немає мідної сировини, а значна частина мідевмісного брухту і відходів з різних причин експортується, незважаючи на те, що експорт прокату міді та її сплавів значно ефективніший, ніж експорт брухту і відходів міді. На кожній тонні експортованого прокату, окрім збереження робочих місць, можна одержувати до 1000 доларів США валютної виручки додатково, тобто 30-40 млн. доларів на рік [1, 3]. Але аналіз патентної та технічної літератури показав, що за умов нестачі сировини для виплавки кольорових металів питанням виділення міді з стічних вод приділяється недостатня увага.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Технологія виробництва кольорових металів має свої особливості. Це пов'язано з низькою концентрацією кольорових металів у руді порівняно з залізною (у рудах кольорових металів – лише кілька відсотків), а також наявністю в руді декількох металів. Зокрема, для отримання міді використовують руди з вмістом основного металу в середньому 2–3 %. Перевозити їх далеко недоцільно. Тому виплавка міді здійснюється поблизу місць видобутку. Спочатку мідні руди збагачують й отримують мідний концентрат зі вмістом металу 35 %. Потім відбувається плавка та продування в конверторі для отримання чорної міді, останній етап – очищення від домішок (рафінування). Із застосуванням спеціальної технології з мідної руди можна отримати й деякі інші кольорові метали [1, 3]. При цьому питомі витрати електроенергії під час виплавки досягають 230 – 350 кВт год на 1 т міді. Це вимагає достатньо великих затрат на підвід електроенергії. А виробництво металу з брухту дешевше в 25 разів, витрати на транспортування сировини скорочуються в 5-6 разів. При цьому скорочується період виготовлення металу і зменшуються витрати електроенергії; має місце природоохоронний ефект [1, 3].

В Україні мінерально-сировинна база кольорової металургії недостатня, і багато підприємств працюють на привізній сировині або переробляють брухт кольорових металів. Під час розміщення цих підприємств також враховують споживчий, транспортний та екологічний чинники. Кольорова металургія є забруднювачем навколишнього середовища й головним джерелом надходження важких металів [3, 6-8].

У той же час джерелом поповнення ресурсів брухту кольорових металів частково може стати виробництво плат та гальваніки, де мідь використовують як провідниковий матеріал і стравлюють у процесі підготовки поверхні до використання.

Метою роботи є екологічне та економічне обґрунтування видалення міді з стічних вод та подальше використання для промислових цілей.

**Матеріал і результати досліджень.** Обстеження показали, що підприємствами, які займаються виготовленням друкованих плат скидається цілий спектр металів – мідь, залізо, нікель, хром та інш. Зокрема, під час річної однозмінної роботи лінії травлення друкованих плат продуктивністю 14 м<sup>2</sup>/год буде виготовлено майже 28000 м<sup>2</sup> заготовок, а кількість виділеного (стравленого) металу (міді) складе приблизно 14 тон, що за ціни 85 грн/кг складе 14000 кг·85 грн/кг=1190000 грн. Цей метал можна повторно використати. Кількість металу, яка буде стравлюватись під час відновлення промислового виробництва плат, може скласти (при однозмінній роботі і кількості ліній в роботі 350 шт) 14000 кг·350=4900000 кг=4900 тон.

Найпоширенішим способом видобутку металічних руд (в тому числі мідних) є відкрита розробка родовищ, за допомогою якої з надр вибирається понад 2/3 всіх корисних копалин. Це відносно дешевий спосіб розробки, який дає змогу застосовувати потужне й високопродуктивне обладнання. Однак при проведенні відкритих робіт на багато десятиліть з господарського обігу вилучають величезні площі сільськогосподарських та лісових угідь. Для доступу до родовища з поверхні доводиться виймати, переміщати та складати у відвали порожні породи, обсяг яких у кілька разів перевищує обсяг видобутої корисної копалини [1, 3].



Другий за значенням спосіб розробки родовищ – підземний, на частку якого припадає близько 20 % видобутку заліза, до 45 % видобутку міді, до 70 % цинку, до 75 % олова й свинцю, 100 % вольфраму. Витрати на видобуток руди під час підземної розробки родовищ помітно більші, ніж для відкритого способу. Однак він ведеться на родовищах, які економічно недоцільно або технічно неможливо розробляти відкритим способом. У зв'язку з першочерговим виснаженням легкодоступних запасів металічних руд глибина розробок поступово зростає, збільшуючи собівартість підземного видобутку. Тенденція збільшення глибини розробок простежується в усьому світі. У Канаді видобуток руд, що містять золото, мідь, нікель, ведуть на глибинах 1800–2600 м, у США – міді та золота – на глибинах 1700–3000 м, в Індії золото дістають із глибини 3500 м. У Південноафриканській Республіці розробляється найглибше у світі родовище, де роботи ведуть на глибині понад 4000 м. Підземна розробка в ряді випадків дозволяє повністю зберегти земну поверхню, що забезпечує значну перевагу перед відкритими гірничими роботами [1, 3].

У той же час частину необхідної мідної сировини можна отримати не з надр, а за допомогою очищення стічних вод виробництва плат та гальваніки.

Зараз найпоширеніші реагентні технології вилучення металів з води не забезпечують необхідної ефективності очищення води для її повторного використання, призводять до утворення і накопичення токсичних шламів, які продовжують накопичуватись на територіях як діючих підприємств колишнього СРСР, так і заново утворених. Не вирішеним залишається питання утилізації регенераційних розчинів, що утворюються під час застосування іонообмінних технологій, які дають змогу створювати замкнені системи водокористування в гальванічних виробництвах [6-8].

На рисунку показано схему лінії травлення з відведенням стічних вод на регенерацію [3].

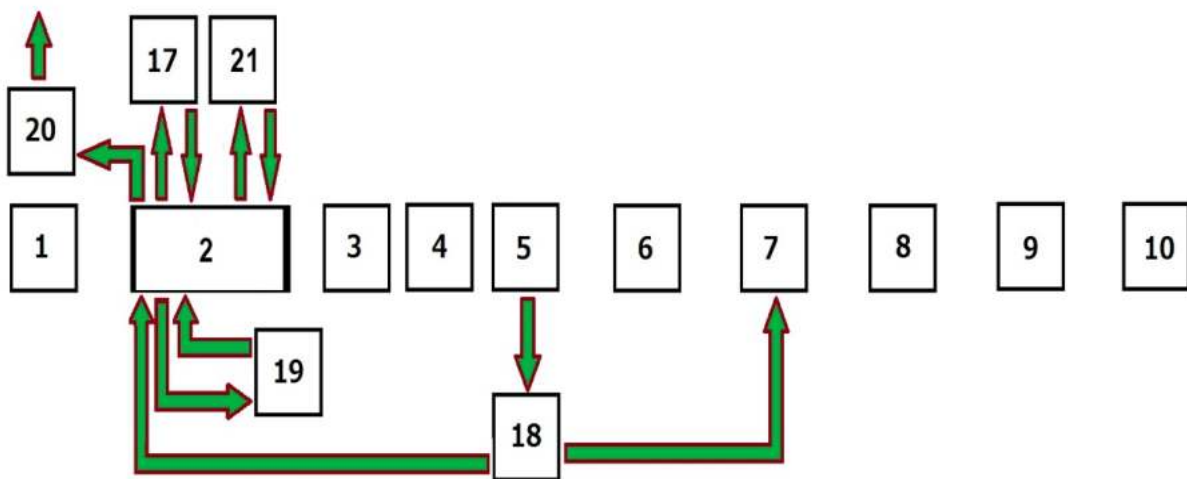


Рисунок. Схема лінії травлення друкованих плат з відведенням на регенерацію: 1 – модуль завантаження; 2 – травильний модуль; 3 – модуль освітлення; 4 – оглядовий модуль; 5 – третій модуль каскадного промивання; 6 – другий модуль каскадного промивання; 7 – перший модуль каскадного промивання; 8 – модуль гарячого сушіння; 9 – модуль холодного сушіння; 10 – модуль вивантаження; 17 – регенератор травильного розчину; 18 – регенератор промивних вод; 19 – фільтраційна установка; 20 – очисні споруди підприємства; 21 – установка нанесення покриттів (за необхідності).

Як показали результати досліджень, видалена з стічних вод мідь відповідає вимогам, які дозволяють використати її в подальшому для переплавки або для металізації підкладок при відповідних технологічних процесах [3].

Враховуючи факт створення обладнання, яке є екологічно безпечним та енергозберігаючим, існує змога оцінити економічні показники створеного на основі даного дослідження обладнання. При цьому необхідно враховувати конкретні ціни на основні матеріали, які використовують у технологічному процесі та параметри установок, що створюють можливість повторного використання водних розчинів без скидання на очисні споруди як підприємства, так і міста. При визначенні економічної доцільності виходимо з критерію зменшення шкоди навколишньому природному середовищу [9-10].

Під час проведення розрахунків користуємося тим фактом, що існуюча лінія забезпечує під'єднання установки відновлення (регенерації) стічних вод без внесення конструктивних змін у лінію травлення друкованих плат та не вимагає змін в технологічному процесі виготовлення плат. Необхідні дані для розрахунків представлено нижче:

- ціна на воду та водовідведення в Києві станом на 2019 р. – 21,756 грн/м<sup>3</sup>;
- ціна на електроенергію в Києві станом на 2019 р. – 2,47 грн/кВт·год;

– вартість установки відновлення (регенерації) стічних вод для лінії травлення друкованих плат – 450000 грн;

– вартість мідного брухту 140 грн/кг.

Розрахунок економічної ефективності від впровадження нового обладнання виконаємо для річної програми виробництва заготовок та роботи обладнання. При цьому візьмемо до уваги, що річний фонд робочого часу складе 247 днів, що при однозмінній роботі дасть  $247 \cdot 8 = 1976$  год.

За цей час буде виготовлено  $1976 \text{ год} \cdot 12 \text{ м}^2/\text{год} = 23712 \text{ м}^2$  заготовок. Кількість виділеного металу (міді) складе  $23712 \text{ м}^2 \cdot 0,5 = 11856 \text{ кг}$ . В таблицю 1 зведено результати розрахунків економічної ефективності.

Таблиця 1 - Результати розрахунків економічної ефективності

Найменування статті витрат	Базовий варіант	Запропонований новий варіант
Витрати на матеріали (основні та допоміжні для з'єднання з лінією), грн	–	55000
Витрати води для забезпечення процесу, м <sup>3</sup> /год	4,8	0,8
Ціна на воду та водовідведення, грн/м <sup>3</sup>	21,756	21,756
Вартість води на річну програму (1976 год роботи), грн/м <sup>3</sup>	$21,756 \cdot 4,8$ $1976 = 206351$	$21,756 \cdot 0,8 \cdot 1976 = 343$ 91
Кількість утворених шламів, тон	$2,1 \cdot 12 = 25,2$	$0,25 \cdot 12 = 3$
Вартість вивозу шламів (2500грн/т), грн	$25,2 \cdot 2500 =$ 63000	$3 \cdot 2500 = 7500$
Збільшення кількості електроенергії для забезпечення процесу відновлення стічних вод, кВт·год	–	14227,2
Ціна на електроенергію, грн/кВт·год	2,47	2,47
Збільшення вартості електроенергії для забезпечення процесу, грн	–	$14227,2 \cdot 2,47 = 35141$
Кількість виділеного металу (міді), кг	–	11856
Вартість виділеного металу (міді), грн	–	$11856 \cdot 140 = 1659840$
Витрати на розчин, грн	2100000	600000
Сумарні витрати, грн	3569351	722192

Вартісна оцінка витрат за розрахунковий період (рік):

Базовий варіант:  $Z_{mб} = 1200000 + 206351 + 63000 + 2100000 = 3569351$  грн.

Новий варіант:  $Z_{mn} = 1200000 + 450000 + 55000 + 34391 + 7500 + 35141 - 1659840 + 600000 = 722192$  грн.

Економічний ефект складе  $E = Z_{mб} - Z_{mn} = 3569351 - 722192 = 2847159$  грн.

Індекс безпеки від скидання шламів з мідними з'єднаннями обраховується за формулою:

$$K_i = \frac{ГДК_i}{(S + C_e)_i} \quad (1)$$

де,  $K_i$  – індекс безпеки;

$i$  – порядковий номер даної речовини,

$ГДК_i$  – гранично допустима концентрація в ґрунті небезпечної хімічної речовини, що утримується у відходах, мг/кг ґрунту;

$S$  – коефіцієнт розчинності хімічної речовини у воді;

$C_e$  – вміст хімічної речовини в загальній масі відходів, мг/кг;

Сумарний індекс безпеки, визначався за формулою:

$$K = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (2)$$

де,  $n$  – кількість небезпечних хімічних речовин, які утримуються в шламів виробництва плат та гальваніки.

Результати розрахунку сумарного індексу безпеки шламу виробництва плат та гальваніки для одного з діючих підприємств показали зростання (значення сумарного індексу безпеки шламу замість існуючих значень 0,045 стало відповідно 100).

Оскільки кількість шламів та міді в них різко зменшується, а це веде до покращення показників індексу безпеки, тобто до підвищення екологічної безпеки.

Новизна роботи полягає в тому, що виявлено механізм одержання додаткової сировини зі стічних вод виробництва друкованих плат. Значимість полягає в тому, що отримані результати можуть бути застосовані у виробництві друкованих плат для зменшення впливу відходів виробництва на навколишнє середовище, а також одержання дешевої сировини зі стічних вод промислових підприємств.

**Висновки.** Отже, економічний ефект від впровадження нової технології очищення стічних вод та зменшення кількості шламів за розрахунковий період (1 рік) складе 2847159 грн. Тобто впровадження нової

технології очищення стічних вод тільки однією установкою може принести більше 2,8 млн. грн економічного ефекту, покращить стан навколишнього природного середовища та доведе можливість реалізації екологічно безпечного процесу утилізації міді з стічних вод гальванічного виробництва. Збільшення витрат електроенергії на процес регенерації (відновлення) стічних вод компенсується різким підвищенням рівня екологічної безпеки (сумарний індекс небезпеки шламу замість існуючих значень 0,045 став відповідно 100) навколишнього середовища навколо виробничих підприємств та загалом в регіоні розташування промисловості.

#### Список використаної літератури

1. Червоний І.Ф., Бредихін В.М., Грицай В.П., Ігнат'єв В.С., Іващенко В.І., Маняк М.О., Смирнов В.О. Кольорова металургія України. Т. 1, ч. 1 : монографія. Запоріжжя: ЗДІА, 2014. 380 с.
2. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні. <http://old.menr.gov.ua/index.php/dopovidi>.
3. Нестер А.А. Очистка стічних вод виробництва друкованих плат : монографія. Хмельницький національний університет, 2016. 219с.
4. Нестер А.А., Евграшкина Г.П. Прогноз загрязнения машиностроительного предприятия шламами при производстве плат и гальваники. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 6. 2017. С.193-200.
5. Гірничий Закон України від 6.10.1999 №1127-XIV. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1999, № 50, ст.433 <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1127-14>
6. Клячкин В.Н., Ширкунова К.С., Барт А.Д. Анализ стабильности химического состава сточных вод при производстве печатных плат. Том 23, № 5. 2019. С.47-51 <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-5-47-51>.
7. Пашаян А.А. Карманов Д.А. Утилизация гальванических стоков без образования гальваношламов. Том 22, № 12. 2018. С.19-21 <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-19-21>.
8. Пролейчик А.Ю. Гапоненков И.А., Федорова О.А. Извлечение ионов тяжелых металлов из неорганических сточных вод. Том 22, № 3. 2018. С. 35-39. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-3-35-39>.
9. Дорохина Е.Ю., Харченко С.Г.. Экономика замкнутых циклов: проблемы и пути развития. Том 21, № 3. 2017. С.50-55. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-50-55>.
10. Вершинина И.А., Мартыненко Т.С. Проблемы утилизации отходов и социально-экологическое неравенство. Том 23, №5. С.52-55. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-5-52-55>.

V. Pohrebennyk, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-1491-2356  
Lviv Polytechnic National University

A. Nester, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-1276-6068  
Khmelnysky National University

## PURIFICATION OF SEWAGES GALVANIC PRODUCTIONS: ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS

*There is an urgent need for copper in Ukraine, which is used in various industries: electrical engineering, mechanical engineering, construction, food and chemical industries. Meanwhile, there is insufficient exploration of copper ores in Ukraine. At the same time, galvanic and PCB manufacturing are sources of environmental hazard. The object of the study is the process of using copper from sewage production boards and electroplating processes. The purpose of the work is environmental and economic justification for the removal of copper from wastewater for its further use. The aspects of mining (copper) in a mine and open method are described. The data on explored reserves of copper ores in Ukraine and real needs for copper for the successful operation of industrial enterprises are presented. The condition with the presence of sludge during the work of the etching lines of the printed circuit boards during normal operation at full capacity is considered, and it is established that for the productivity of the etching line 14 m<sup>2</sup> / h the amount of sludges per month of work in one shift will be about 2400-2500 kg. This leads to the accumulation of significant amounts of hazardous waste on the territories of enterprises, which cause environmental damage. In order to avoid the accumulation of sludge on the territory of the enterprises it is proposed to use the technology of regeneration of waste digestion solutions, in which the recovered metal is used as secondary raw material for copper production, and the recovered solution is reused for etching of printed circuit boards. The scheme of the line of etching of printed circuit boards with a lead for regeneration is offered. The introduction of a new wastewater treatment technology with only one plant can bring more than 2.8 million UAH of economic effect. The total sludge hazard index for the current state of sludge storage in the territory of enterprises (0.045) and after the implementation of wastewater recovery (100) has been determined.*

**Key words:** copper, galvanic production, sewages, printing boards, regeneration

**References**

1. Chervonyy I.F., Bredikhin V.M., Gritsay V.P., Ignatev V.S., Ivaschenko V.I., Manyak M.O., Smirnov V.O. Non-ferrous metallurgy of Ukraine. T.1, ch.1: monografiya. Zaporizhzhya : ZDIA, 2014. 380 p.
2. National report on the state of the environment in Ukraine. <http://old.menr.gov.ua/index.php/dopovidi>.
3. Nester A.A. Wastewater treatment for PCB production. Khmelnytsky National University : monograph. 2016. 219 pages.
4. Nester A.A., Evgrashkin G.P. Forecast of pollution of machine-building enterprise by sludges at manufacture of boards and electroplating. News of the TulState University. Technical science. Release 6. 2017. Page 193-200.
5. Girnychyy Zakon Ukraine vid 6.10.1999 №1127-XIV // Vidomosti Verkhovnoy Rady Ukraine (VVR), 1999, № 50, ст.433 <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/1127-14>
6. Klachkin V.N., Shirkunova K.S., Bart A.D. Analysis of Stability of Chemical Composition of Waste Water in the Production of Printed Circuit Boards/Volume 23, No. 5. 2019. C.47-51 <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-5-47-51>.
7. Pashayan A.A. Karmanov D.A. Disposal of galvanic effluents without formation of galvanic slums.//Volume 22, № 12. 2018. C.19-21 <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-19-21>.
8. Leutchik A.Y. Gaponenkov I.A., Fedorov O.A. Extraction of heavy metal ions from inorganic waste water. Volume 22, No. 3. 2018. Page 35-39. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-3-35-39>.
9. Dorokhina E.Y., Harchenko S.G. Economics of closed cycles: problems and ways of development.//Vol. 21, № 3. 2017. Page 50-55. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2017-3-50-55>.
10. Vershinin I.A., Martynenko T.S. Waste management problems and socio-ecological inequality.//Volume 23, № 5. Page 52-55. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-5-52-55>

**УДК 502.3**

**В.Д. Погребенник**, д-р техн. наук, проф., **ORCID 0000-0002-1491-2356**

**Национальный университет «Львовская политехника»**

**А.А. Нестер**, канд. техн. наук, доц., **ORCID 0000-0002-1276-6068**

**Хмельницький національний університет**

## **ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

*В Украине есть острая потребность в меди, используемой в различных отраслях промышленности. Гальваническое производство и цеха производства печатных плат являются источниками экологической опасности. Целью работы является экологическое и экономическое обоснование удаления меди из сточных вод и дальнейшее ее использование. Выявлены основные факторы негативного влияния отходов производства плат и гальванического производства на окружающую среду. Чтобы избежать накопления шламов на территории предприятий предложено использовать технологию регенерации отработанных растворов травления, при которой выделенный металл используют как вторичное сырье для производства меди, а регенерированный раствор повторно используют для травления печатных плат. Научная новизна работы заключается в том, что предложен подход для получения дополнительного сырья из сточных вод производства печатных плат. Практическая значимость заключается в уменьшении влияния отходов производства на окружающую среду, а также получении дешевого сырья из сточных вод промышленных предприятий. Итак, определены суммарный индекс опасности шлама при существующем положении сохранения шламов на территории предприятий (0.045) и после реализации восстановления сточных вод (100). Оценены экономические показатели созданного на основе данного исследования оборудования. внедрение новой технологии очистки сточных вод только одной установкой может принести больше 2,8 млн. грн экономического эффекта.*

**Ключевые слова:** медь, гальваническое производство, сточные воды, печатные платы, регенерация.

Надійшла 29.11.2019

Received 29.11.2019

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

**У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!**

#### Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

**Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!!**

#### Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі Microsoft Word (версії 2007 та вище) і зберігається з розширенням \*.doc або \*.docx.

**Обов'язково** надсилається стаття, збережена у форматі \*.pdf !!!

#### **Загальне оформлення:**

**1) Мова.** Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

#### **2) Параметри сторінки:**

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – 2,5 см.
- Вирівнювання основного тексту – за шириною.
- Перші рядки всіх абзаців – з відступом 1,0 см!!!
- Шрифт – Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – кегль 14.
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

#### **3) Структура статті:**

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: І.І. Петренко (укр.), И.И. Петренко (рос.) I. Petrenko (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводиться реферат **обсягом 1700-2000 знаків,**
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

#### **Основний текст статті**

**Вступ** (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

**Мета та завдання** (формулювання цілей статті, постановка завдання);

**Матеріал і результати досліджень** (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

**Рисунки** (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів: будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом.** Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi.** Рисунок має бути розташований у центрі, без обтінання текстом. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

**Графіки** повинні містити підписи **усіх осей на самому рисунку.** Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправляти не буде!

**Таблиці.** При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

**Формули повинні бути набрані** за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9.** Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

**Висновки:** (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

**Список використаної літератури** наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних **літературних джерел подається двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятую лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

**Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-к2000 знаків,** оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

**В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:**

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

<b>Прізвище, ім'я, по-батькові автора</b> (повністю, без скорочень)	
<b>Вчений ступінь, вчене звання, посада</b>	
<b>Місце роботи кожного автора в називному відмінку</b> (повна назва без скорочень)	
<b>Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом</b>	
<b>Контактний телефон</b>	
<b>Електронна адреса</b>	
<b>ORCID</b>	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

**Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!**

**Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.**

**Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:**

- стаття версія в форматі \*.doc або \*.docx;
- стаття версія в форматі \*.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

**Контакти:**

- тел.: **+38(044) 204-82-37;**
- сайт: [http://energy.kpi.ua;](http://energy.kpi.ua)
- e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)