

Харківський національний  
університет радіоелектроніки

Kharkov National  
University of Radio Electronics

Державне підприємство  
"Південний державний  
проектно-конструкторський  
та науково-дослідний інститут  
авіаційної промисловості"

State Enterprise  
"Southern National Design  
&  
Research Institute  
of Aerospace Industries"

**СУЧАСНИЙ СТАН  
НАУКОВИХ  
ДОСЛІДЖЕНЬ  
ТА ТЕХНОЛОГІЙ  
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**INNOVATIVE  
TECHNOLOGIES  
AND  
SCIENTIFIC SOLUTIONS  
FOR INDUSTRIES**

№ 1 (11), 2020

No. 1 (11), 2020

*Щоквартальний  
науковий  
журнал*

*Quarterly  
scientific  
journal*

Харків  
2020

Kharkiv  
2020

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор  
**Бодянский Євгеній Володимирович**,  
д-р. техн. наук, професор

Заступник головного редактора  
**Айзенберг Ігор Наумович**,  
канд. техн. наук, професор (США);  
**Шекер Серхат**,  
д-р. техн. наук, професор (Туреччина)

### Члени редколегії:

**Артюх Роман Володимирович**, канд. техн. наук;  
**Бабенко Віталіна Олексіївна**, д-р. екон. наук, канд. техн. наук,  
професор;  
**Безкоровайний Володимир Валентинович**, д-р. техн. наук,  
професор;  
**Гасімов Юсіф**, д-р. мат. наук, професор (Азербайджан);  
**Гопсєнко Віктор**, д-р. техн. наук, професор (Латвія);  
**Го Цян**, д-р. техн. наук, професор (КНР);  
**Джавад Хамісабаді**, канд. техн. наук, доцент (Іран);  
**Зайцева Єлена**, д-р. техн. наук, професор (Словаччина);  
**Зачко Олег Богданович**, д-р. техн. наук, доцент;  
**Коваленко Андрій Анатолійович**, д-р. техн. наук, доцент;  
**Костін Юрій Дмитрович**, д-р. екон. наук, професор;  
**Левашенко Віталій**, д-р. техн. наук, професор (Словаччина);  
**Лемешко Олександр Віталійович**, д-р. техн. наук, професор;  
**Малєєва Ольга Володимирівна**, д-р. техн. наук, професор;  
**Момот Тетяна Валеріївна**, д-р. екон. наук, професор;  
**Музика Катерина Миколаївна**, д-р. техн. наук, професор;  
**Назарова Галина Валентинівна**, д-р. екон. наук, професор;  
**Невлюдов Ігор Шакирович**, д-р. техн. наук, професор;  
**Павлов Сергій Володимирович**, д-р. техн. наук, професор;  
**Перова Ірина Геннадіївна**, д-р. техн. наук, доцент;  
**Петленков Едуард**, канд. техн. наук (Естонія);  
**Петришин Любомир Богданович**, д-р. техн. наук, професор  
(Польща);  
**Рубан Ігор Вікторович**, д-р. техн. наук, професор;  
**Семенець Валерій Васильович**, д-р. техн. наук, професор;  
**Сетлак Галина**, д-р. техн. наук, професор (Польща);  
**Терзіян Ваган Якович**, д-р. техн. наук, професор (Фінляндія);  
**Тєлєтов Олександр Сергійович**, д-р. екон. наук, професор;  
**Тімофєєв Володимир Олександрович**, д-р. техн. наук,  
професор;  
**Філатов Валентин Олександрович**, д-р. техн. наук, професор;  
**Чумаченко Ігор Володимирович**, д-р. техн. наук, професор;  
**Чухрай Наталія Іванівна**, д-р. екон. наук, професор;  
**Юн Джин**, канд. фіз.-мат. наук, професор (КНР);  
**Ястремська Олена Миколаївна**, д-р. екон. наук, професор.

### ЗАСНОВНИКИ

Харківський національний університет радіоелектроніки,  
Державне підприємство "Південний державний  
проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут  
авіаційної промисловості"

### АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14  
Телефон: +38 (057) 704-10-51  
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>  
E-mail редколегії: [journal.itssi@gmail.com](mailto:journal.itssi@gmail.com)

## EDITORIAL BOARD

Editor in Chief  
**Bodyanskiy Yevgeniy**,  
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Ukraine

Deputy Chief Editor  
**Igor Aizenberg**,  
PhD (Computer Science), Professor (United States)  
**Serhat Seker**,  
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Turkey)

### Editorial Board Members:

**Artiukh Roman**, PhD (Engineering Sciences) (Ukraine);  
**Babenco Vitalina**, Dr. Sc. (Economics);  
PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);  
**Bezkorovainyi Volodymyr**, Dr. Sc. (Engineering), Professor  
(Ukraine);  
**Gasimov Yusif**, Dr. Sc. (Mathematical Sciences), Professor  
(Azerbaijan);  
**Gopeyenko Victors**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Latvia);  
**Guo Qiang**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (P.R. of China);  
**Javad Khamisabadi**, PhD (Industrial Management), Associate  
Professor (Iran);  
**Zaitseva Elena**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovak Republic);  
**Zachko Oleh**, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);  
**Kovalenko Andrey**, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor,  
(Ukraine);  
**Kostin Yuri**, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);  
**Levashenko Vitaly**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);  
**Malyeyeva Olga**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);  
**Momot Tetiana**, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);  
**Muzyka Kateryna**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);  
**Nazarova Galina**, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);  
**Nevliudov Igor**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);  
**Pavlov Sergii**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);  
**Perova Iryna**, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);  
**Petlenkov Eduard**, PhD (Engineering Sciences) (Poland);  
**Petryshyn Lubomyr**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);  
**Ruban Igor**, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);  
**Semenets Valery**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);  
**Setlak Galina**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);  
**Terziyan Vagan**, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Finland);  
**Teletov Aleksandr**, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);  
**Timofeyev Volodymyr**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);  
**Filatov Valentin**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);  
**Chumachenko Igor**, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);  
**Chukhray Nataliya**, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);  
**Yu Zheng**, PhD (Physico-Mathematical Sciences), Professor  
(P.R. of China);  
**Iastremaska Olena**, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine).

### ESTABLISHERS

Kharkiv National University of Radio Electronics,  
State Enterprise "National Design & Research Institute  
of Aerospace Industries"

### EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave, 14  
Phone: +38 (057) 704-10-51  
Information site: <http://itssi-journal.com>  
E-mail of the editorial board: [journal.itssi@gmail.com](mailto:journal.itssi@gmail.com)

*Журнал включено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" наказом Міністерства освіти і науки України від 16.07.2018 №775 (додаток 7).*

Затверджений до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету радіоелектроніки (Протокол № 3 від 20 березня 2020 р.).

Свідоцтво про державну реєстрацію журналу Серія КВ № 22696-12596Р від 04.05.2017 р.

## ЗМІСТ

### Інформаційні технології

- 5 **Голяка Р. Л., Марусенкова Т. А., Федасюк Д. В.**  
Сигнальна модель сенсорів просторового положення в системах магнітного трекінгу (eng.)
- 19 **Смідович Л. С., Артюх О. В., Косенко Н. В.**  
Автоматизація аналізу якості тестових завдань та результатів тестування студентів ІТ-спеціальностей

### Сучасні технології управління підприємством

- 28 **Бондар А. В.**  
Управління трудовими ресурсами проєктно-орієнтованої організації на базі профілю фахівця і ступеня його унікальності (eng.)
- 35 **Бушуєв Д. А., Козир Б. Ю.**  
Гібридні методології управління інфраструктурними проєктами (eng.)
- 44 **Ково С. А., Кадірі І. Б., Зекері А.**  
Вплив диверсифікації співробітників на організаційні показники окремих багатонаціональних підприємств харчової промисловості в Південно-Західній Нігерії (eng.)
- 59 **Пітерська В. М., Логінов О. В., Логінова Л. В.**  
Концептуальна модель проєктно-орієнтованого управління освітньою діяльністю закладів вищої освіти (eng.)
- 68 **Попко О. В.**  
Ідентифікація проблем та прогнозування тенденцій розвитку молочного ринку України
- 80 **Решетняк О. І.**  
Моделювання рейтингу науково-технологічного розвитку країн (eng.)
- 90 **Федорович О. Є., Косенко В. В., Прончаков Ю. Л.**  
Управління модернізацією підприємства, що розвивається в умовах короткострокової перспективи
- 97 **Ястремська О. О.**  
Освітній туризм як підґрунтя зростання економічної активності ринку праці (eng.)

### Інженерія та промислові технології

- 106 **Авер'янова Л. О., Старенький В. П.**  
Аналіз стану радіотерапевтичного обладнання в Україні (eng.)
- 114 **Захарова І. В., Роянов В. О., Серенко О. М.**  
Теоретичні дослідження та практична розробка процесу дугового напилення з пульсуючим розпилювальним потоком повітря з метою підвищення якості покриттів
- 122 **Невлюдов І. Ш., Демська Н. П., Палагін В. А., Боцман І. В.**  
Матрично-структурний аналіз напружено-деформованого стану гнучких міжз'єднань і компонентів МЕМС
- 134 **Роменський В. І., Невлюдова В. В., Персіянова О. Ю.**  
Дослідження напрацювання захисного покриття поверхонь складально-зварювального оснащення (eng.)
- 147 **Селіванова К. Г., Аврунін О. Г., Казимиров М. А.**  
Визначення основних параметрів сенсорних пристроїв для реалізації психоневрологічних досліджень з впровадженням multitouch-технології (eng.)
- 156 **Триц Р. М., Малецька О. Є., Черняк О. М., Семенова Ю., Дженсиц В.**  
Аналіз вимог міжнародних та національних стандартів до методик вимірювання та метрологічного обладнання (eng.)

### Телекомунікаційні системи та комп'ютерні мережі

- 163 **Єременко О. С., Євдокименко М. О., Слейман Б.**  
Удосконалена модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності в програмно-конфігурованих мережах
- 172 **Рудницький В. М., Можасєв М. О., Кучук Н. Г.**  
Метод діагностики порушень синхронізації телекомунікаційної мережі комп'ютерної системи критичного застосування (eng.)
- 181 **Алфавітний показчик**

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор

## CONTENTS

### Information Technology

- 5 **Holyaka, R., Marusenkova, T., Fedasyuk, D.**  
Signal model for spatial position sensors in magnetic tracking systems
- 19 **Smidovych, L., Artiukh, O., Kosenko, N.**  
Automation of test items quality analysis and its students test results assessment

### Modern Enterprise Management Technologies

- 28 **Bondar, A.**  
Management of human resources of the project-oriented organization based on the profile of the specialist and the degree of its uniqueness
- 35 **Bushuiev, D., Kozyr, B.**  
Hybrid infrastructure project management methodologies
- 44 **Kowo, S. A., Kadiri, I. B., Zekeri, A.**  
Impact of employees diversity on organizational performance of selected multinational food producing industry in south-west nigeria
- 59 **Piterska, V., Lohinov, O., Lohinova, L.**  
Conceptual model of project-oriented management of educational activities of higher education institutions
- 68 **Popko, O.**  
Identification of problems and forecasting trends in the development of the ukrainian dairy market
- 80 **Reshetnyak, O.**  
Modeling rating of scientific and technological development of the countries
- 90 **Fedorovich, O., Kosenko, V., Pronchakov, Yu.**  
Management of the modernization of the enterprise developing in the conditions of the short-term prospect
- 97 **Iastremaska, O.**  
Educational tourism as a basis for the growth of economic activity of the labor market

### Engineering & Industrial Technology

- 106 **Averyanova, L., Starenkiy, V.**  
Analysis of radiation therapy equipment status in ukraine
- 114 **Zakharova, I., Royanov, V., Serenko, A.**  
Theoretical research and practical development of the arc spraying process with a pulsating spray air stream to improve the quality of coatings
- 122 **Nevliudov, I., Demska, N., Palagin, V., Botsman I.**  
Matrix-structural analysis of the stress-deformed status of the flexible interfaces and mems components
- 134 **Romenskiy, V., Nevliudova, V., Persiyanova, E.**  
Study of the operating time of the protective coating of surfaces of assembly and welding equipment
- 147 **Selivanova, K., Avrunin, O., Kazimirov, N.**  
Determination of the basic parameters of sensor devices for the implementation of psychoneurological research with the introduction of multitouch technology
- 156 **Trishch, R., Maletska, O., Cherniak, O., Semionova, Ju., Jancis, V.**  
Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment

### Telecommunication Systems & Computer Networks

- 163 **Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Sleiman, B.**  
Advanced performance-based fast rerouting model with path protection and its bandwidth in software-defined network
- 172 **Rudnytsky, V., Mozhaiev, M., Kuchuk, N.**  
Method for the diagnostics of synchronization disturbances in the telecommunications network of a critical used computer system
- 181 **Alphabetical index**

R. HOLYAKA, T. MARUSENKOVA, D. FEDASYUK

## SIGNAL MODEL FOR SPATIAL POSITION SENSORS IN MAGNETIC TRACKING SYSTEMS

The **subject** of research is the process of forming signals in magnetic tracking systems including those used for spatial position calculation within the concepts of Industry 4.0 and Industrial Internet of Things. Such systems are based on calculating the spatial position of objects upon measurements of reference magnetic fields in low-frequency electromagnetic radiation spectrum. The **goal** is to develop and verify a signal model for spatial position calculating in magnetic tracking systems. The signal model is developed upon experimentally obtained dependencies of the informative signals on the distances and angles between sensor and actuator coils. **Objectives:** analysis of signals in magnetic tracking systems, development of tools for experimental study, mathematical interpretation of the research results along with development of the signal model, verification and use of the developed model. General scientific **methods** were used, including experiment, measurement, analysis, synthesis, probabilistic and statistical methods. We have obtained the following **results:** The structure of a signal chain of the programmable magnetic tracking systems and its implementation on the basis of PSoC of 5LP Family by Cypress Semiconductor has been disclosed. Experimental results obtained at different distances and angles between the actuator and sensor coils have been presented. For spatial positions calculation signal models that describe distribution of magnetic fields and signals of sensor coils are used. We have analyzed typical inaccuracies and ways of their minimization. For verification of the introduced signal model we propose to use the mean square deviation of normalized signals. **Conclusions.** A signal model for the mutual position of actuators and sensors in magnetic tracking systems has been developed. The model describes functional dependencies whose main parameters are the distances and angles between coils. Further development of the presented results implies the proposed signal model to be used when solving problems of developing and specifying algorithms of spatial position calculation, system debugging and rapid analysis, optimization of calibration procedures.

**Keywords:** Industry 4.0 devices; magnetic tracking; signal model; programmable system-on-chip.

### Formulation of the problem

This paper deals with the problem of creating spatial position sensors (near spatial navigation) in the concepts: Industry 4.0 (Industry 4.0), Industrial Internet of Things (IIoT), Virtual (VR – Virtual Reality) and augmented (AR - Augmented) Reality) Reality, the 5th generation of mobile networks (5G – 5 Generation of Digital cellular networks) [1]. In addition to optical ambient recognition devices and inertial sensors, MT – Magnetic Tracking [2] are considered effective sensors. The magnetic tracking method is based on determining the spatial position of objects by the measurement of the vector of induction of the reference magnetic fields in the low-frequency spectrum of electromagnetic radiation. Measurements are made using inductive coils, which form a system of interrelated pairs of actuators and sensors. The actuator coils form the magnetic fields of the low-frequency spectrum, and the sensory ones generate the electromotive force caused by these fields. Therefore, another name for this method is EMT (Electromagnetic Tracking) [3]. Magnetic tracking systems are used in industry, robotics, animatronics, game consoles, spatial navigation of instruments in minimally invasive surgery, etc.

Let's consider the development trends and examples of scientific work in this area.

### Analysis of recent research and publications

The development of information and communication technologies in industry, in particular in the concepts of Industry 4.0 [4] and IIoT [5], involves the solution of a wide range of tasks to create a new generation of means of interaction with the surrounding world. Virtual technologies [6] and augmented [7] reality play a decisive role in these concepts. Significant progress has been

made towards the creation of a new generation of information and communication tools that integrate a variety of measuring devices [8].

One of the most important tasks of such measuring devices is spatial navigation, in particular based on optical systems (Visual Navigation) [9] and Global Positioning System (GPS) [10]. The further development of spatial navigation devices involves the combination of GPS technologies and local navigation sensors, in particular based on Inertial Navigation System (INS) and their basic components - Inertial Measurement Unit (IMU) [11].

Magnetic tracking is a promising direction for the development of spatial navigation tools [12]. A significant advantage of magnetic tracking systems over optical tracking systems is the ability to operate outside the direct vision area. With respect to inertial tracking systems, the advantages of magnetic tracking systems are the ability to accurately measure the coordinates of the sensors relative to the formed matrix of actuators of the coordinate system and the absence of errors due to the time drift of the accelerometers [13] and gyroscopes [14]. Modern solutions of magnetic tracking systems are: universal framework (framework) ARIoT in the concepts of augmented reality and Internet of things [15]; the concept of Data Fusion in medical imaging devices [16]; navigation devices for surgical instruments in medical apparatus [17]; biomedical engineering technologies, in particular for the monitoring of face kinematics [18]; means of mechatronics of flexible robots [19], etc.

### Formulating the purpose of the article

The information signals of the relative position in the "actuator-sensor" pairs of magnetic tracking systems are described by functional dependencies, the main arguments of which are the distance between the coils and their

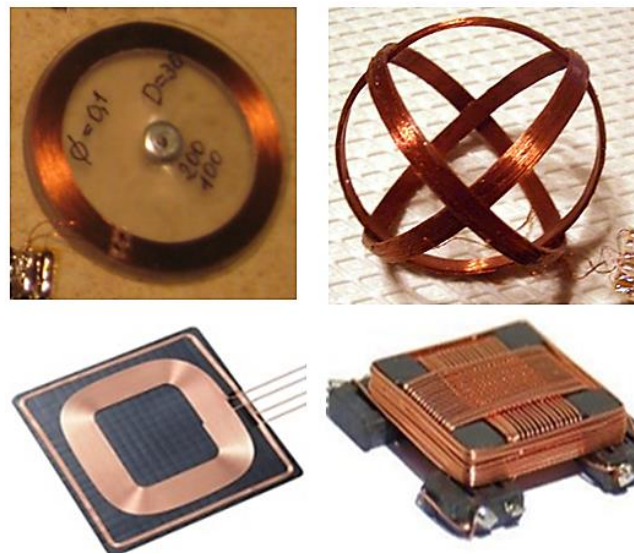
inclination relative to each other. To calculate the spatial position, mathematical models of the distribution of the generated magnetic fields are used. These models are synthesized on the basis of theoretical assumptions and results of experimental studies. A variety of mathematical models are signal models that describe the dependence of the formed measuring system of signals on the values of measuring values [20].

The purpose of this work is to develop and verify a signal model for calculating the spatial position of objects in magnetic tracking systems. The signal model is developed on the basis of experimentally obtained families of dependencies of informative signals on the distance and angles between the sensor and actuator coils. The results are part of a comprehensive work on the creation of integrated magnetic tracking software - Magnetic Tracking System Integrated Development

Environment (MTS IDE), conducted by our team in a number of scientific and applied projects.

### Materials and methods

The principle of operation of sensor-based magnetic tracking systems is based on the determination of the spatial position of objects by the measurement of the vector of induction of the reference magnetic fields in the low-frequency spectrum of electromagnetic radiation. Preferably, sensors and actuators in such measurement systems are small-sized coils and their two-dimensional 2D (2-Dimension) or 3D (3-Dimension) assemblies (fig. 1). Examples of 3D collections of commercially available magnetic tracking coils are Premo's 3DV series [21, 22].



**Fig. 1.** Planar (1D) and 3D (3D) coils of magnetic tracking systems

The spatial distribution of the Actuator coil magnetic field and the placement of the Sensor coil in the 2-Dimension plane are shown in fig. 2, and the relative placement of these coils – in fig. 3. The supporting and moving coordinate system is considered. The reference coordinate system is defined by the spatial position of the actuator, and the movable sensor sensor coils. To simplify the analysis below, we restrict ourselves to the consideration of two-dimensional 2D (plane) coordinate systems. The plane of the actuator coil is arranged parallel to the  $X_A$  axis, and its normal  $N_A$  coincides with the  $Y_A$  axis. The slope of the plane of the sensor coil relative to the moving  $X_S Y_S$  coordinate system is determined by the angle  $\alpha$ . At  $\alpha=0$ , the plane of the  $P_s$  of the sensor coil coincides with the  $X_S$  axis, and its normal plane – with the  $Y_S$  axis.

In order to construct sensory devices of magnetic tracking, it is necessary to establish analytical regularities of the spatial distribution of values of the normal  $B_N$  and tangential  $B_T$  projections of the magnetic field induction vector. These projections are determined by the field

induction module  $B_M = \sqrt{B_N^2 + B_T^2}$  at the distance  $L_{SA}$  between the sensor and actuator coils and the angle  $\theta$  between the vector connecting the centers of these coils and the plane of the actuator coil. The maximum values of normal  $B_N$  projection and zero values of tangential  $B_T$  projection occur along the  $Y_A$  axis. Instead, there are zero values of  $B_N$  and maximum values of  $B_T$  along the  $X_A$  axis.

The induction of the actuator field is characterized by a magnetic moment  $M_A = N_A I_A A_A$ . Its value is given by the product of the number of turns, the current  $I_A$  and the area  $A_A$  of the actuator coil [23]. With this parameter, the normal  $B_N$  and tangential  $B_T$  projections of the magnetic field induction are determined by the inverse cubic function of the distance  $L_{SA}$  between the sensor and actuator coils and the angle  $\theta$  [24]:

$$B_N = \frac{K_{SA} M_A}{L_{SA}^3} \cos(\theta), \quad B_T = \frac{K_{SA} M_A}{2L_{SA}^3} \sin(\theta), \quad (1)$$

where  $K_{SA}$  is a coefficient of proportionality.

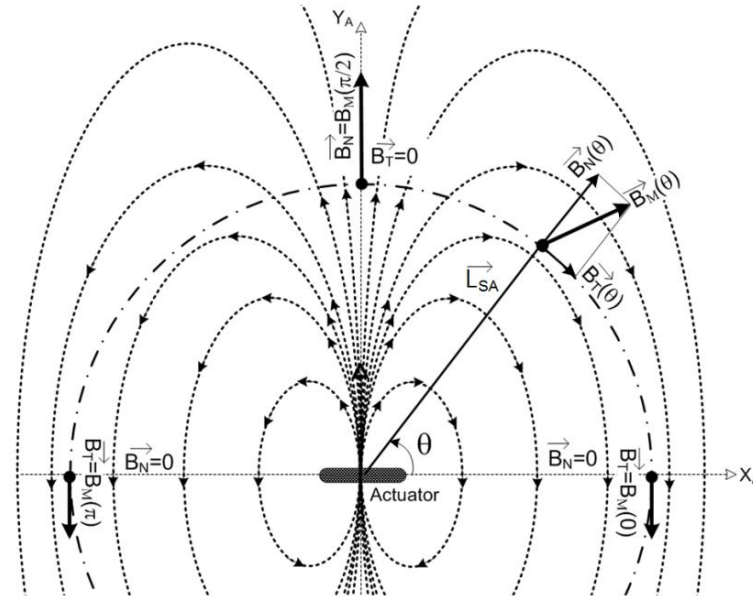


Fig. 2. Spatial distribution of the magnetic field in the plane

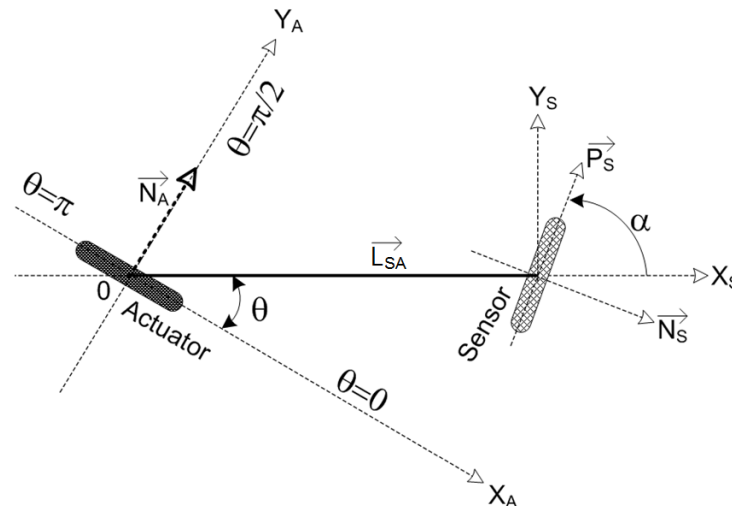


Fig. 3. Mutual arrangement of coils in the plane

The spatial position information signal in magnetic tracking systems is obtained by selectively measuring the useful component voltage generated at the leads of the sensor coil and determined by the above-mentioned spatial distribution of the reference magnetic field. Selective measurement involves amplification of the sensor coil voltage, its synchronous detection, filtering and subsequent conversion by digital signal processing. Magnetic tracking systems are multichannel hardware containing 1D, 2D and 3D sensor and actuator coils, analog front-end units, switches, analog-to-digital converters, microprocessors, etc. optimized for a specific task. The number and relative positioning of the coils in these kits should enable the calculation of the spatial position with the specified accuracy and measurement range.

The problems of this work are due to the need to create software for calculating the coordinates of the spatial position of objects, taking into account the characteristic (specific) errors in the measurement of signals that occur in sensor systems of magnetic tracking.

Such errors are caused by the deviation of the values of the real signals from their nominal values determined by the signal model. In magnetic tracking systems, such errors can be classified into four types (fig. 4): ER1 – amplitude or/and phase mismatch; ER2 – electromagnetic interference; ER3 – base-level off-set; ER4 – signal restriction.

The reason for ER1 errors is the deviation of the coil parameters from their nominal values, in particular the number of turns, area, shape, etc. In 2D and 3D assemblies, these errors are caused by the deflection of the coil rotation angles. Nominal coils in assemblies should be placed at right angles. The problem of minimizing errors is solved by improving the accuracy of fabrication and refining the parameters in the calibration process.

ER2 errors are caused by electromagnetic interference from third-party (parasitic) radiation sources, mainly power lines and transformers, secondary power converters, radio devices, and the like. The level of this type of error is determined by the signal-to-noise ratio. Given that the amplitude of the information signal in

magnetic tracking systems is determined by the inverse cubic function of the distance  $L_{SA}$  between the sensor and actuator coils, the signal-to-noise ratio sharply decreases with increasing  $L_{SA}$  distance. It is this circumstance that

limits the range of magnetic tracking. In part, the problem of increasing the range is solved by increasing the magnetic moment of the coils and methods of noise-immunity synchronous detection.

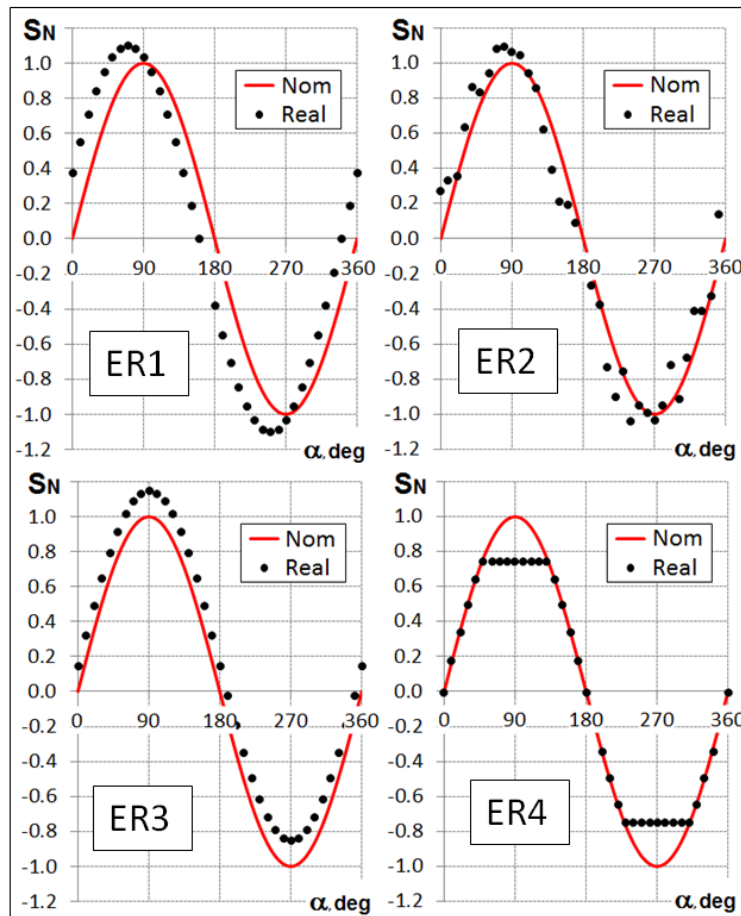


Fig. 4. Characteristic errors of signal measurement in magnetic tracking systems

ER3 errors are caused by a parasitic relationship between the input and output signal circuits of the sensor system. Given that in magnetic tracking systems, the ratio between the actuator coil output and the sensor coil input is up to six orders of magnitude higher, the problem of minimizing the parasitic relationship is of great relevance. Partial solution to this problem is based on the quality shielding of the signal circuits and the electromagnetic isolation of the earth circuits of these circles.

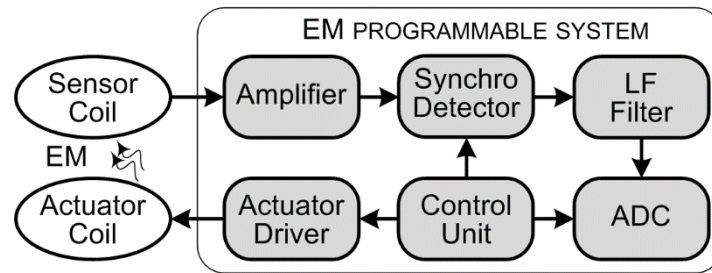
ER4 errors are caused by the signal amplitude limitation at short distances between the sensor and actuator coils. The level of such limitation is determined by the permissible voltage range in the signal circuits and is typically no more than a few volts. Especially the problem of signal limitation is relevant in the latest sensor equipment that satisfies the power requirements of low-voltage (3V or less) unipolar power supplies. In particular, these are devices in the concept of the Internet of Things. Partial solution to this problem is based on the dynamic switching of the input gain and the use of analog signal compression by logarithmic amplifiers.

Thus, signal analysis in magnetic tracking sensor systems, taking into account their characteristic errors, is

important for improving the accuracy of these systems. Such an analysis, in turn, requires the creation of a signal model and the use of this model to establish regularities between the accuracy of measuring the spatial position and the distance between the sensor and actuator coils. The signal model presented in the paper is based on the results of experimental studies, which will be discussed further.

#### Means and results of experimental studies

Experimental studies were carried out using the MTS IDE integrated magnetic tracking software. A simplified block diagram of the signal path of a programmable magnetic tracking system (EM Programmable System) based on one pair of coils is shown in fig. 5, where: Sensor Coil, Actuator Coil – sensor and actuator coils; Amplifier – amplifier; Synchro Detector - synchronous demodulator (detector); LF Filter – low frequencies filter; Actuator Driver – actuator driver; Control Unit - control module; ADC is an analog-to-digital converter. Signal path implementation for coil sets involves the use of signal multiplexers on analog switches.

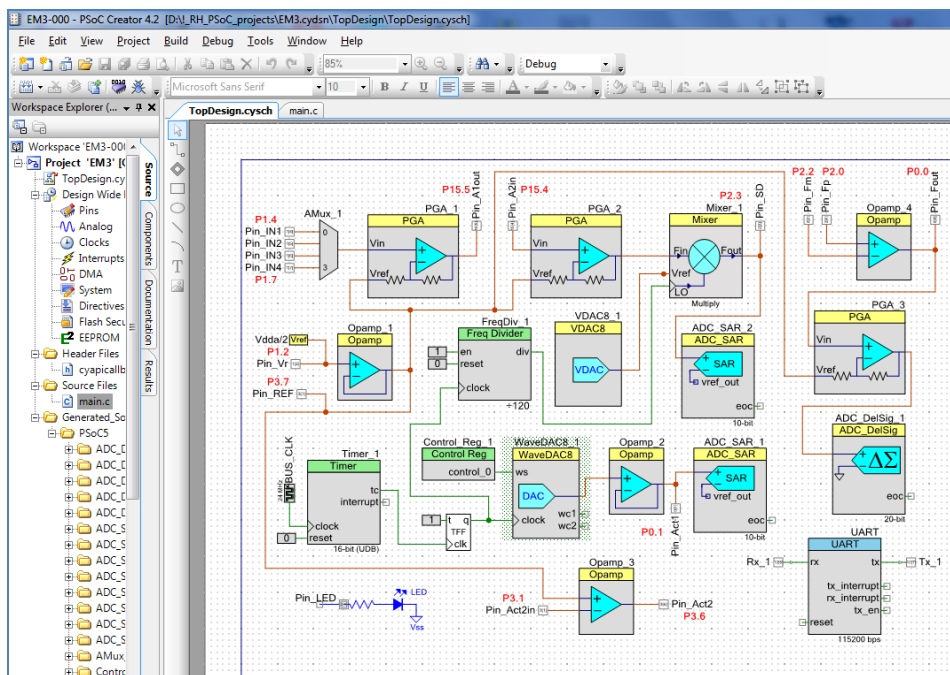


**Fig. 5.** Block diagram of the signal path of the sensor system of magnetic tracking

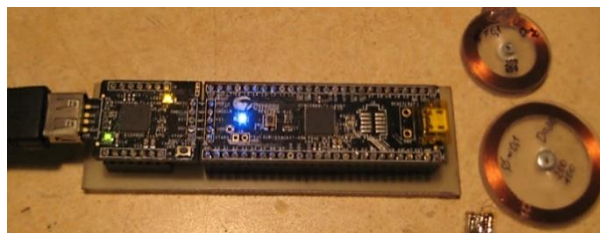
Taking into account the requirements for modern microelectronics, the signal path of the magnetic tracking sensor system is implemented on the concept of programmable systems on a chip, in particular, on the PSoC 5LP Family of Cypress Semiconductor Corporation [25]. The PSoC structure includes digital and analog system nodes, microprocessor nodes, power-dependent and non-volatile memory matrices, system resources, as well as programming and power management nodes. The basis of digital nodes is a matrix of universal digital blocks, specialized digital blocks, in particular for implementing interfaces, timers, pulse-width modulators, and the like. PSoC analog nodes are blocks on switching capacitors and blocks with continuous signal conversion, in particular: operational amplifiers, Comparators, reference voltage sources based on the forbidden zone,

analog multiplexers, and so on. Nodes are connected by a programmatically configured network of signal lines. The synthesis scheme, its configuration and the implementation of the specified measurement algorithm is implemented in the PSoC Creator IDE.

A fragment of the PSoC Creator work windows and the main components of a programmable magnetic tracking system are presented in fig. 6. The software management of these components is performed using sets of appropriate API (Application Programming Interface) functions. The implementation of the system is based on CY8C58xxLP module CY8CKIT-059 [26] and a small number of external passive components (mostly RC signal filter circuits). A photo of the model layout of the system is shown in fig. 7, and an example of an oscilloscope study of the input and signal detector highlighted in fig. 8.



**Fig. 6.** Fragment of PSoC Creator work windows



**Fig. 7.** Photo of a model sample of the magnetic tracking system

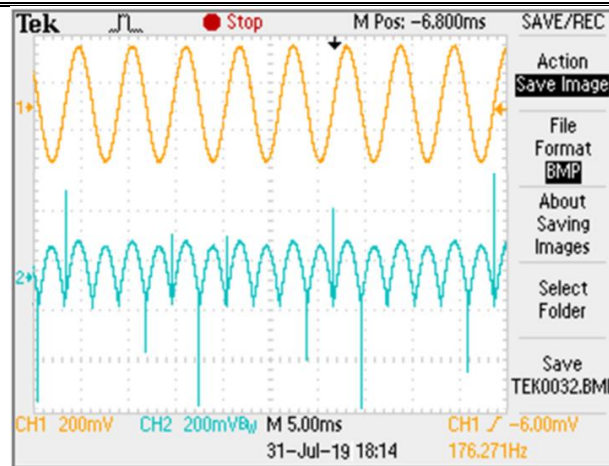


Fig. 8. Waveforms of the input (top) and the detector (bottom) selected signals

The equipment used for experimental investigations of the dependences of the information signals on the distance  $L_{SA}$  between the sensor and actuator coils and the angles  $\theta$ ,  $\alpha$ , is presented in fig. 9, and examples of families of such dependences for the three distances are shown in fig. 10 ( $L_{SA} = 50$  cm), fig. 11 ( $L_{SA} = 100$  cm) and fig. 12 ( $L_{SA} = 15$  cm). The output signals are

represented by the voltage  $V_s$  at the output of the signal path of the aforementioned programmable magnetic tracking system. The gain was selected by  $V_s$  ( $L_{SA} = 50$  cm)  $\approx 100$  mV. The rotation of the sensor coil (fig. 3) is relative to the  $X_s$  axis, coinciding with the vector  $L_{SA}$  (the radius of its rotation relative to the plane of the actuator coil).

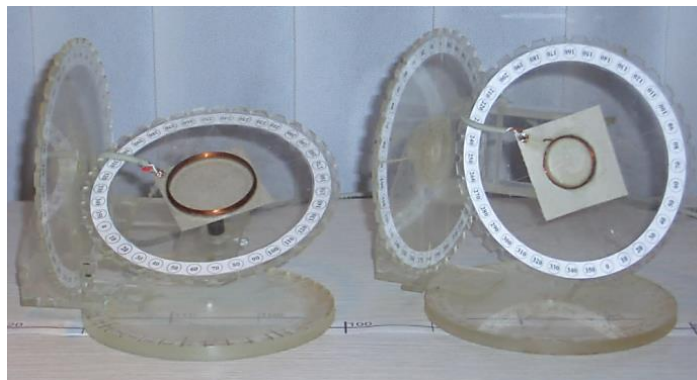


Fig. 9. Equipment for spatial orientation of the coils

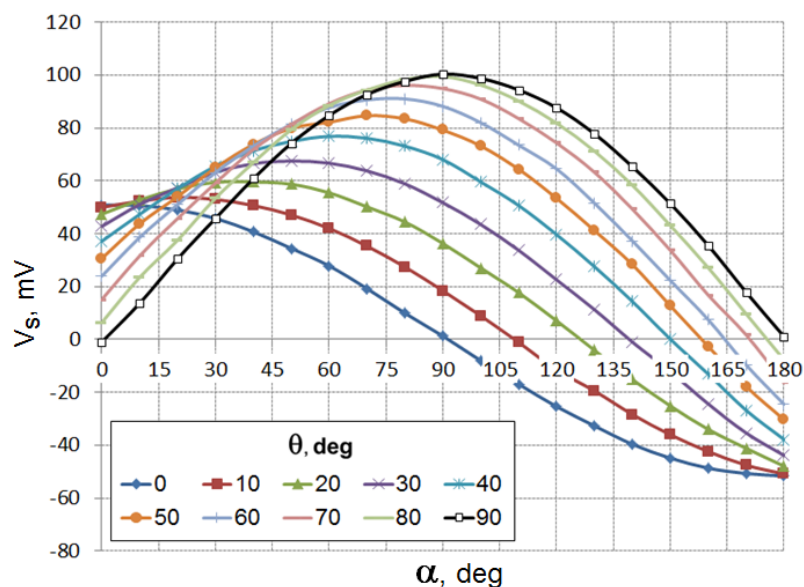


Fig. 10. The signal family  $V_s = f(L_{SA}, \theta, \alpha)$  at  $L_{SA} = 50$  cm

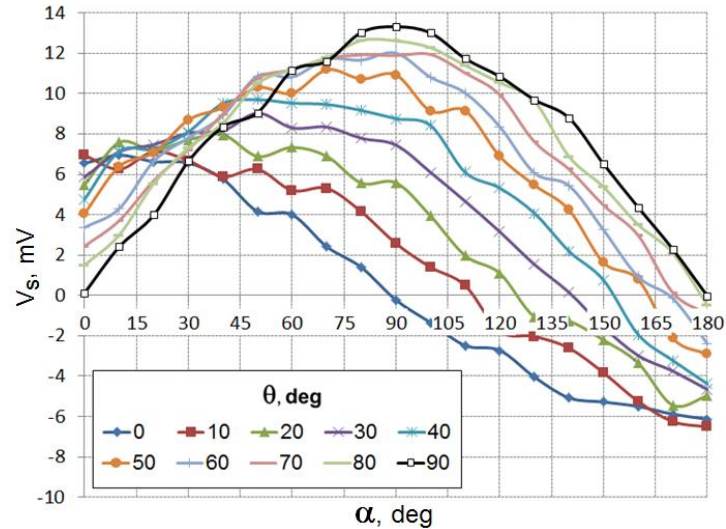


Fig. 11. The signal family  $V_s = f(L_{SA}, \theta, \alpha)$  at  $L_{SA} = 100$  cm

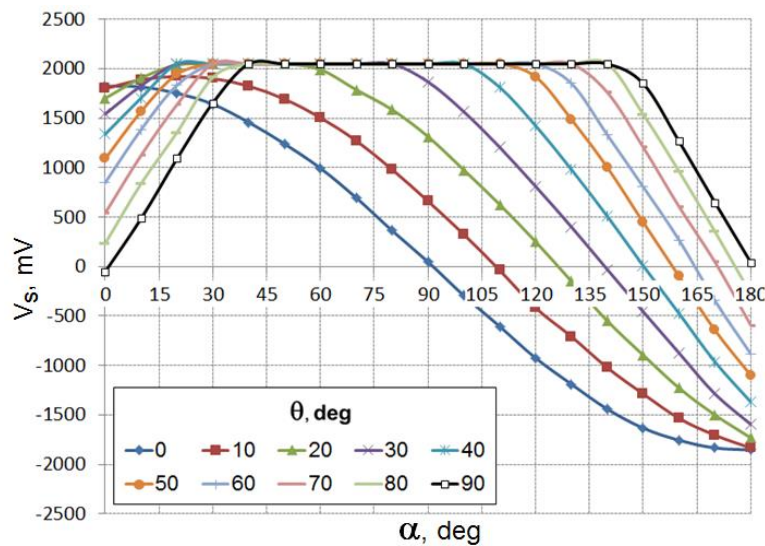


Fig. 12. The signal family  $V_s = f(L_{SA}, \theta, \alpha)$  at  $L_{SA} = 15$  cm

Two types of errors are observed, namely, electromagnetic interference (ER2) at  $L_{SA} = 100$  cm and signal limitations (ER4) at  $L_{SA} = 15$  cm. The other two types of errors, namely, amplitude or phase inconsistency (ER1) and base level bias (ER3), were minimized as much as possible during debugging of the signal path of the magnetic tracking system, and therefore, for further parametric analysis, are not determinative.

The following patterns are typical for all received signal families:

- at  $\theta = 0^\circ$  the maximum signal level is observed at  $\alpha = 0^\circ$ , and minimum – at  $\alpha = 90^\circ$ ;
- at  $\theta = 90^\circ$  the maximum signal level is observed at  $\alpha = 90^\circ$ , and minimum – at  $\alpha = 0^\circ$  та  $180^\circ$ ;
- the maximum value of the normal projection  $B_N$  of magnetic field induction (at  $\theta = 90^\circ$ ) is twice the maximum value of the tangential projection  $B_T$  (at  $\theta = 90^\circ$ ).

At  $L_{SA} = 50$  cm, the signal families have virtually no deviation from the nominal sine functions. At  $L_{SA} = 100$

cm, the signal level drops 8 times (maximum voltage  $V_s \approx 13$  mV), which coincides with the nominal dependence of the magnetic field on the distance (inverse cubic function of the distance  $L_{SA}$  between the sensor and actuator coils). At  $L_{SA} = 100$  cm, the signal-to-noise ratio significantly deteriorates. On the other hand, at  $L_{SA} = 15$  cm, noise is practically not observed, however, the signal is limited to  $\approx \pm 2000$  mV. These limits are determined by the maximum allowable voltage level in the signal circuit.

#### Signal model.

According to the experimental data obtained, the maximum value of the normal  $B_{NM}$  projection of the magnetic field induction is twice the maximum value of the tangential  $B_{TM}$  projection. So let's write down their values in the normalized form:

$$B_{NM} = B_N \left( \theta = \frac{\pi}{2} \right) = 1.0; \quad B_{TM} = B_T (\theta = 0) = 0.5. \quad (2)$$

Having determined the trigonometric functions of the spatial distribution of these projections

$$B_N(\theta) = B_M(\theta)\sin(\theta), \quad B_T(\theta) = B_M(\theta)\cos(\theta). \quad (3)$$

let's write down the expressions of dependencies of the module BM the induction vector and the contribution angle  $\psi$  of its slope

$$B_M(\theta) = \sqrt{B_N^2(\theta) + B_T^2(\theta)}, \quad \psi = \arctg \frac{B_T(\theta)}{B_N(\theta)}. \quad (4)$$

An illustration of the dependencies  $B_N(\theta)$ ,  $B_T(\theta)$  and  $B_M(\theta)$  is presented in fig. 13.

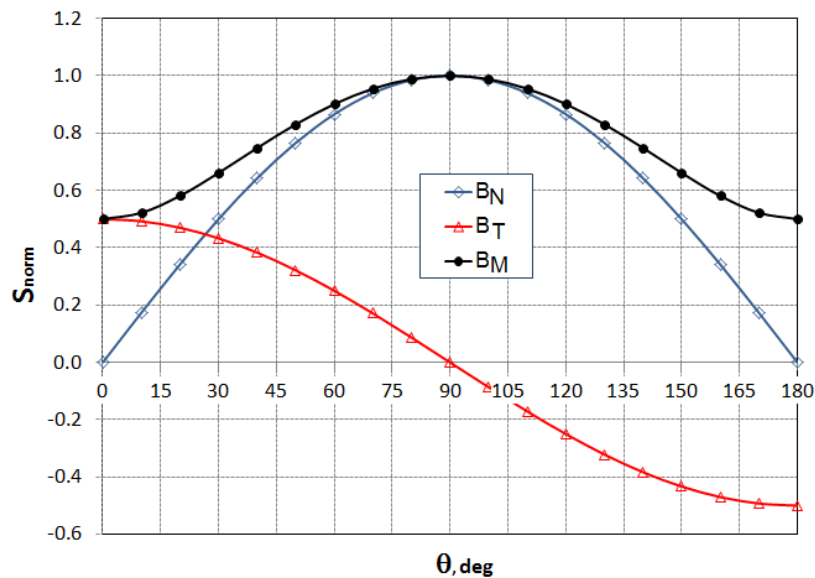


Fig. 13. Dependencies  $B_N(\theta)$ ,  $B_T(\theta)$  and  $B_M(\theta)$

Next let's consider the angles of inclination of the sensor coil  $\alpha_0(\theta)$  at which its plane coincides with the field induction vector. At these angles there is zero level of informative signal. Further

$$V_s = 0 @ \alpha(\theta) = \alpha_0(\theta) = \theta - \psi. \quad (5)$$

The @ symbol in the formula means "when". Instead, the maximum signal level occurs when the plane of the sensor coil is rotated by  $\pi/2$  relative to the field

induction vector (the sensor coil normal coincides with the field vector)

$$V_s = V_{MAX} @ \alpha(\theta) = \alpha_{MAX}(\theta) = \theta - \psi + \frac{\pi}{2}. \quad (6)$$

An illustration of the dependencies  $\alpha_{MAX}(\theta)$  and  $\alpha_0(\theta)$  is presented in fig. 14.

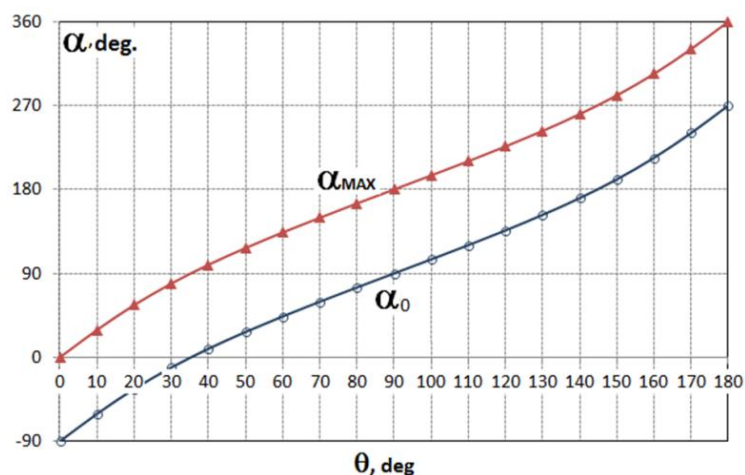


Fig. 14. Dependencies  $\alpha_{MAX}(\theta)$  and  $\alpha_0(\theta)$

From the point of view of calibration of the magnetic tracking system and the use of signal model data for calculating the spatial position of the sensor coil, it is

advisable to consider two characteristic variants of its rotation. In the first variant, the rotation is performed relative to the axis  $OX_A$  in the coordinate system of the

actuator coil. Then the family of normalized signals of the sensor coil is defined by the expression

$$V_{SN1}(\theta, \alpha) = B_M(\theta) \cos(\alpha - \alpha_{MAX}(\theta)). \quad (7)$$

But in the second variant, the sensor coil is rotated relative to the  $X_s$  axis, which coincides with the  $L_{SA}$  vector (the radius of rotation relative to the plane of the actuator coil). This option coincides with the turns according to fig. 3 and shown in fig. 10 – fig. 12

according to experimental data. Then the family of normalized signals of the sensor coil is defined by the expression

$$V_{SN2}(\theta, \alpha) = B_M(\theta) \cos(\alpha + \theta - \alpha_{MAX}(\theta)). \quad (8)$$

Families of normalized signals are constructed using these expressions  $V_{SN1}(\theta, \alpha)$  (fig. 15) and  $V_{SN2}(\theta, \alpha)$  (fig. 16).

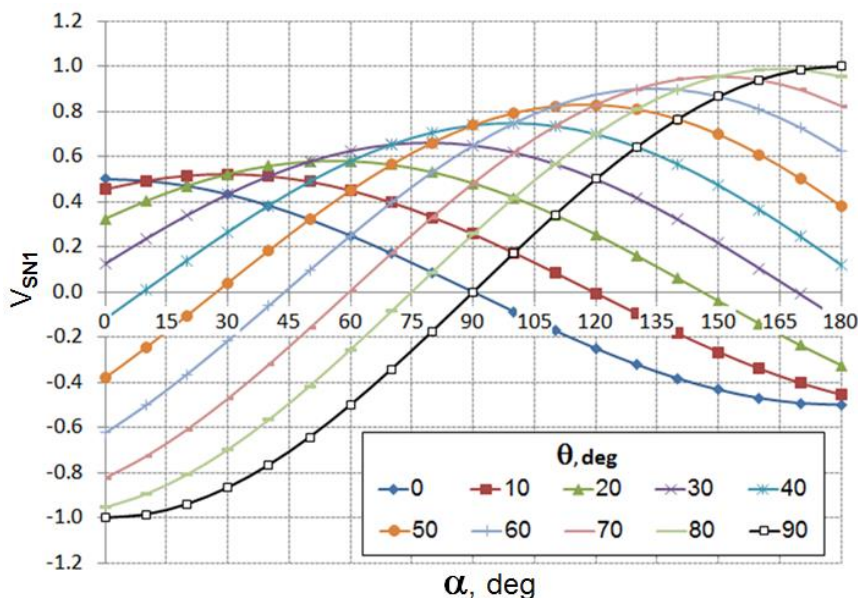


Fig. 15. The family of normalized signals  $V_{SN1}(\theta, \alpha)$

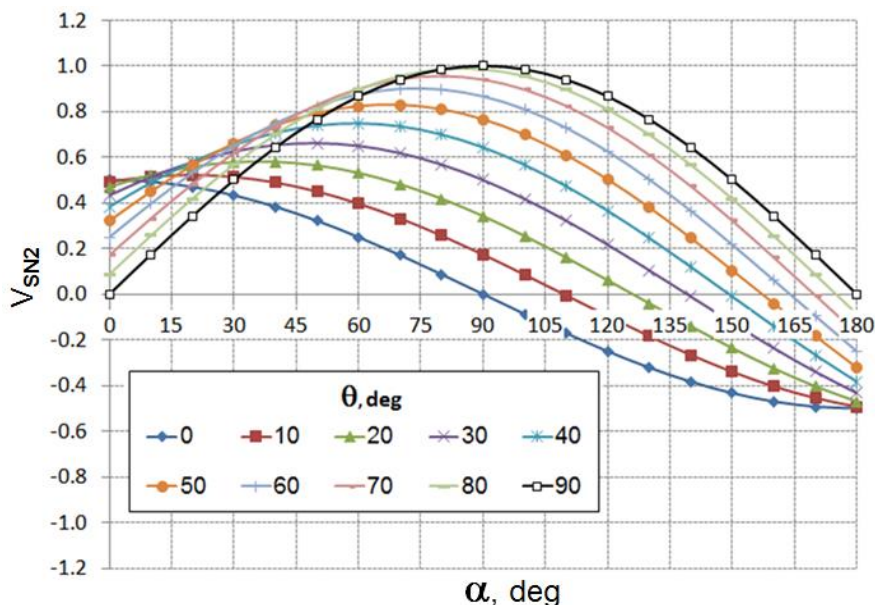
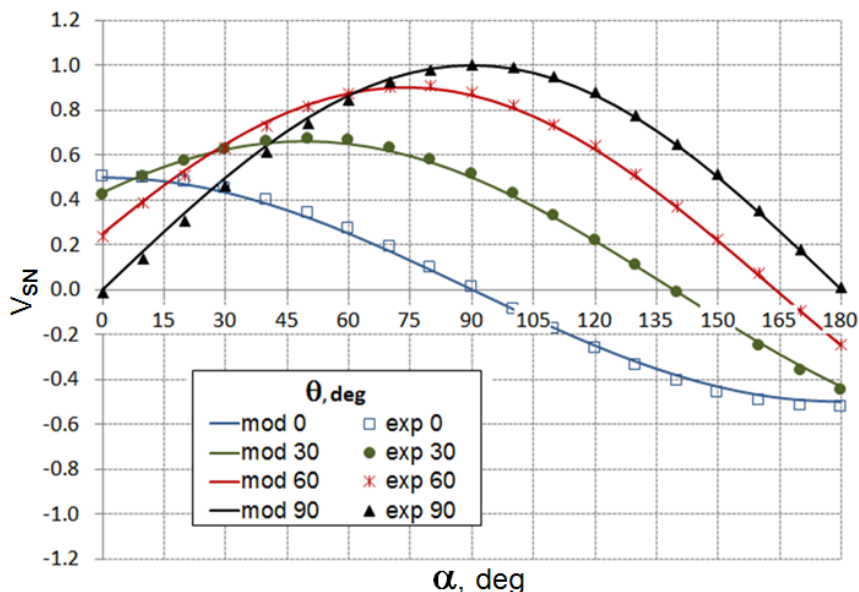


Fig. 16. The family of normalized signals  $V_{SN2}(\theta, \alpha)$

#### The results of the verification of the signal model and their discussion

To verify the above signal model, we will compare the families of its normalized signals with the normalized signals of experimental measurements. An example of

such a comparison, which used data from the family of signals  $V_S = f(L_{SA}, \theta, \alpha)$  at  $L_{SA} = 50$  cm (fig. 10), is shown in fig. 17. You can see, at least at the level of qualitative analysis within a few percent, good agreement of these data.

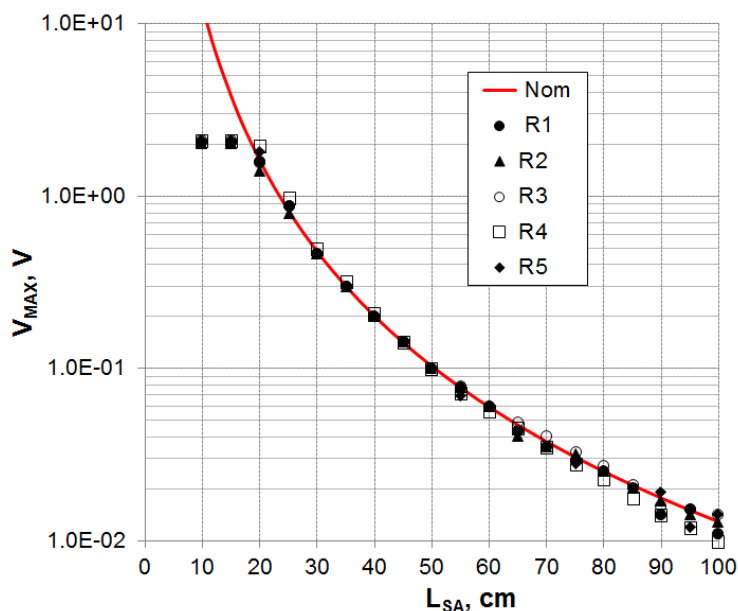


**Fig. 17.** Comparison of model (mod) and experimental (exp) data

To quantify the accuracy of the proposed signal model, numerous experimental studies of the signal families  $V_S = f(L_{SA}, \theta, \alpha)$  have been performed with different sets of sensor and actuator coils. In particular, these studies used actuator coils with a diameter of  $D_A = 50$  mm at the number of turns  $N_A = 100$  and sensor coils with a diameter of  $D_S = 30$  mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm and 50 mm at the number of turns  $N_S = 300$ . The signal

path gain was selected for each set according to the criterion  $V_S (L_{SA} = 50 \text{ cm}) \approx 100 \text{ mV}$ .

First, a comparison was made of the nominal (Nom) and experimental (variants – R1, R2, R3, R4, R5) dependencies of the maximum voltage  $V_{MAX}$  on the distance  $L_{SA}$  (fig. 18). The data of nominal (model) dependencies were determined by the inverse cubic function of the distance  $L_{SA}$  between the sensor and actuator coils.



**Fig. 18.** Nominal (Nom) and experimental (R1... R5)  $V_{MAX}$  voltage dependencies on  $L_{SA}$  distance

It can be seen that in the range of distances from  $L_{SA} = 30$  cm  $L_{SA} = 60$  cm, the discrepancy between the experimental data and the nominal data is practically not observed. When the  $L_{SA}$  distance increases  $> 60$  cm, the experimental data variation also increases, which is

caused by errors of the ER2 type (electromagnetic interference).

On the other hand, when the  $L_{SA}$  distance decreases by  $< 20$  cm, there is an error of the ER4 type (signal limitation). In the range of  $20 \text{ cm} < L_{SA} < 30 \text{ cm}$ , there is a certain deviation from the nominal experimental data,

which is caused by the "proximity" effect. There are two reasons for this effect. The first of them is the proportionality of the coil diameters with the distance between them, which leads to more complex functional dependencies based on the integration of the field over the area of the coils. The second reason is the emergence of an inductive relationship between the sensory and actuator coils.

For a more accurate analysis of the signal model, it is proposed to use the integrated standard deviation indicator  $S_{RMS}$ , calculated for families of normalized signals. For this purpose, a two-dimensional array [N M] is formed, where N and M are, respectively, the number of signal values when rotating at angles  $\alpha$  and  $\theta$ . Then, in this array, the values of experimental studies  $S_{RE}(\theta, \alpha)$  and model calculations  $S_{MO}(\theta, \alpha)$  are compared. The integrated indicator of this comparison is the standard deviation

$$S_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (S_{REij}(\theta, \alpha) - S_{MOij}(\theta, \alpha))^2}, \quad (9)$$

calculated for each distance  $L_{SA}$  value.

An example of the thus obtained dependence of the root mean square deviation of the  $S_{RMS}$  of the experimental data families from their model values is shown in fig. 19.

It can be seen that the obtained dependencies of the integrated  $S_{RMS}$  deviation qualitatively reproduce the preliminary analysis data at the maximum voltage  $V_{MAX}$ . In particular, in the range of distances from  $L_{SA} = 30$  cm to  $L_{SA} = 65$  cm, the minimum values of the integrated indicator are observed –  $S_{RMS} < 0.01$ . The patterns of increase in  $S_{RMS}$  beyond this range and the reasons for this increase are similar to the above.

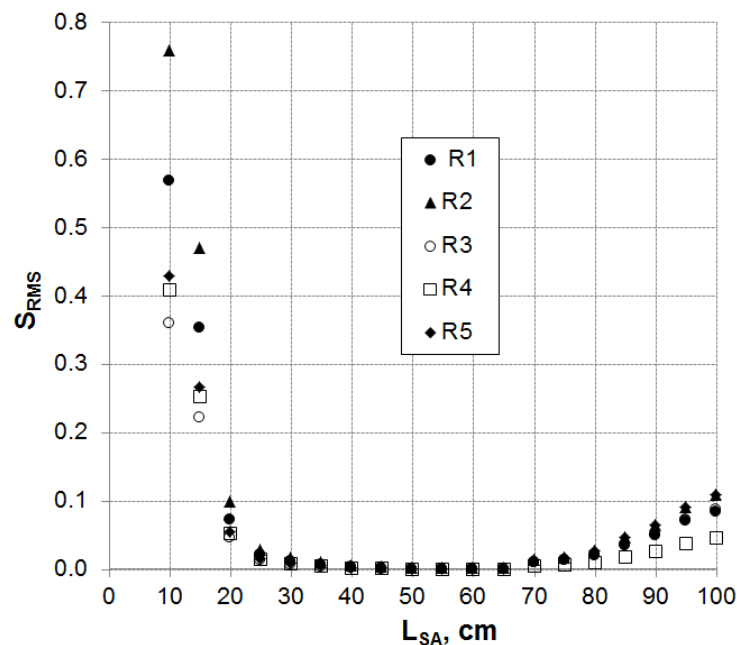


Fig. 19. Dependencies of the  $S_{RMS}$  of the experimental data families on their model values

The level of  $S_{RMS}$ , as a whole, is determined not only by the accuracy of the model presented, but also by the parameters of the coils and signal converter of the magnetic tracking system. Such parameters are the size and magnetic moment of the coils, noise immunity and the dynamic range of the signal path, the bit of the analog-to-digital converter, the accuracy of calibration and so on. In particular, noise immunity is enhanced by the optimization of bandpass filters, and dynamic range expansion by logarithmic gain schemes. These issues are beyond the scope of this publication.

### Conclusions and prospects for further development

The principle of functioning of magnetic tracking systems and problems that arise in the process of development of these systems are considered. The spatial

position of the objects is calculated by measuring the vector of induction of the reference magnetic fields in the low-frequency spectrum of electromagnetic radiation. Preferably, sensors and actuators in sensor-based magnetic tracking systems are small-sized coils and their 2D or 3D assemblies. The structure of the signal path of the programmable magnetic tracking system and its implementation based on the PSOC of the 5LP Family Cypress Semiconductor Corporation are disclosed. The results of experimental studies of the signal family when changing the distance between the  $L_{SA}$  coils and the angles of their relative positions  $\theta, \alpha$  are presented. Typical errors are analyzed and methods of their minimization are analyzed.

Taking into account the principle of operation and data of experimental studies, a signal model has been developed that describes the functional dependencies of

informative signals, namely the voltage  $V_s = f(L_{sa}, \theta, \alpha)$ .

In the process of verification of the developed model, an array of the integrated standard deviation standard deviation of the SRMS families of normalized signals is calculated.

Further development of the results presented in this paper involves the application of the proposed signal

model in the problems arising in the development of magnetic tracking systems. In particular, this is the development and specification of algorithms for calculating the spatial position, debugging and express evaluation of the accuracy of the system functioning, optimization of calibration procedures.

## References

- Vitturi, S., Zunino, C. and Sauter, T. (2019), "Industrial communication systems and their future challenges: next-generation Ethernet, IIoT, and 5G", *Proceedings of the IEEE*, No. 107 (6), P. 944–961. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2913443
- Hongtao, W., Zhimin, Y., Ping, W., Santoso, B. and Lian, O. (2018), "A novel method of motion tracking for virtual reality using magnetic sensors", *Proceedings of the 2018 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference (APMRC), November 15 – 17, Shanghai, 2018*. DOI: 10.1109/APMRC.2018.8601108
- Singh, M. and Jung, B. (2017), "High-definition wireless personal area tracking using AC magnetic field for virtual reality", *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*. DOI: 10.1109/VR.2017.7892250
- Aceto, G., Persico, V. and Pescape, A. (2019), "A survey on information and communication technologies for Industry 4.0: state-of-the-art, taxonomies, perspectives, and challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, No. 21 (4), P. 3467–3501. DOI: 10.1109/COMST.2019.2938259
- Liu, Y., Kashef, M., Lee, K., Benmohamed, L. and Candell, R. (2019), "Wireless network design for emerging IIoT applications: reference framework and use cases", *Proceedings of the IEEE*, No. 107 (6), P. 1166–1192. DOI: 10.1109/JPROC.2019.2905423
- Simiscuka, A., Markande, T. and Muntean, G. (2019), "Real-virtual world device synchronization in a cloud-enabled social virtual reality IoT network", *IEEE Access*, No. 7, P. 106588–106599. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2933014
- Fraga-Lamas, P., Fernandez-Carames, T., Blanco-Novoa, O. and Vilar-Montesinos, M. (2018), "A review on industrial augmented reality systems for the Industry 4.0 Shipyard", *IEEE Access*, No. 6, P. 13358–13375. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2808326
- Chatzopoulos, D., Bermejo, C., Huang, Z. and Hui, P. (2017), "Mobile augmented reality survey: from where we are to where we go", *IEEE Access*, No. 5, P. 6917–6950. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2698164
- Lee, C. and Kim, D. (2018), "Visual homing navigation with Haar-like features in the snapshot", *IEEE Access*, No. 6, P. 33666–33681. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2842679
- Rose, C., Britt, J., Allen, J. and Bevely, D. (2014), "An integrated vehicle navigation system utilizing lane-detection and lateral position estimation systems in difficult environments for GPS", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, No. 15 (6), P. 2615–2629. DOI: 10.1109/TITS.2014.2321108
- Zhang, Y. (2019), "A fusion methodology to bridge GPS outages for INS/GPS integrated navigation system", *IEEE Access*, No. 7, P. 61296–61306. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2911025
- Gennarelli, G., Vivone, G., Braca, P., Soldovieri, F. and Amin, M. (2015), "Multiple extended target tracking for through-wall radars", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No. 53 (12), P. 6482–6494. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2441957
- Fedasyuk, D., Holyaka, R. and Marusenkova, T. (2019), "A tester of the MEMS accelerometers operation modes", *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), Lviv, July 3 – 6, 2019*. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847840
- Fedasyuk, D., Holyaka, R. and Marusenkova, T. (2019), "Method of analyzing dynamic characteristics of MEMS gyroscopes in test measurement mode", *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice, June 5–7, 2019*, P. 157–160. DOI: 10.1109/ACITT.2019.8780058
- Jo, D. and Kim, G. (2016), "ARIoT: scalable augmented reality framework for interacting with Internet of Things appliances everywhere", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, No. 62 (3), P. 334–340. DOI: 10.1109/tce.2016.7613201
- Reichl, T., Gardiazabal, J. and Navab, N. (2013), "Electromagnetic servoing – a new tracking paradigm", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, No. 32 (8), P. 1526–1535. DOI: 10.1109/tmi.2013.2259636
- Franz, A., Haidegger, T., Birkfellner, W., Cleary, K., Peters, T. and Maier-Hein, L. (2014), "Electromagnetic tracking in medicine – a review of technology, validation, and applications", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, No. 33 (8), P. 1702–1725. DOI: 10.1109/tmi.2014.2321777
- Alves, N., Jobst, C., Hotze, F., Ferrari, P., Lalancette, M., Chau, T., van Lieshout, P. and Cheyne, D. (2016), "An MEG-compatible electromagnetic-tracking system for monitoring orofacial kinematics", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, No. 63 (8), P. 1709–1717. DOI: 10.1109/tbme.2015.2500102
- Song, S., Li, Z., Yu, H. and Ren, H. (2015), "Electromagnetic positioning for tip tracking and shape sensing of flexible robots", *IEEE Sensors Journal*, No. 15 (8), P. 4565–4575. DOI: 10.1109/jsen.2015.2424228
- Kay, S. (2005), "The multifamily likelihood ratio test for multiple signal model detection", *IEEE Signal Processing Letters*, No. 12 (5), P. 369–371. DOI: 10.1109/LSP.2005.845590
- Matthews, A. (2017), "VR 3D electromagnetic motion tracking sensor", available at: <https://www.electronicsspecifier.com/sensors/vr-3d-electromagnetic-motion-tracking-sensor#downloads>
- Premo 3DV06 Datasheet (2018), available at: <https://3dcoil.grupopremo.com> (last accessed December 10 2019).
- De Angelis, G., De Angelis, A., Moschitta, A. and Carbone, P. (2017), "Comparison of measurement models for 3D magnetic localization and tracking", *Sensors*, No. 17 (11), P. 2527. DOI: 10.3390/s17112527
- Bezdicek, M., and Caldwell, D. (2006), "Portable absolute position tracking system for human hand fingertips", *Proceedings of Virtual Concept*, Cancún, Mexico, P. 1–8.
- Cypress Semiconductor Corporation (2019), *PSoC® 5LP: CY8C52LP Family Datasheet: Programmable System-on-Chip*, available at: <http://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c52lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc> (last accessed December 12 2019).

26. Cypress Semiconductor Corporation. (2018), *PSoC® 5LP: CY8CKIT-050 PSoC 5LP Development Kit Guide*, available at : <http://www.cypress.com/file/45276/download> (last accessed December 10 2019).

Received 12.02.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Голяка Роман Любомирович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет "Львівська політехніка", професор кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій, Львів, Україна; email: holyaka@yahoo.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7720-0372>.

**Голяка Роман Любомирович** – доктор технических наук, профессор, Национальный университет "Львовская политехника", профессор кафедры электронных средств информационно-компьютерных технологий, Львов, Украина.

**Holyaka Roman** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Lviv Polytechnic National University, Professor of the Department of Electronics and Information Technology, Lviv, Ukraine.

**Марусенкова Тетяна Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет "Львівська політехніка", доцент кафедри програмного забезпечення, Львів, Україна; email: tetyana.marus@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4508-5725>.

**Марусенкова Татьяна Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет "Львовская политехника", доцент кафедры программного обеспечения, Львов, Украина.

**Marusenkova Tetyana** – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Lviv Polytechnic National University, Associate Professor of the Department of Software, Lviv, Ukraine.

**Федасюк Дмитро Васильович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет "Львівська політехніка", професор кафедри програмного забезпечення, Львів, Україна; email: fedasyuk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3552-7454>.

**Федасюк Дмитрий Васильевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный университет "Львовская политехника", профессор кафедры программного обеспечения, Львов, Украина.

**Fedasyuk Dmytro** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Lviv Polytechnic National University, Professor of the Department of Software, Lviv, Ukraine.

## СИГНАЛЬНА МОДЕЛЬ СЕНСОРІВ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ В СИСТЕМАХ МАГНІТНОГО ТРЕКІНГУ

**Предметом** дослідження в статті є процеси формування сигналів в системах магнітного трекінгу, зокрема для задач визначення просторового положення в концепціях - Індустрія 4.0 та Індустріальний Інтернет Речей. Такі системи базуються на визначенні просторового положення об'єктів за результатами вимірювання вектора індукції опорних магнітних полів у низькочастотному спектрі електромагнітного випромінювання. **Метою** роботи є розроблення та верифікації сигнальної моделі для розрахунку просторового положення об'єктів у системах магнітного трекінгу. Сигнальна модель розробляється на основі експериментально отриманих сімейств залежностей інформативних сигналів від відстані та кутів між сенсорною та актуаторною котушками. **Завдання:** аналіз сигналів в системах магнітного трекінгу, розроблення засобів проведення експериментальних досліджень, математична інтерпретація результатів досліджень з розробленням сигнальної моделі, верифікація та застосування цієї моделі. Використовуються загальнонаукові **методи:** експеримент, вимірювання, аналіз, синтез, методи теорії ймовірностей і статистики. Отримано такі **результати.** Розкрито структура сигнального тракту програмованої системи магнітного трекінгу та його реалізація на основі PSoC сімейства 5LP Family Cypress Semiconductor. Представлені результати експериментальних досліджень сімейства сигналів при зміні відстані між котушками та кутів їх взаємного положення. Для розрахунку просторового положення використовують сигнальні моделі, які описують розподіл сформованих магнітних полів та сигналів сенсорних котушок. Проведено аналіз типових похибок та способів їх мінімізації. Для верифікації розробленої сигнальної моделі пропонується використання інтегрованого показника середньоквадратичного відхилення сімейств нормованих сигналів. **Висновки.** Розроблена сигнальна модель взаємного положення актуаторів та сенсорів в системах магнітного трекінгу. Модель описує функціональні залежності, основними аргументами яких є відстань між котушками та кути їх взаємного нахилу. Подальший розвиток представлених в роботі результатів передбачає застосування запропонованої сигнальної моделі в задачах розроблення та специфікації алгоритмів розрахунку просторового положення, відлагодження та експрес-оцінки точності функціонування системи, оптимізації процедур калібрування.

**Ключові слова:** пристрої Індустрії 4.0; магнітний трекінг; сигнальна модель; програмована система на кристалі.

## СИГНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СЕНСОРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ МАГНИТНОГО ТРЕКИНГА

**Предметом** исследования в статье являются процессы формирования сигналов в системах магнитного трекинга, в частности, для задач определения пространственного положения в концепциях Индустрия 4.0 и Индустриальный Интернет Вещей. Такие системы основываются на определении пространственного положения объектов по результатам измерения вектора индукции опорных магнитных полей в низкочастотном спектре электромагнитного излучения. **Цель** работы – разработка и верификация сигнальной модели для расчета пространственного положения объектов в системах магнитного трекинга. Сигнальная модель разрабатывается на основе полученных экспериментальным путем семейств зависимостей информативных сигналов от расстояния и углов между сенсорной и актуаторной катушками. **Задания:** анализ сигналов в системах магнитного трекинга, разработка средств проведения экспериментальных исследований, математическая

интерпретация результатов исследований с разработкой сигнальной модели, верификация и использование этой модели. Используются общенаучные **методы**: эксперимент, измерение, анализ, синтез, методы теории вероятностей и статистики. Получены следующие **результаты**: Раскрыта структура сигнального тракта программируемой системы магнитного трекинга и его реализация на основе PSoC семейства 5LP Family Cypress Semiconductor. Представлены результаты экспериментальных исследований семейства сигналов при изменении расстояния между катушками и углов взаимного размещения. Для расчета пространственного положения используют сигнальные модели, которые описывают распределение сформированных магнитных полей и сигналов сенсорных катушек. Проведен анализ типичных погрешностей и способов их минимизации. Для верификации разработанной сигнальной модели предлагается использование интегрированного показателя среднеквадратического отклонения семейств нормированных сигналов. **Выводы**. Разработана сигнальная модель взаимного положения актюаторов и сенсоров в системах магнитного трекинга. Модель описывает функциональные зависимости, основными аргументами которых являются расстояние между катушками и углы их взаимного наклона. Дальнейшее развитие представленных в работе результатов предполагает использование предложенной сигнальной модели в задачах разработки и спецификации алгоритмов расчета пространственного положения, отладки и экспресс-оценки точности функционирования системы, оптимизации процедур калибровки.

**Ключевые слова**: устройства Индустрии 4.0; магнитный трекинг; сигнальная модель; программируемая система на кристалле.

*Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Голяка Р. Л., Марусенкова Т. А., Федасюк Д. В. Сигнальна модель сенсорів просторового положення в системах магнітного трекінгу. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.005>.

Holyaka, R., Marusenkova, T., Fedasyuk, D. (2020), "Signal model for spatial position sensors in magnetic tracking systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.005>.

Л. С. СМІДОВИЧ, О. В. АРТЮХ, Н. В. КОСЕНКО

## АВТОМАТИЗАЦІЯ АНАЛІЗУ ЯКОСТІ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ ТА РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕСТУВАННЯ СТУДЕНТІВ ІТ-СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

**Предметом** дослідження статті є статистичні моделі і методи оцінювання якості тестових завдань, а також процеси та технології інформаційної підтримки оцінювання результатів тестування та якості тестів. **Метою** є підвищення якості тестових завдань та точності оцінювання результатів тестування в умовах постійних змін змісту навчальних програм і вмісту тестових завдань, та скорочення часу на обробку результатів тестування за рахунок автоматизації, застосування розроблених алгоритмів та інформаційної системи тощо. В роботі вирішуються наступні **задачі**: аналіз процесу підготовки та проведення тестування; проведення аналітичного огляду статистичних методів оцінювання якості тестових завдань та показників якості тестових завдань; розробка узагальненого процесу підготовки та проведення тестування; автоматизація аналізу результатів тестування студентів ІТ-спеціальностей. Для вирішення зазначених завдань були використані **методи** статистичного аналізу, модель Rasch IRT (Item Response Theory), технології розробки програмних додатків. Отримані наступні **результати**. Проаналізовано процес підготовки та проведення тестування, запропоновано його модифікацію з урахуванням особливостей тестування студентів ІТ-спеціальностей. Вибрано показники якості тестових завдань та моделі і методи їх розрахунку, зокрема модель Rasch IRT. Наведено інтерпретацію значень показників якості тестових завдань, та розрахунок коефіцієнтів аномалії якості завдання, які є основою для формування поради щодо поліпшення якості тесту. Розроблено прототип інформаційної системи підтримки процесу аналізу якості тестових завдань, оцінювання результатів тестування та прийняття рішень про модифікацію тесту. Проведено тестування системи при оцінюванні результатів модульного контролю студентів третього курсу. **Висновки**: автоматизація та інформаційна підтримка розрахунку та аналізу показників якості тестових завдань та результатів тестування дозволить підвищити точність оцінювання та скоротити час на обробку результатів тестування.

**Ключові слова**: оцінка якості тестових завдань; тестове завдання; процес тестування; статистичні методи; моделі IRT; валідність; надійність; диференціююча здатність.

### Вступ

Питанню якості освіти та її управління надається важливе значення в законах і інших нормативних актах України, зокрема в Законі про вищу освіту. Впровадження стандартизованих освітніх вимірювань у вищій школі є одним із інструментів управління якістю вищої освіти. Одним із методів вимірювання і оцінювання рівня навчальних компетенцій та контролю якості знань студентів є застосування педагогічних тестів [1 - 3]. Тестування є одним із базових інструментів модульно-рейтингової системи (МРС) оцінювання знань студентів. При проектуванні тестів та тестових завдань, та їх застосуванні, актуальним є завдання оцінювання та контролю їх якості.

Особливістю навчання студентів ІТ-спеціальностей є швидка зміна технологій і відповідно вимог до компетенцій майбутніх фахівців, що потребує постійної зміни учбового матеріалу. Це в свою чергу вимагає постійної модернізації тестів та

розробки нових тестових завдань, і відповідно оцінювання їх якості з метою коригування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

При проектуванні та застосуванні тестів вирішуються наступні завдання: конструювання тесту, апробація – проведення пробного тестування, визначення та розрахунок показників якості тесту, оцінювання якості тесту, корегування тестових завдань та побудова кінцевого варіанту тесту, проведення тестування, оцінювання результатів тестування [3, 4].

Особливістю класичного процесу підготовки та застосування тесту (рис. 1) є наявність етапу апробації тесту перед його застосуванням, а також його лінійний характер в межах однієї сесії тестування. Після тестування може бути проведено розрахунок і аналіз показників якості тесту та відповідно корегування тестових завдань.

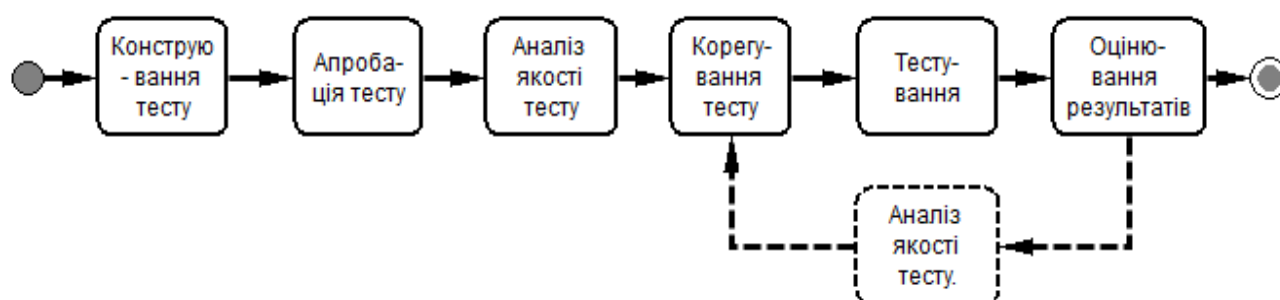


Рис. 1. Класичний процес підготовки тесту, тестування та оцінювання

В умовах швидкої зміни змісту тестових завдань використання традиційних методів конструювання тесту, які включають в себе експериментальну апробацію та наступне коригування тестових завдань з метою покращення їх якості, не завжди є ефективним. Актуальним є завдання розробки процесу, який би дозволяв проводити модифікацію тесту безпосередньо при оцінюванні результатів, без необхідності проведення іншої сесії тестування.

Для оцінювання показників якості тесту та результатів тестування використовують статистичні методи та моделі – як класичні статистичні методи [4, 5], так і моделі IRT (Item Response Theory) [6 - 8], які дозволяють оцінити якість тестових завдань з різних сторін. Початковими даними для статистичних методів оцінювання якості тестів є результати тестування.

В основі класичних методів оцінювання якості тестів лежить статистична теорія вимірювань та ідея еталонної оцінки [4, 5, 9, 10]. Оцінка якості тесту та тестових завдань полягає в розрахунку таких характеристик, як валідність, надійність, диференціююча здатність.

**Валідність** – одна з характеристик якості тесту, що визначає відповідність змісту тесту, тому, що він повинен оцінити. Варто звернути увагу на те, що кореляційний зв'язок тестового завдання з тестом в цілому може бути нижчим за рахунок того, що випробуваний володіє тільки фрагментарними знаннями в предметі, списував чи намагався вгадати відповідь при проведенні тестування.

**Надійність** тесту вимірює ступінь стійкості результатів тестування. Отриманий коефіцієнт надійності показує кореляційний зв'язок між результатами різних вимірювань, проведених в однакових умовах.

**Диференціююча здатність** – спроможність тестового завдання розрізняти успішних випробовуваних від слабких. У кожній групі є випробовуваний з різним рівнем підготовки (знань). Якщо диференціююча здатність тестового завдання висока, то більш успішні випробовувані краще впораються із запропонованим тестом, а менш успішні – гірше.

Основне поняття теорії IRT [10 – 12] – це латентний параметр, який визначає вимірюється властивість випробовуваного, недоступне для прямого спостереження. Латентний параметр можна виміряти за допомогою його індикатора. Індикатор – властивість (параметр) випробовуваного, який доступний для прямого спостереження і може бути вимірний в числовій шкалою. Для того щоб виміряти значення латентного параметра, необхідно виміряти значення пов'язаного з ним індикатора. Наприклад, якщо латентним параметром є рівень знань випробовуваного з певного предмета, то індикатором може бути бал, який випробуваний отримав в результаті проходження тестового завдання.

Основні припущення IRT:

1) існують латентні параметри особистості випробовуваного, які недоступні для безпосереднього спостереження;

2) існують індикаторні змінні, пов'язані з латентними параметрами, які доступні для спостереження і які можливо розрахувати. За цим значенням можна судити про значення латентних параметрів;

3) оцінюваний латентний параметр повинен бути гомогенним. Це означає, що тест має вимірювати знання тільки в одній, чітко заданій, предметній області. Якщо ця умова не виконується, то необхідно переробити тест, видаливши або змінивши завдання, що порушують його гомогенність.

Основне завдання моделей IRT полягає в переході від індикаторних змінних до латентних параметрів. Після того, як будуть розраховані індикаторні змінні, пов'язані з цими параметрами, можна привести латентні параметри до однієї шкалою та порівняти їх. Також в IRT системи дозволяють встановлювати зв'язок між кількома латентними параметрами.

Моделі IRT і зокрема модель Раша має переваги перед класичною теорією тестів [13]: перетворює вимірювання, виконані в дихотомічних і порядкових шкалах, в лінійні вимірювання, в результаті якісні дані аналізуються за допомогою кількісних методів; міра вимірювання параметрів моделі Раша є лінійною, що дозволяє використовувати широкий спектр статистичних процедур для аналізу результатів вимірювань; оцінка труднощі тестових завдань не залежить від вибірки досліджуваних, на яких вона була отримана; оцінка рівня підготовленості випробовуваних не залежить від використовуваного набору тестових завдань.

Моделі IRT, зокрема модель Раша (Rasch model), застосовуються, в тому числі, для аналізу результатів тестування і якості тестових завдань [13 - 15].

В даному випадку в якості латентних параметрів виступають рівень підготовленості випробовуваного і рівень складності завдання.

**Завдання дослідження.** Таким чином, при практичному застосуванні тестування для контролю якості знань, зокрема студентів ІТ-спеціальностей, актуальним є завдання розробки процесу проведення тестування та аналізу його результатів, а також автоматизованої системи інформаційної підтримки тестування, які б забезпечили:

- мінімізацію впливу на результат тестування суб'єктивних факторів, як то списування, підказки, вгадування відповіді тощо;

- оперативний розрахунок показників якості всього тесту та окремих тестових завдань, та оцінювання результатів тестування;

- формування поради щодо поліпшення якості тесту;

- можливість оперативного корегування тесту за рахунок виключення неякісних завдань, та відповідного перерахунку результатів тестування;

- можливість автоматизації як самого процесу тестування, так і обчислення та аналізу результатів тестування та якості тесту.

Для забезпечення зазначених вище вимог треба виконати наступні завдання:

- провести дослідження і вибір методів аналізу якості тесту і тестових завдань;

- провести дослідження і вибір моделей IRT оцінки якості тестових завдань;

- надати інтерпретацію результатів аналізу тестових завдань, яка може бути використана при побудові системи підтримки прийняття рішень;

- виконати програмну реалізацію обраних методів, розробити прототип інформаційної системи підтримки та провести аналіз її застосування.

**Метою** даної статті є підвищення якості тестових завдань та точності оцінювання результатів тестування в умовах постійних змін змісту навчальних програм і змісту тестових завдань, та скорочення часу на обробку результатів тестування за рахунок автоматизації, застосування розроблених алгоритмів та інформаційної системи тощо.

### Матеріали та методи

Методи розрахунку критеріїв якості тестових завдань. Після проведеного аналізу були обрані такі статистичні методи розрахунку перелічених вище критеріїв оцінки якості тестових завдань.

Оцінка валідності тестових завдань:

$$r_{x_j} = \frac{1}{s_x} (x_{j\theta} - x_{jH}) \sqrt{p_j q_j},$$

де  $x_{j\theta}$  – середній арифметичний бал студентів, які успішно виконали  $j$ -е завдання тесту;  $x_{jH}$  – середній арифметичний бал студентів, які не виконали  $j$ -е завдання;  $\sqrt{p_j q_j}$  – стандартне відхилення по  $j$ -му завданню;  $s_x$  – стандартне відхилення по всьому тесту.

Коефіцієнт кореляції показує, наскільки завдання відповідає тематиці та змісту всього тесту.

Оцінка надійності тесту:

$$r_H = \frac{k}{k-1} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^k p_i q_i}{s_x^2} \right),$$

де  $k$  – число завдань в тесті;  $\sum_{i=1}^k p_i q_i$  – сума дисперсій завдань тесту;  $s_x^2$  – дисперсія.

Оцінка диференціюючої здатності тестового завдання:

$$r_d = \frac{x_n - x}{\delta_x} \cdot \sqrt{\frac{n}{N_d - n}},$$

де  $x$  – середнє арифметичне значення всіх індивідуальних оцінок по тесту;  $x_n$  – середнє арифметичне значення оцінок по тесту у тих випробовуваних, які правильно розв'язали завдання;  $\delta_x$  – середньоквадратичне відхилення індивідуальних оцінок по тесту для вибірки;  $n$  – число випробовуваних, які правильно розв'язали задачу;  $N_d$  – загальне число випробовуваних.

Коефіцієнт дискримінації тестового завдання може приймати значення від -1 до +1.

При застосуванні моделі IRT Раша (Rasch model) для аналізу результатів тестування та показників якості тестових завдань в якості латентних параметрів виступають рівень підготовленість випробуваного і рівень складності завдання.

Перша множина містить значення рівнів підготовленості випробовуваних  $\theta_i$ , де  $i$  – номер випробовуваного, який приймає значення в інтервалі від 1 до  $N$  ( $N$  – кількість випробовуваних). Друга множина містить значення труднощі  $j$ -го завдання  $\beta_j$ . Індекс  $j$  приймає значення в межах від 1 до  $M$ , де  $M$  – кількість завдань у тесті.

Рівень підготовленості випробуваного  $\theta_i$  та рівень складності завдання  $\beta_j$  розміщені на одній шкалі і вимірюються в одних і тих же одиницях – логітах. Аргументом функції успіху випробуваного є різниця  $\theta_i - \beta_j$ .

Якщо ця різниця позитивна і велика, то відповідно висока ймовірність досягнення успіху  $i$ -го випробуваного в  $j$ -м завданні. Якщо ж ця різниця негативна і велика по модулю, то ймовірність досягнення успіху  $i$ -го випробуваного в  $j$ -м завданні буде низькою.

Розглянемо метод [14 – 16] обчислення і порівняння рівня підготовленості випробуваних  $\theta_i$  і рівня складності тестових завдань  $\beta_j$  (рис. 1).

Спочатку необхідно обчислити частки вірних  $p_i$  і невірних  $q_i$  відповідей випробовуваних по тесту:

$$p_i = \frac{X_i}{M}; \quad q_i = 1 - p_i,$$

де  $X_i$  – індивідуальний бал випробовуваного;  $M$  – кількість завдань у тесті.

Частка вірних  $p_i$  та не вірних  $q_i$  відповідей студентів по кожному завданню окремо:

$$p_j = \frac{X_j}{N}; \quad q_j = 1 - p_j,$$

де  $X_j$  – сумарний бал відповідей на тестове завдання;  $N$  – кількість випробовуваних.

Початкові значення рівня підготовленості випробуваних розраховуються по формулі:

$$\theta_i^0 = \ln \frac{p_i}{q_i},$$

Початкові значення складності тестових завдань  $\beta_j$ :

$$\beta_j^0 = \ln \frac{q_j}{p_j}.$$

Середні значення рівня підготовленості випробуваних та складності тестових завдань:

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i^0}{N}; \quad \bar{\beta} = \frac{\sum_{j=1}^M \beta_j^0}{M}.$$

Значення дисперсії рівня підготовленості випробуваних  $S_\theta$  та складності  $S_\beta$  [14]:

$$S_\theta = \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_i^0)^2 - N(\bar{\theta})^2}{N-1}; \quad S_\beta = \frac{\sum_{j=1}^M (\beta_j^0)^2 - M(\bar{\beta})^2}{M-1}.$$

Обчислюємо кутові коефіцієнти:

$$a_\theta = \sqrt{\frac{1+S_\beta/2,89}{1-S_\theta S_\beta/8,35}}; \quad a_\beta = \sqrt{\frac{1+S_\theta/2,89}{1-S_\theta S_\beta/8,35}}.$$

Нарешті, ми можемо записати оцінки параметрів  $\theta$  і  $\beta$  в єдиній інтервальной шкалі:

$$\theta_i = a_\theta \theta_i^0 + \bar{\beta}; \quad \beta_j = a_\beta \beta_j^0 + \bar{\theta}.$$

Після того, як будуть розраховані рівні підготовленості випробуваних і рівні складності тестових завдань, необхідно їх порівняти. Різниця цих значень вказує на те, наскільки тест відповідає рівню знань студентів.

Далі розраховуються ймовірності правильної відповіді  $i$ -го випробуваного на  $j$ -е завдання:

$$P_{ij} = \frac{1}{1 + \exp(-(\theta_i - \beta_j))}.$$

Після чого можна побудувати характеристичну криву для кожного із завдань, яка показує залежність загальної оцінки за тест від кількості балів, набраних за дане завдання:

$$P_j(\theta) = \frac{1}{1 + \exp(-(\theta - \beta_j))}; \quad j = \overline{1, N}.$$

## Результати досліджень

**Методика тестування.** Для мінімізації впливу суб'єктивних факторів використовуються тести із випадковою генерацією варіантів тестових завдань. Варіант формується випадковим вибором завдань із банку завдань, відповідно до профілю тесту. Профіль визначає, скільки завдань із кожного блоку (який відповідає розділу учебної програми) та/або кожного рівня складності має бути включено в варіант тесту.

Таким чином, кожний студент отримує підмножину завдань із банку ( $T_i \in T$ ), і кожне завдання виконується частиною студентів ( $S_j \in S$ ).

Використовується дихотомічна схема оцінювання тестових завдань, тобто за виконання кожного завдання студент може отримати або 0 або 1.

Використаються тестові завдання двох типів: із одиночним вибором та із множинним вибором. При використанні завдання із множинним вибором воно вважається виконаним тільки якщо правильно вибрані всі варіанти відповідей.

Для зменшення вірогідності вгадування завдання тесту містять не менш 4 (зазвичай 4-5) варіантів відповіді (дистракторів).

Процес підготовки та застосування тесту змінено наступним чином: після сесії тестування виконується обробка результатів, яка включає в себе оцінювання результатів та розрахунок і аналіз показників якості тестових завдань.

По результатам аналізу може бути проведено корегування тесту (без проведення повторного тестування) – з тесту видаляються тестові завдання, якість яких не відповідає критеріям. Корегування тесту проводиться експертом, з використанням поради щодо поліпшення якості тесту, які надає автоматизована інформаційна система.

Після модифікації тесту перераховуються результати тестування та показники якості. Ці етапи – оцінювання, аналіз, корегування тесту – можуть повторюватися ітераційно. На кожній ітерації є можливість повернутися до попереднього варіанту тесту.

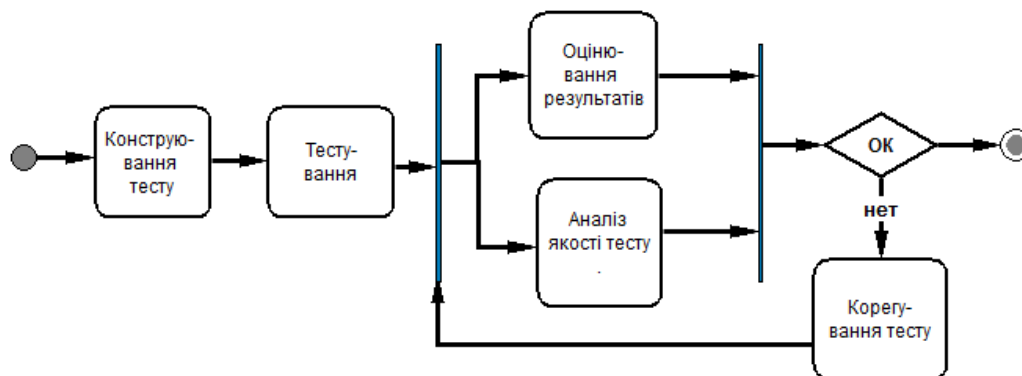


Рис. 2. Запропонована модифікація процесу підготовки та застосування тесту (при неможливості його попередньої апробації)

Інтерпретація результатів і формування поради щодо поліпшення тесту. Для аналізу якості тестових завдань рекомендують [17, 18] використовувати такі показники, як диференціююча здатність, надійність,

рівень складності, кутовий коефіцієнт по моделі IRT  $a_{\theta}$  тощо.

Розраховані значення показників якості тестових завдань інтерпретуються наступним чином (табл. 1).

Таблиця 1. Значення показників якості тестових завдань та їх інтерпретація

Показник якості	Значення	Інтерпретація
Рівень складності	< 0,2	Надто легке, може бути виключено із тесту.
	0,2 – 0,8	Складність відповідає рівню підготовки студентів.
	> 0,8	Надто складне, може бути виключено із тесту.
Диференціююча здатність	< 0	Диференціююча здатність незадовільна, завдання має бути виключено із тесту.
	0 – 0,15	Диференціююча здатність погана, тестове завдання неправильно сформульовано, завдання необхідно переформулювати або замінити.
	> 0,15	Диференціююча здатність задовільна або добра.
Критерій надійності	0,8 – 1	Надійність тестового завдання хороша, відсутні похибки вимірювання.
	0,5 – 0,8	Надійність тестового завдання задовільна, наявне пропорційне співвідношення істинної оцінки і похибки.
	< 0,5	Надійність незадовільна, присутні значні похибки. Дане тестове завдання має бути виключено із тесту.
Кутовий коефіцієнт по моделі IRT $a_{\theta}$	< 0,4	Диференціююча здатність незадовільний, завдання може бути виключено із тесту.
	0,4 – 0,7	Диференціююча здатність задовільна.
	> 0,7	Диференціююча здатність добра.
Критерій валідності	0,7 – 1	Сильний зв'язок тестового завдання з усім тестом, завдання повністю відповідає загальному змісту тесту.
	0,4 – 0,7	Задовільний зв'язок тестового завдання з усім тестом, завдання відповідає загальному змісту тесту.
	< 0,4	Незадовільний зв'язок тестового завдання з усім тестом, завдання не відповідає змісту тесту. Дане тестове завдання необхідно виключити із тесту.

Критерій відповідності рівня складності тестового завдання рівню підготовленості випробовуваних:

$$\sum_{j=1}^M \beta_j > 0 \quad - \text{складність тесту надто висока,}$$

необхідно спростити тест відповідно до рівня підготовки студентів;

$$\sum_{j=1}^M \beta_j = 0 \quad - \text{складність тесту відповідає рівню}$$

підготовки студентів;

$$\sum_{j=1}^M \beta_j < 0 \quad - \text{складність тесту надто низька,}$$

необхідно збільшити складність тесту відповідно до рівня підготовки студентів.

Графік характеристичної кривої (рис. 3), в першу чергу кут її нахилу, наочно відображає диференціюючу здатність тестового завдання. Зворотний нахил свідчить про те, що слабкі випробовувані відповідають на завдання краще, ніж сильні – таке завдання є некоректним і має бути виключено із тесту.

Слабкий нахил свідчить про поганий диференціює здатності завдання. На рис. 3 можна бачити, що завдання з групи (1) мають задовільну диференціюючу здатність, крива завдання (2) має менший нахил, що свідчить про гіршу диференціює здатності, а крива (3) має зворотний нахил, і це завдання має бути виключено з тесту.

Таким чином, кожне тестове завдання характеризується вектором значень показників якості.

$$Q_i = \{q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iM}\}.$$

Якщо значення показника якості тестового завдання класифікується як незадовільне згідно правил описаних у табл. 1, відповідний коефіцієнт аномалії якості  $a_{ij}$  для  $i$ -го завдання встановлюється рівним 1.

Класифікація тестового завдання як неякісного виконується по значенню модуля вектору аномалій якості завдання

$$|A_i| = \sum_{j=1}^M a_{ij}.$$

Остаточне рішення про виключення неякісних завдань із тесту і відповідно перерахунок результатів приймає експерт. Рекомендується виключати не більш 10–15% завдань. Такі завдання можуть бути перероблені та включені в наступний варіант тесту, але не враховуються при розрахунку результатів поточної сесії тестування.

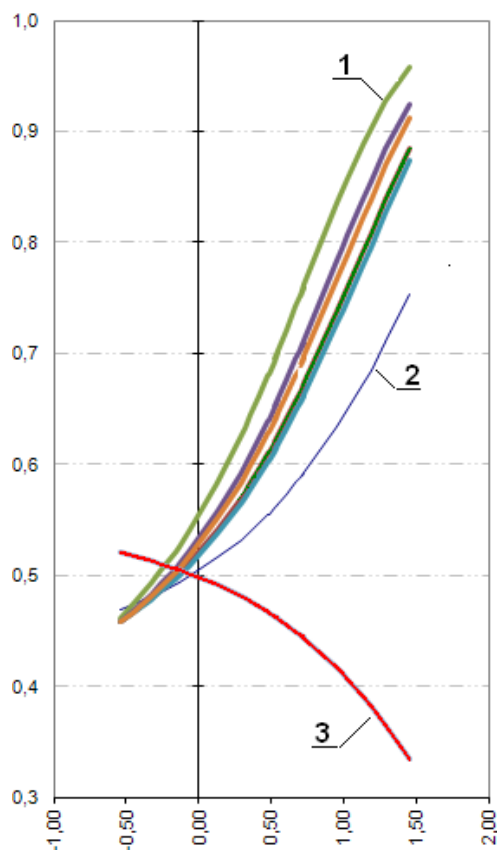


Рис. 3. Характеристичні криві тестових завдань, розраховані на основі моделі IRT Rasch

#### Аналіз результатів тестування і розрахунок показників якості тестових завдань

Було розроблено прототип веб-додатку аналізу якості показників тестових завдань та оцінювання

#### Список літератури

1. Аванесов, В. С. Научные проблемы тестового контроля знаний. Москва : ИЦПКПС, 1994. 86 с.
2. Аванесов, В. С. Форма тестовых заданий. Москва : Центр тестирования, 2006. 156 с.
3. Омаров, М. А., Мурадова, В. Х. Інфологічне забезпечення інформаційної технології управління дистанційною освітою. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2018. № 4 (6). С. 146-153. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.146>
4. Ковальчук Ю. О. Теорія освітніх вимірювань. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М., 2012. 200 с.
5. Лісова Т. В. Моделі та методи сучасної теорії тестів. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М., 2012. 112с.
6. An, X., Yung, Y. (2014), "Item Response Theory: What it is and how you can use the IRT procedure to apply it", Paper SAS364-2014, Cary, NC, USA : SAS Institute Inc. 14 p. URL: <http://support.sas.com/resources/papers/proceeding> (дата відвідування 11.02.2020).
7. Razak, N. A., Razak, A. Z. K., Lei, M. T. (2012), "Examining Quality of Mathematics Test Items Using Rasch Model: Preliminary Analysis", *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Vol. 69, P. 2205–2214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.12.187>
8. Майоров А. Н. Теория и практика создания тестов для системы образования. Москва : Интеллект-Центр, 2002. 267 с.
9. Малеева Ю. А., Косенко В. В., Малеева О. В., Світличний Д. В. Створення колаборативного середовища розробки в системі дистанційного навчання. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2019. № 2 (8). С. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.062>
10. Крокер, Л., Алгина Дж. Введение в классическую и современную теорию тестов. Москва : Логос, 2010. 668 с.

результатів тестування, який використовує вищевикладений підхід. За його допомогою було проведено аналіз результатів тестів, що застосовувалися для проведення модульного контролю студентів третього курсу. Вибірка містить результати тестування 32 випробовуваних, тест включає 30 завдань у формі запитань закритого типу.

Зокрема, були розраховані критерії якості тестових завдань, показники рівня складності завдань і рівня підготовленості випробовуваних, які потім були приведені до єдиної шкали. Були розраховані і побудовані емпіричні характеристичні криві тестових завдань (рис. 2).

#### Висновки

В результаті проведеного дослідження було проведено аналіз процесу підготовки та проведення тестування; проведено огляду статистичних методів оцінювання якості тестових завдань та показників якості тестових завдань, на основі якого обрано показники якості тестового завдання та методи їх розрахунку. Запропоновано модифікацію процесу підготовки та проведення тестування з урахуванням особливостей тестування студентів ІТ-спеціальностей. Надано інтерпретацію значень показників якості тестових завдань, яка є основою для формування поради щодо поліпшення якості тесту. Розроблено прототип веб-додатку для аналізу якості тестів, і з його допомогою проведено аналіз тестових завдань і оцінювання результатів модульного контролю.

Напрямок подальших досліджень є удосконалення методів аналізу, зокрема для тестів з випадковою вибіркою тестових завдань з банку завдань та тестів з недихотомічною схемою оцінювання тестових завдань, застосування методів дистракторного аналізу, а також інтеграція веб-додатку для аналізу результатів тестування і якості тестових завдань з існуючими системами підготовки тестових завдань та тестування.

11. Rasch, G. (1980), *Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests (Expanded edition)*, Copenhagen : Danish Institute of Educational Research, 324 p.
12. Ким В. С. Анализ результатов тестирования в процессе Rasch measurement. *Педагогические измерения*. 2005. № 4. С. 39–45.
13. Rusch, T., Lowry, P. B., Mair, P., Treiblmaier, H. (2017), "Breaking free from the limitations of classical test theory: Developing and measuring information systems scales using item response theory", *Information & Management*, Vol. 54, Issue 2, P. 189–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.im.2016.06.005>
14. Wilson, M. (2005), *Constructing Measures: An Item Response Modeling Approach*, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 228 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781410611697>
15. Михеев О. В. Математические модели педагогических измерений. *Педагогические измерения*. 2004. № 2. С. 75–88.
16. Диховичний А. А., Дудко А. Ф. Автоматизована система аналізу результатів комп'ютерного тестування з вищої математики. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: "Педагогіка, психологія і соціологія"*. 2013. № 2(14). С. 103–110.
17. Suparman, U. (2016), "Analyzing the quality of english test items of daily, mid semester and final school examinations in bandar lampung: (assessment and evaluation in language teaching)", *International Conference On Educational Research & Evaluation, Yogyakarta*, 14 p. URL: <http://repository.lppm.unila.ac.id/id/eprint/3121> (дата відвідування 11.02.2020).
18. Quagrain, K., Arhin, A. K. (2017), "Using reliability and item analysis to evaluate a teacher-developed test in educational measurement and evaluation", *Cogent Education*, Vol. 4 (1). P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1080/2331186X.2017.1301013>.

## References

1. Avanesov, V. S. (1994), *Scientific problems of test knowledge measurement [Nauchnye problemy testovogo kontrolya znani]*, Moscow, ITsPKPS, 86 p.
2. Avanesov, V. S. (2006), *Form of the tests [Forma testovykh zadani]*, Moscow, Tsentr testirovaniya Publ., 156 p.
3. Omarov, M., Muradova, V. (2018), "Infological support of the information technology for management of distance education", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (6), P. 146–153. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.146>
4. Koval'čuk, Ju. O. (2012), *Educational Measurement Theory [Teoriya osvity v vymirjuvan']*, Nizhyn, Publisher PP Lysenko M. M., 200 p.
5. Lisova, T. V. (2012), *Models and methods of the modern test theory [Modeli ta metody suchasnoyi teoriiy testiv]*, Nizhyn, Publisher PP Lysenko M. M. 112 p.
6. An, X. and Yung, Y. (2014), "Item Response Theory: What it is and how you can use the IRT procedure to apply it", Paper SAS364-2014 – Cary, NC, USA : SAS Institute Inc., 14 p., available at : <http://support.sas.com/resources/papers/proceeding> (last accessed 11.02.2020).
7. Razak, N. A., Razak, A. Z. K. and Lei, M.T. (2012), "Examining Quality of Mathematics Test Items Using Rasch Model: Preliminary Analysis", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 69, P. 2205–2214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.12.187>
8. Maiorov, A. N. (2002), *Theory and practice of tests creating for the education system [Teoriya i praktika sozdaniya testov dlya sistemy obrazovaniya]*, Moscow, Intellect-Tsentr Publ., 267 p.
9. Malieieva, Ju., Kosenko, V., Malyeyeva, O., Svetlichnyj, D. (2019), "Creation of collaborative development in the system of distance learning", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (8), P. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.062>
10. Croker, L., Algina, J. (2010), *Introduction to Classical and Modern Test Theory. [Vvedenie v klassicheskuyu i sovremennuyu teoriyu testov]*, Moscow, Logos Publ., 668 p.
11. Rasch, G. (1980), *Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests. Copenhagen, Danish Institute of Educational Research. (Expanded edition)*, 324 p.
12. Kim, V. S. (2005), "Test results analysis during Rasch measurement" ["Analiz rezul'tatov testirovaniya v protsesse Rasch measurement"], *Pedagogicheskie izmereniya – Pedagogical Measurements*, Vol. 4, P. 39–45.
13. Rusch, T., Lowry, P. B., Mair, P., Treiblmaier, H. (2017), "Breaking free from the limitations of classical test theory: Developing and measuring information systems scales using item response theory", *Information & Management*, Vol. 54, Issue 2, P. 189–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.im.2016.06.005>
14. Wilson, M. (2005), *Constructing Measures: An Item Response Modeling Approach*, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 228 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781410611697>
15. Mikheev, O. V. (2004), "The mathematical model of pedagogical measurements" ["Matematicheskie modeli pedagogicheskikh izmerenii"], *Pedagogicheskie izmereniya – Pedagogical Measurements*, Vol. 2, P. 75–88.
16. Dykhovichnyi, A. A., Dudko, A. F. (2013), "Automated system for computer testing in higher mathematics results analysis" ["Avtomatizirovannaya sistema analiza rezul'tatov komp'yuternogo testirovaniya po vysshei matematike"], *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: "Pedagogika, psikhologiya i sotsiologiya"*, Vol. 2 (14), P. 103–110.
17. Suparman, U. (2016), "Analyzing the quality of english test items of daily, mid semester and final school examinations in bandar lampung: (assessment and evaluation in language teaching)", *International Conference On Educational Research & Evaluation, Yogyakarta*, 14 p. URL: <http://repository.lppm.unila.ac.id/id/eprint/3121> (last accessed 11.02.2020).
18. Quagrain, K., Arhin, A. K. (2017), "Using reliability and item analysis to evaluate a teacher-developed test in educational measurement and evaluation", *Cogent Education*, Vol. 4 (1). P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1080/2331186X.2017.1301013>.

Надійшло (Received) 26.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Смідович Леонід Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "ХАІ", доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; email: lsonlinals@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6156-9506>.

**Смидович Леонид Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", доцент кафедры компьютерных наук и информационных технологий, Харьков, Украина.

**Smidovych Leonid** – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor of the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

**Артиух Олеся Володимирівна** – Харківський радіотехнічний коледж, викладач іноземної мови, Харків, Україна; email: olesia.artiuh@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4929-7541>.

**Артиух Олеся Владимировна** – Харьковский радиотехнический колледж, преподаватель иностранного языка, Харьков, Украина.

**Artiukh Olesia** – Kharkiv School of Radio Engineering, Foreign Language Teacher, Kharkiv, Ukraine.

**Косенко Наталія Вікторівна** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри управління проектами у міському господарстві і будівництві, Харків, Україна; email: kosnatalja@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5942-3150>.

**Косенко Наталья Викторовна** – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, доцент кафедры управления проектами в городском хозяйстве и строительстве, Харьков, Украина.

**Kosenko Nataliia** – PhD (Engineering Sciences), O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, Associate Professor at the Department of Project Management in Urban Economy and Construction, Kharkiv, Ukraine.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ СТУДЕНТОВ ИТ-СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

**Предметом** исследования статьи являются статистические модели и методы оценки качества тестовых заданий, а также процессы и технологии информационной поддержки оценивания результатов тестирования и качества тестов. **Целью** является повышение качества тестовых заданий и точности оценки результатов тестирования в условиях постоянных изменений содержания учебных программ и содержания тестовых заданий, и сокращение времени на обработку результатов тестирования за счет автоматизации, применение разработанных алгоритмов и информационной системы. В работе решаются следующие **задачи**: анализ процесса подготовки и проведения тестирования; проведение аналитического обзора статистических методов оценки качества тестовых заданий и показателей качества тестовых заданий; разработка обобщенного процесса подготовки и проведения тестирования; автоматизация анализа результатов тестирования студентов ИТ-специальностей. Для решения указанных задач были использованы **методы** статистического анализа, модель Rasch IRT (Item Response Theory), технологии разработки программных приложений. Получены следующие **результаты**. Проанализирован процесс подготовки и проведения тестирования, предложено его модификацию с учетом особенностей тестирования студентов ИТ-специальностей. Выбраны показатели качества тестовых заданий, модели и методы их расчета, в частности модель Rasch IRT. Приведена интерпретация значений показателей качества тестовых заданий, и расчет коэффициентов аномалии качества тестового задания, которые являются основой для формирования советующего решения по улучшению качества теста. Разработан прототип информационной системы поддержки процесса анализа качества тестовых заданий, оценки результатов тестирования и принятия решений о модификации теста. Проведено тестирование системы при оценке результатов модульного контроля студентов третьего курса. **Выводы**: автоматизация и информационная поддержка расчета и анализа показателей качества тестовых заданий и результатов тестирования позволит повысить точность оценки и сократить время на обработку результатов тестирования.

**Ключевые слова**: оценка качества тестовых заданий; тестовое задание; процесс тестирования; статистические методы; модели IRT; валидность; надежность; дифференцирующая способность.

## AUTOMATION OF TEST ITEMS QUALITY ANALYSIS AND IT STUDENTS TEST RESULTS ASSESSMENT

The **subject** of this article is statistical models and methods for test items quality assessment, as well as processes and information support technologies for test results and test quality evaluating. The **goal** is to improve the quality of test items and the accuracy of the evaluation of test results in the context of constant changes in the content of study programs and the content of test tasks, and to reduce the time for test results processing through automation, and developed algorithms and an information system usage. The following **tasks** was solved: analysis of the test preparation and testing process; an analytical review of statistical methods for the test items quality assessment and the test items quality indicators; generalized process of the test preparation and conduct of testing development; and automation of IT students test results assessment. To solve these problems, the following **methods** was used: statistical analysis methods, the Rasch IRT (Item Response Theory) model, and software application development technologies were used. The following **results** are obtained. The process of the test preparation and testing was analyzed; its modification is proposed taking into account the peculiarities of IT students testing. The test task quality indicators, models and methods for it calculation were selected, in particular, the Rasch IRT model. The interpretation of the test item quality indicators values, and the calculation of the coefficients of the anomalies in the test item quality, what are the basis for the generation of an advisory solution to improve the test

quality, are given. A prototype of an information system for support of processes of test items quality indicators evaluating, test results assessment and decision making about test modification has been developed. The system was tested during the module control of third-year students results evaluating. **Conclusions:** automation and information support of the test items quality indicators calculating and analyzing, and test results assessment will improve the accuracy of the assessment and reduce the time for test results evaluating.

**Keywords:** statistic methods; IRT models; Rasch model; test quality; test items; knowledge testing; validity; reliability; discriminant ability.

*Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Смідович Л. С., Артюх О. В., Косенко Н. В. Автоматизація аналізу якості тестових завдань та результатів тестування студентів ІТ-спеціальностей. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.019>.

Smidovych, L., Artiukh, O., Kosenko, N. (2020), "Automation of test items quality analysis and IT students test results assessment", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.019>.

---

UDC 005.8

DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.028>

A. BONDAR

## MANAGEMENT OF HUMAN RESOURCES OF THE PROJECT-ORIENTED ORGANIZATION BASED ON THE PROFILE OF THE SPECIALIST AND THE DEGREE OF ITS UNIQUENESS

The **subject** of the research is the tools and methods of effective human management. The **purpose** of this study is the development of human management tools for a project-oriented organization. The following **tasks** had been solved in the article: introducing the categories of "specialist profile" and "degree of uniqueness" of an employee; identification of the main areas of use of the "specialist profile" and the indicator of "degree of uniqueness" in the human resources management of a project-oriented organization; development of the method for assessing the "degree of uniqueness" of an employee. The following **methods** are used: set theory, functional analysis, expert assessment method. **Results.** In this study the category "specialist profile" and the interrelated indicator "degree of employee uniqueness" were introduced. A specialist's profile means a combination of three components, which are the sets of quantitatively evaluated characteristics: competence, energy and professional potential were presented. The profile of the organization's specialist is examined for compliance not only with the essence of the project and its specific work, but also with the conditions of the project and work, as well as with the interests of the project-oriented organization. "Energy" is a set of personal characteristics of an employee, such as the ability to work in extreme situations, stress tolerance, sociability, etc. "Professional potential" – "hidden" professional opportunities (competencies, energy), which are transformed into real competencies and energy in the process of carrying out professional activities. A conceptual model for the use of the "employee profile" in the human resources management of a project-oriented organization had been developed. Under the degree of uniqueness of an employee is taken the ratio of his competencies, energy and potential to the competencies, energy and potential of other employees. **Conclusions.** The method for assessing the degree of uniqueness of an employee, illustrated by a calculation example, was developed. The directions of using this indicator in the human resources management of a project-oriented organization were indicated.

**Keywords:** human resources; competency; energy; potential; control; project; degree of uniqueness.

### Introduction

The basis of project team management is a competency-based approach that allows you to compare the competencies of project team members and the capabilities of applicants to participate in the project and their subsequent assignment to specific project work. Nevertheless, not only competencies are the "driving force" of the project, other characteristics of individual specialists that either contribute to or hinder the successful implementation of the project are of great importance. In addition, for organizations (companies, enterprises) that follow the project approach in the implementation of their activities and their development, that is, they are project-oriented, project teams are formed from the totality of labor resources. Thus, unlike the separately considered project, employees of the organization can, for example, be considered as "alternative options" for participation in various projects of the organization. The specificity of the project-oriented organization necessitates the use of appropriate tools to effectively manage its workforce.

### Analysis of recent publications and studies

Consideration of the problem of human resources management of project-oriented organizations is a logical dissemination and development of the results of research of project team management at a higher level - the level of the organization as a whole. Thus, this study should be carried out in the context of the synthesis of human resources management (classic HRM) and project team management. Such a vision has emerged in modern science over the past 15 years. In particular, in [1-3], the authors focus on the fact that the development and

dissemination of project-oriented management ideas for companies and enterprises of various fields of activity gives rise to the recurrent problem of labor management of such organizations. And although the authors do not provide a specific methodology for solving this problem, they indicate its importance for modern theory and practice.

In [4], emphasis is placed on the need for career growth of employees, moreover, from the point of view of the well-being of a project-oriented organization. Despite the fact that the term "professional potential" is not used in this work, nevertheless, in this context we are talking about the career growth of the organization's specialists.

The work [5] summarizes various approaches to the management of labor resources, considering their development in a historical context, and focuses on the usefulness of the penetration of classical approaches to the management of labor resources in project management and in the management of project-oriented organizations. One of the conclusions here is the need for modern researchers to focus on human resources management in projects of project-oriented organizations.

In [6], the results of a statistical analysis of success factors in the context of human resources management of typical representatives of project-oriented organizations — software development companies — are presented. In particular, the following basic mechanisms for successful workforce management were established: assessment of the effectiveness of work, training and development, participation in decision making.

Among the works of the domestic school, it should be noted [7-11], which are devoted to the competency-based approach in project management. Note that, despite the significant attention of domestic researchers to project-oriented organizations (for example, [12]), problems

related to labor resources at this level are practically not considered, as an exception, the works [13, 14], in which, however, the focus is mainly on projects, and not on the whole organization.

Based on the foregoing, the **purpose** of this study is the development of human resources management tools for a project-oriented organization.

### Research Objectives:

- introduction of the categories of "specialist profile" and "degree of uniqueness" of an employee;

- identification of the main areas of use of the "specialist profile" and the indicator of "degree of uniqueness" in the labor management of a project-oriented organization;

- development of a method for assessing the "degree of uniqueness" of an employee.

Specialist profile and its use in the human resources management of a project-oriented organization.

The main requirement for the project team is that it has the qualities that ensure the success of the project. Moreover, these qualities are determined not only by the composition of competencies, but also by "energy" and professional potential. Such a conclusion was made in [15]. It should be noted that a clear identification of the components of energy and potential requires a separate study that is beyond the scope of this work; therefore, we restrict ourselves to introducing into consideration these characteristics of a unit of labor resources in the form of a set of corresponding estimates.

Moreover, we accept the following content of these concepts. "Energy" is a set of personal characteristics of an employee, such as the ability to work in extreme situations, stress tolerance, sociability, etc. We define professional potential as "hidden" professional opportunities (competencies, energy) that transform into real competencies and energy in the process of carrying out professional activities. It should be noted that the latter is possible only under certain conditions that are formed in the organization.

Without substantial concretization, we will accept the following structure of the characteristics of a unit of labor resources, which we define as a "specialist profile":

$$\{C_1, C_2, \dots, C_n, E_1, E_2, \dots, E_m, P_1, P_2, \dots, P_s\}, \quad (1)$$

$C_1, C_2, \dots, C_n$  – set  $i = \overline{1, n}$  of competency ratings – competency index;

$E_1, E_2, \dots, E_m$  – set of estimates of energy components,  $j = \overline{1, m}$  – energy component index;

$P_1, P_2, \dots, P_s$  – set of potential assessments,  $s = \overline{1, S}$  – potential component index.

If it is assumed that the components (1) are dimensionless quantities, for example, points or fractions of the "ideal" assessment, then the usual Euclidean distance taking into account the weight of the components can serve as a measure of "proximity of specialists":

$$D_{12} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot (C_i^1 - C_i^2)^2 + \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot (E_j^1 - E_j^2)^2 + \sum_{s=1}^S \gamma_s \cdot (P_s^1 - P_s^2)^2, \quad (2)$$

where  $\alpha_i, \beta_j, \gamma_s, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, s = \overline{1, S}$  – the weight of the specialist profile components for which:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{j=1}^m \beta_j + \sum_{s=1}^S \gamma_s = 1. \quad (3)$$

$C_i^1, E_j^1, P_s^1, C_i^2, E_j^2, P_s^2$  – accordingly, the profile components of the 1st and 2nd specialist. In accordance with minimization (2), in particular, specialists can be replaced if necessary within the organization.

Such an approach to identifying the "specificity" of specialists (employees) can be widely used in deciding on the formation of a project team and assigning specialists to work. So, depending on the specifics of individual project activities, special requirements for profile components may be put forward.

For example, a specific job requires several specialists with specific competencies  $C_1, C_2, \dots, C_n$ . The  $L$  most probable conditions for the implementation of the project are forecasted; accordingly, it is required to select several employees whose competencies correspond to this work, and "energy" corresponds to one of the most probable environmental conditions –  $E_{11}, E_{21}, \dots, E_{m'1}, \dots, E_{1L}, E_{2L}, \dots, E_{m'L}$ . The organization also has certain strategic goals and projected projects, which determines the need to "disclose" a certain potential of employees  $P_1, P_2, \dots, P_s$ . Thus, the profile of the organization's specialist is examined for compliance not only with the essence of the project and its specific work, but also with the conditions of the project and work, as well as with the interests of the project-oriented organization (fig. 1).

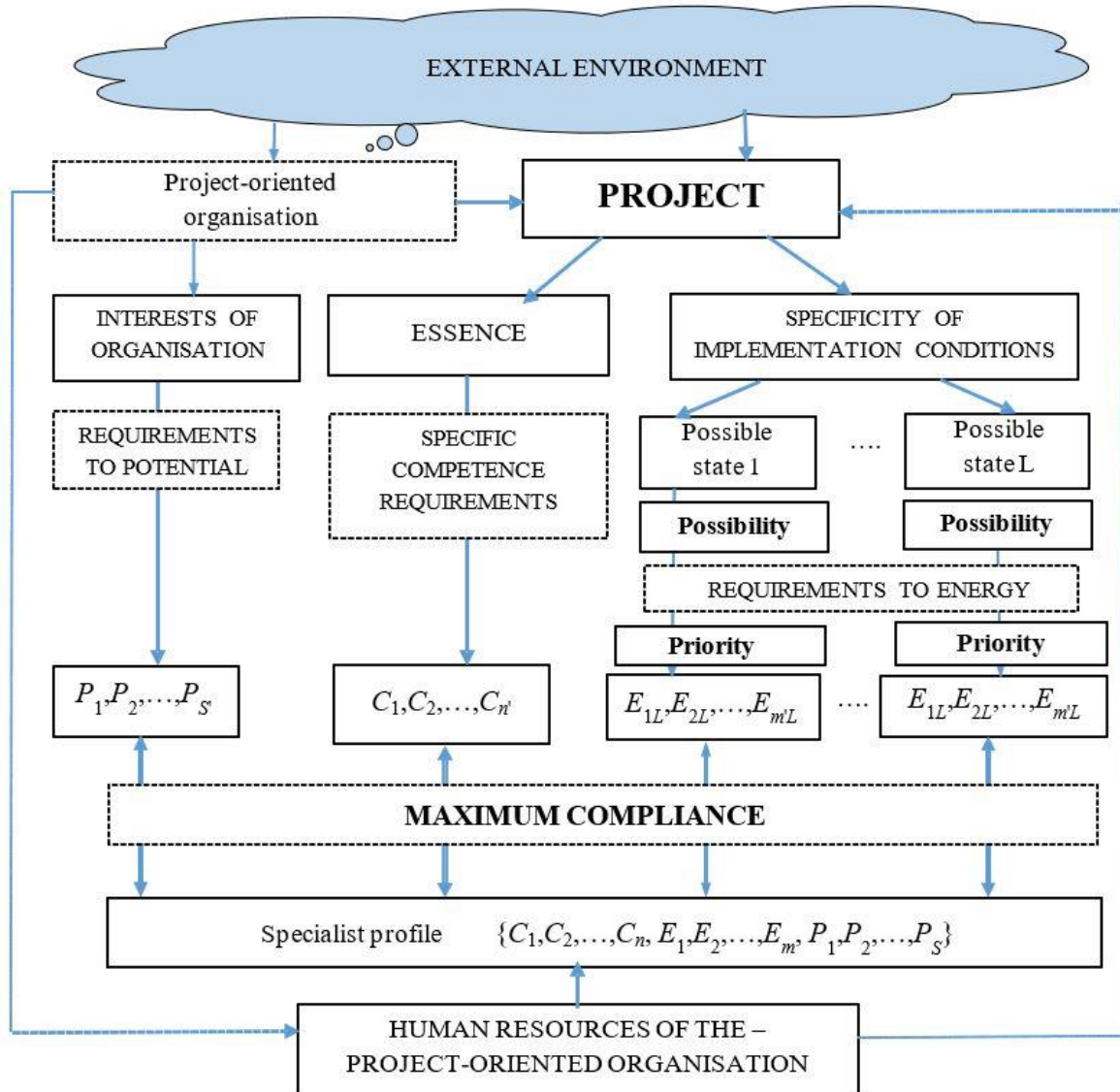
This approach will ensure not only the success of a specific project, but also the success of promising projects (in the future) of the organization by uncovering the potential of its employees.

Since in a project-oriented organization, as a rule, several projects are implemented at the same time, and project teams are formed from the aggregate workforce of the organization, a situation often arises of a choice: which of the employees with close "competency content" to include in a particular project team. In such cases, the proposed approach to the formation of an employee profile can serve as the basis for this choice.

Note that the proposed "profiling" of employees will also allow adequate selection of personnel. Special methods of testing can be used to identify specific components of "energy" and "potential".

### The degree of uniqueness of the employee and the method of its assessment.

By the degree of uniqueness of an employee of a project-oriented organization, we mean the ratio of his competencies, energy and potential with the competencies, energy and potential of other employees. According to this definition, the smaller the organization's staff, the higher the degree of uniqueness of each of the employees (labor units) and, accordingly, vice versa.



**Fig. 1.** The use of "specialist profile" in decision-making processes on the formation of a project team in a project-oriented organization

To ensure the success of the project, specialists with a high degree of uniqueness must be present in the project team, which will allow them to a) make non-standard decisions as compared to other team members, b) realize the existing potential to the maximum extent (which will be valuable for the project-oriented organization in future), c) use "energy opportunities" in turbulence.

To assess the uniqueness of a unit of labor at the level of a project-oriented organization, the following method is proposed.

Let the labor resources of a project-oriented organization be  $H + 1$  people. Excluding the employee for whom the degree of uniqueness is evaluated,  $N$  people remain. Then, for each employee from among the organization's labor resources, a set of characteristics is given:

$$\{C_1^h, C_2^h, \dots, C_n^h, E_1^h, E_2^h, \dots, E_m^h, P_1^h, P_2^h, \dots, P_s^h\}, h = \overline{1, H}, \quad (4)$$

$C_1^h, C_2^h, \dots, C_n^h$  – set of competency assessments,  $i = \overline{1, n}$  – competency index;

$E_1^h, E_2^h, \dots, E_m^h$  – set of estimates of energy components,  $j = \overline{1, m}$  – energy component index;

$P_1^h, P_2^h, \dots, P_s^h$  – set of potential assessments,  $s = \overline{1, S}$  – potential component index.

The following indicator is proposed to assess the degree of *employee uniqueness*:

$$U_p = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{N_i}{Q_{HR}} + \sum_{j=1}^m \beta_j \frac{M_j}{Q_{HR}} + \sum_{s=1}^S \gamma_s \frac{Z_s}{Q_{HR}}, \quad (5)$$

or

$$U_p = \frac{1}{Q_{HR}} \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot N_i + \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot M_j + \sum_{s=1}^S \gamma_s \cdot Z_s \right), \quad (6)$$

where:

$$N_i = \sum_{h=1}^H I_i^h, i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$I_i^h = \begin{cases} 1, C_i^h \geq C_i; \\ 0, C_i^h < C_i. \end{cases}, i = \overline{1, n}, h = \overline{1, H}, \quad (8)$$

$$M_j = \sum_{h=1}^H I_j^h, j = \overline{1, m}, \quad (9)$$

$$I_j^h = \begin{cases} 1, E_j^h \geq E_j; \\ 0, E_j^h < E_j. \end{cases}, j = \overline{1, m}, h = \overline{1, H}, \quad (10)$$

$$Z_s = \sum_{h=1}^H I_s^h, s = \overline{1, S}, \quad (11)$$

$$I_s^h = \begin{cases} 1, P_s^h \geq P_s; \\ 0, P_s^h < P_s. \end{cases}, s = \overline{1, S}, h = \overline{1, H}, \quad (12)$$

In fact, (7), (9) and (11) establish the number of people for whom the characteristic in question (competence, component of energy or potential) is the same or higher than that of the employee in question. The presence in the denominators (5) and (6)  $Q_{HR}$  allows, in fact, to determine the share of employees with a given characteristic and even the best in the total workforce. The calculation example was based on the following initial data (table 1).

The table 2 shows the intermediate and final results of calculating the indicator of the degree of uniqueness of a unit of labor resources. In this example, the value of this indicator was 0.45. Note that based on the data in table 2, an employee profile can be formed in the form of a graphical representation (fig. 2).

$Q_{HR}$  – the amount of labor resources of the organization.

**Table 1.** The source data for the calculation of the degree of uniqueness of a unit of labor

Characteristics	Indicator for an employee	Indicator for colleagues			
		$h=1$	$h=2$	$h=3$	$h=4$
$C_1, C_1^h$	10	8	10	9	3
$C_2, C_2^h$	9	6	7	8	3
$C_3, C_3^h$	9	5	5	9	7
$C_4, C_4^h$	7	4	4	6	8
$C_5, C_5^h$	3	9	8	10	2
$C_6, C_6^h$	4	5	6	8	10
$E_1, E_1^h$	5	10	7	7	4
$E_2, E_2^h$	8	7	7	5	7
$P_1, P_1^h$	7	6	5	5	8
$P_2, P_2^h$	5	10	7	3	9

This profile allows you to visually see the "unique" several employees on one diagram allows their characteristics. In addition, the presentation of data on comparative analysis (fig. 3).

**Table 2.** Calculation of the indicator of the degree of uniqueness of a unit of labor resources

$\alpha_i, \beta_j, \gamma_s$	$N_i, M_j, Z_s$	$\frac{N_i}{Q_{HR}}, \frac{M_j}{Q_{HR}}, \frac{Z_s}{Q_{HR}}$	$\alpha_i \frac{N_i}{Q_{HR}}, \beta_j \frac{M_j}{Q_{HR}}, \gamma_s \frac{Z_s}{Q_{HR}}$
0,1	1	0,25	0,025
0,1	0	0	0
0,2	1	0,25	0,05
0,05	1	0,25	0,0125
0,05	3	0,75	0,0375
0,05	4	1	0,05
0,3	3	0,75	0,225
0,05	0	0	0
0,05	1	0,25	0,0125
0,05	3	0,75	0,0375
$U_P$			0,45

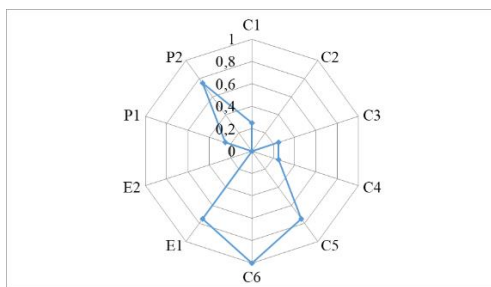


Fig. 2. The profile of the unit of labor resources

The closer to 0 the values of the individual components in (5), (6) and, accordingly, in the diagram in fig. 2, the more "unique" this characteristic is for the employee in question. So, in this example, competencies 1,2,3, component of energy 1 and potential 1 form the basis of the "uniqueness" of this employee.

Using weights in (5), (6), respectively, the significance of individual characteristics in the indicators of the degree of uniqueness increases or decreases.

Fig. 3 shows the profiles of two employees who are practically opposites and have different characteristics with a high degree of uniqueness (HR2 - the employee discussed above, the calculation of the degree of uniqueness is presented in table 2, for HR1, the degree of uniqueness was 0.52).

Thus, we conclude that HR2 has a higher degree of uniqueness than HR1. According to the profile in fig. 3 it is clearly seen that HR2 number of characteristics closer to 0 is greater than that of HR1.

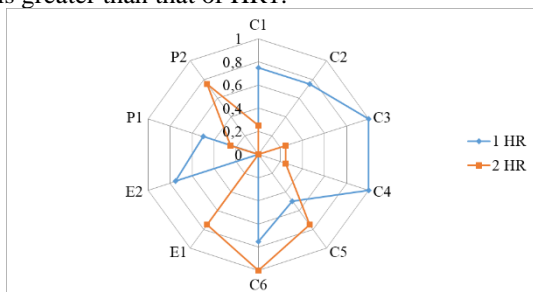


Fig. 3. Comparison of labor unit profiles

## References

- Söderlund, J., Bredin K. (2006), "HRM in Project-Intensive Firms: Changes and Challenges", *Human Resource Management*, No. 45, P. 249–265.
- Amy C. Edmondson, Jean-François Harvey (2018), "Cross-boundary teaming for innovation: Integrating research on teams and knowledge in organizations", *Human Resource Management Review*, Vol, 28, Issue 4, P. 347–360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2017.03.002>
- Jamie, A. Gruman, Alan, M.Saks, (2011), "Performance management and employee engagement", *Human Resource Management Review*, Vol. 21, Issue 2, P. 123–136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2010.09.004>
- Turner, R., Huemann, M., Keegan, A. (2008), "Human resource management in the project-oriented organization: Employee well-being and ethical treatment", *International Journal of Project Management*, Vol. 26, Issue 5, P. 577–585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2008.05.005>
- Keegan, A., Ringhofer, C., Huemann, M. (2018) "Human resource management and project based organizing: Fertile ground, missed opportunities and prospects for closer connections", *International Journal of Project Management*, Vol. 36, Issue 1, P. 121–133. DOI: <https://doi.org/10.18485/epmj.2019.9.1.5>
- Wickramasinghe, V., Liyanage, S., (2013), "Effects of high performance work practices on job performance in project-based organizations", *Project Management Journal*, No. 44 (3), P. 64–77. DOI: <https://doi.org/10.1002/pmj.21342>.
- Bushuyev, S. D., Yaroshenko, F., Yaroshenko, N. (2013), "Entrepreneurial energy in the management of development projects" ["Predprinimatel'skaya energiya v upravlenii proyektami razvitiya"], *Project management and production development*, No. 2, P. 5–12.
- Bushuyev, S. D. Bushuyeva, N. S. (2006), *Competent Look at: Project Management. Basics of Professional Knowledge and Competence Assessment System for Project Managers (NCB UA v.3.0. [Kompetentnyy vzglyad na: upravleniye proyektami].*

Thus, a method for assessing the degree of uniqueness for a unit of labor resources in the framework of a project-oriented organization is proposed and illustrated by a calculation example.

Obviously, such an assessment should be carried out differentially for different categories of labor resources, taking into account the specifics of competencies and components of energy and potential.

The degree of uniqueness can serve as a tool in resolving issues, for example, about hiring or generating a wage offer. Naturally, the higher the uniqueness of the employee, the higher the salary should be (with the proviso that the uniqueness of the employee must correspond to those characteristics that are most valuable and necessary for the organization).

## Conclusions

In this study, the category "specialist profile" and the interrelated indicator "degree of employee uniqueness" are introduced.

A specialist's profile is understood to mean a combination of three components, which are sets of quantitatively evaluated characteristics: competence, energy, and professional potential. A conceptual model for the use of the "employee profile" in the human resources management of a project-oriented organization has been developed.

Under the degree of uniqueness of an employee, the ratio of his competencies, energy and potential to the competencies, energy and potential of other employees is taken. A method for assessing the degree of uniqueness of an employee is developed, which is illustrated by a calculation example. The directions of using this indicator in the human resources management of a project-oriented organization are indicated.

A further direction of this study is the development of formalized methods and models for solving specific tasks of labor management using the approach presented in this paper.

- Osnovy professional'nykh znaniy i sistema otsenki kompetentnosti proyektnykh menedzherov (NCB UA v.3.0)*, Kyiv : IRIDIUM, 208 p.
9. Rach, V. A., Biryukov, O. V. (2008), "Context-personal assessment of the competence of project managers" ["Kontekstno-lichnostnoye otsenivaniye kompetentnosti proyektnykh menedzherov"], *Project management and production development*, No. 3 (27), P. 67–81.
  10. Biryukov, O. V. (2011), "Assessing the competence of a project management team with regard to the synergy effect" ["Otsenka kompetentnosti komandy upravleniya proyektom s uchetom efekta sinergii"], *Project management and production development*, No. 1 (37), P. 26–37.
  11. Rossoshans'ka, O. V., Biryukov, O. V. (2010), "Formation of project management team based on competence approach" ["Formuvannya komandi upravlinnya realizatsiyeu proyektu na osnovi kompetentnogo pidkhodu"], *Project management and production development*, No. 1 (33), P. 127–146.
  12. Kadykova, I. N., Larina, S. A., Chumachenko, I. V. (2017), "Information technology for strategic management of a project-oriented organization" ["Ynformatsyonnaya tekhnolohyya stratezhcheskoho upravlenyya proektno-oryentovannoy orhanyzatsyyey"], *News of NTU "KhPI". Seriya: Strategic management, portfolio management, programs and projects*, No. 3 (1225), P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2017.1225.2>
  13. Sulim-Timovti, A. A., Trifonov, I. V., Kornienko, E. O. (2010), "Determination of expected labor costs in a project-oriented organization" ["Vyznachennya ochikuvanykh trudovytrat za proektom u proektno-orientovanykh orhanizatsiyakh"], *Construction, materials science, mechanical engineering*, PSASA, No. 54, P. 174–180.
  14. Zachko, O., Kobylkin, D., Kovalchuk, O. (2019), "Models of project teams' formation in a safety-oriented system", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 85–91. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.085>
  15. Bondar, A. V. (2019), "The concept of the human resources value of a project-oriented organization" ["Kontseptsiya tsinnosti lyuds'kykh resursiv proektno-orientovanoi orhanizatsiyi"], *Proceedings of Admiral Makarov NUS*, Helvetik Publishing House, No. 1, P. 135–141. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).19](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).19)

Received 12.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Бондар Алла Віталіївна** – кандидат технічних наук, Одеський національний морський університет, доцент кафедри управління логістичними системами і проектами, Одеса, Україна; email: ocheretyankaalla@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2228-2726>.

**Бондарь Алла Витальевна** – кандидат технических наук, Одесский национальный морской университет, доцент кафедры управления логистическими системами и проектами, Одесса, Украина.

**Bondar Alla** – PhD (Engineering Sciences), Odessa National maritime University, Associate Professor of the Department of Logistic systems and project management, Odessa, Ukraine.

## УПРАВЛІННЯ ТРУДОВИМИ РЕСУРСАМИ ПРОЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ НА БАЗІ ПРОФІЛЮ ФАХІВЦЯ І СТУПЕНЯ ЙОГО УНІКАЛЬНОСТІ

**Предметом** дослідження є інструменти і методи ефективного управління трудовими ресурсами. **Метою** даного дослідження є розробка інструментів управління трудовими ресурсами проєктно-орієнтованої організації. У статті вирішуються наступні **завдання**: введення категорій "профілю фахівця" і "ступеня унікальності" співробітника; ідентифікація основних напрямків використання "профілю фахівця" і показника "ступеня унікальності" в управлінні трудовими ресурсами проєктно-орієнтованої організації; розробка методу оцінки "ступеня унікальності" співробітника. Використовуються такі **методи**: теорії множин, функціональний аналіз, метод експертних оцінок. **Результати**. В даному дослідженні введена в розгляд категорія "профіль фахівця" і взаємопов'язаний показник "ступінь унікальності співробітника". Під профілем фахівця розуміється сукупність трьох складових, які представляють собою безлічі кількісно оцінюваних характеристик: компетентності, енергії, професійний потенціал. Профіль фахівця організації розглядається на предмет відповідності не тільки суті проєкту і конкретних його робіт, а й умовам реалізації проєкту і виконання роботи, а також інтересам проєктно-орієнтованої організації. "Енергія" – це сукупність особистісних властивостей співробітника, таких як можливість роботи в екстремальних ситуаціях, стресостійкість, комунікабельність і т.п. "Професійний потенціал" – "приховані" професійні можливості (компетентності, енергія), які трансформуються в реальні компетентності і енергію в процесі здійснення професійної діяльності. Розроблено концептуальну модель використання «профілю співробітника» в управлінні трудовими ресурсами проєктно-орієнтованої організації. Під ступенем унікальності співробітника розуміється співвідношення його компетентностей, енергії і потенціалу з компетентностями, енергією і потенціалом інших співробітників. **Висновки**. Розроблено метод оцінки ступеня унікальності співробітника, який проілюстрований розрахунковим прикладом. Позначені напрями використання даного показника в управлінні трудовими ресурсами проєктно-орієнтованої організації.

**Ключові слова**: трудові ресурси; компетентності; енергія; потенціал; управління; проєкт; ступінь унікальності.

## УПРАВЛЕНИЕ ТРУДОВЫМИ РЕСУРСАМИ ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ НА БАЗЕ ПРОФИЛЯ СПЕЦИАЛИСТА И СТЕПЕНИ ЕГО УНИКАЛЬНОСТИ

**Предметом** исследования являются инструменты и методы эффективного управления трудовыми ресурсами. **Целью** данного исследования является разработка инструментов управления трудовыми ресурсами проектно-ориентированной

организации. В статье решаются следующие **задачи**: введение категорий "профиля специалиста" и "степени уникальности" сотрудника; идентификация основных направлений использования "профиля специалиста" и показателя "степени уникальности" в управления трудовыми ресурсами проектно-ориентированной организации; разработка метода оценки "степени уникальности" сотрудника. Используются следующие **методы**: теории множеств, функциональный анализ, метод экспертных оценок. **Результаты**. В данном исследовании введена в рассмотрение категория "профиль специалиста" и взаимосвязанный показатель "степень уникальности сотрудника". Под профилем специалиста понимается совокупность трех составляющих, представляющих собой множества количественно оцениваемых характеристик: компетентности, энергия, профессиональный потенциал. Профиль специалиста организации рассматривается на предмет соответствия не только сущности проекта и конкретным его работ, а и условиям реализации проекта и выполнения работы, а также интересам проектно-ориентированной организации. "Энергия" – это совокупность личностных свойств сотрудника, таких как возможность работы в экстремальных ситуациях, стрессоустойчивость, коммуникабельность и т.п. «Профессиональный потенциал» – "скрытые" профессиональные возможности (компетентности, энергия), которые трансформируются в реальные компетентности и энергию в процессе осуществления профессиональной деятельности. Разработана концептуальная модель использования "профиля сотрудника" в управлении трудовыми ресурсами проектно-ориентированной организации. Под степенью уникальности сотрудника понимается соотношение его компетентностей, энергии и потенциала с компетентностями, энергией и потенциалом других сотрудников. **Выводы**. Разработан метод оценки степени уникальности сотрудника, который проиллюстрирован расчетным примером. Обозначены направления использования данного показателя в управлении трудовыми ресурсами проектно-ориентированной организации.

**Ключевые слова**: трудовые ресурсы; компетентности; энергия; потенциал; управление; проект; степень уникальности.

*Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Бондар А. В. Управління трудовими ресурсами проектно-орієнтованої організації на базі профілю фахівця і ступеня його унікальності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.028>.

Bondar, A. (2020), "Management of human resources of the project-oriented organization based on the profile of the specialist and the degree of its uniqueness", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.028>.

UDC 065.012.32

DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.035>

D. BUSHUIEV, B. KOZYR

## HYBRID INFRASTRUCTURE PROJECT MANAGEMENT METHODOLOGIES

The **subject** of this article is the development of hybrid methodologies for managing projects, programs and project portfolios. Significant reductions in the life cycles of infrastructure programs, which contain projects of different lines of activity and different management methodologies, for example, waterfalls with a rigid life cycle and Agile with a flexible methodology life cycle, require the use of convergence tools to form “hybrid” methodologies. The **goal** is to develop a convergent approach to building hybrid project management methodologies in terms of decision-making processes in project management based on various platforms. **Results** of the studies were obtained using a convergent approach to building methodologies for managing infrastructure projects and programs. A substantial model of the resulting hybrid methodology for managing infrastructure projects and programs is presented. **Conclusions:** Hybrid methodologies for managing infrastructure projects and programs are becoming more popular in this category of programs. The main reason is the presence in the program of components with different life cycles, and, consequently, methodologies that require integration and harmonization. The methodology is tested by the practice of using mechanisms of hybrid multilevel management of infrastructure projects and programs. The study of hybrid infrastructural program management methodologies is defined by the practice of introducing different components of programs. The application of the hybrid project management methodology allowed the authors to execute different projects in essence within the stipulated timeframe with the given budget and quality of construction projects and projects of creation of information and communication infrastructure management systems. Further areas of research are related to the elaboration of harmonization, integration, convergence and actualization mechanisms.

**Keywords:** convergence model; hybrid management methodologies; infrastructure program; basic project management methodology interaction model; program manager.

### Introduction

The analysis of the tendencies of the development of infrastructure projects and programs has determined that the key factors for their success are taking into account the specifics of managing each class of projects included in the infrastructure program, reliability of implementation, efficiency in value creation and ecological harmonization in the light of turbulent environment. At the same time, improving the level of implementation of infrastructure programs is a strategic direction for Ukraine's development. The conducted analysis of the status and problems of the existing infrastructures of regions, cities, settlements and consumers of Ukraine has determined the relevance and practical importance of research on the implementation of complex infrastructure projects in turbulence based on the construction of a hybrid methodology for project and program management within a converged balanced approach [1]. The authors have developed a holistic model for solving problems of implementation of infrastructure projects and programs on the basis of dual (management with simultaneous learning, rational models) management within hybrid methodologies that combine different principles and life cycles of the management model. Experimental studies of the proposed hybrid approaches, models and methods of managing infrastructure programs have confirmed their adequacy and effectiveness.

Today, there is relatively little work in the known literature in which research would focus on various aspects of such an important direction of development as the effective management of infrastructure projects and programs to successfully implement them through a hybrid management methodology with parallel training of models to reduce uncertainty in program implementation. Also, insufficient attention was paid to project management of the implementation of infrastructure programs on the basis of prudent management [2, 3].

Of particular relevance to the uncertainty, challenges and challenges of the program's external and internal environments is the acquisition of such large-scale and long-lasting infrastructure programs. This class includes state targeted programs for the development of territorial systems, as a major component of Ukraine's development. Currently, the configuration of infrastructure development programs is based, as a rule, on the use of stationary models that do not take into account the variety of projects and management methods, and the dynamics of the external environment over the period of program implementation. On the other hand, in certain segments of the critical path of the program not only the values of the parameters of the environment, but also their methodologies and the priority in making management decisions change.

Current trends in the global development of project-oriented organizations that implement program and program infrastructures are accompanied by the development of their competence and technological maturity [41]. The activities of project-oriented organizations are generally mobile and based on generally accepted rules for implementing infrastructure programs and programs. This concerns the involvement of productive forces caused by cost minimization and environmental compliance. The basis for balanced development in the implementation of infrastructure projects is an innovative upgrade aimed at increasing the quality of products and services, enhancing their competitiveness through the implementation of best international practice [5]. The key factors are quality enhancements and the ability to create value and generate value [6].

Infrastructure programs, regardless of their type, operate in accordance with their organizational management strategies, which are based on a focus on the development and satisfaction of stakeholders. In a competitive environment, such strategies of infrastructure

programs are in many cases designed to support or create competitive advantages over other organizations or the competitive value of infrastructure program products [7, 8]. In the course of their activities, organizations must adapt the strategies of infrastructure programs to the influences of the external environment and internal dynamics. At the same time, it is necessary to find ways of effective investment of management resources in the application of appropriate methodologies, for timely achievement of the planned strategic indicators of infrastructure programs and programs [9].

**The purpose** of the article is to develop a convergent approach to building hybrid methodologies for managing infrastructure projects and programs from the perspective of decision making processes within boundaries based on different methodological platforms and standards.

---

### **Research methodology**

---

Infrastructure programs should not only be aimed at building (development) of a complex or large-scale system, they should take into account the development of concepts, changes in organizational structures and teams of managers [9]. In an infrastructure program designed to develop a new type of product (service), the use of new technologies [10, 11] and the concept of overall success management are crucial. Strategic management of the infrastructure program identifies elements of strategy that are critical to achieving the mission of the program, and creates a program structure for combining key elements [12, 13]. Managing an infrastructure program strategy is primarily about establishing a mission and managing its mental space [14].

In the practice of managing infrastructure programs, three approaches to strategy implementation are applied.

The first type of approach is to establish certain principles and / or implement an appropriate structure for the day-to-day operations, basic and minor decisions to enhance the professionalism and culture of the organization's members. This technique is developed to create a well-managed organization.

The second type approach is aimed at the development of new techniques and mechanisms for their implementation, which the organization can apply in work with both technological processes (equipment and technology) and management (business processes and business models).

The third type approach defines the mechanism of cyclical creation of new values, such as products and services, that provide organizations with success, which in turn defines the existing values of the organizations themselves.

For each approach, a specific activity profile scheme should be defined [15, 16].

Value creation is seen as a core concept of an infrastructure program that is phased out. The program begins by identifying the kind of values that you want to create, then moving on to value creation actions, and determining when to manage a value adjusting activity.

Most important in this work is the process of defining the vision, mission and strategy, which aims to prepare the infrastructure program by identifying problems and formulating key areas of the strategy. This process consists of:

- contextual analysis of the situation for the correct presentation of the complete picture (status) of the infrastructure program, including the environment;
- preparation of alternative scenarios.

In order for the management of the infrastructure program to be dynamic, with adequate response and to provide compensation for changes in the environment, the infrastructure program manager must forecast trends in the environment in the short and long term. It is necessary to model numerous scenarios of the situation development. To achieve this, the program team must begin with a thorough analysis of the current state and modeling of the desired state in the future. Leaders of the organization should formulate the main purpose of the infrastructure program in the form of a mission and justify in it the reason for the existence of the infrastructure program itself. This sets the stage for stakeholders to share the concept of the management team, increase their involvement in the implementation of the infrastructure program, and increase awareness of the issues through active collaborative learning and motivation.

In the next stage, the infrastructure manager sets out a clear goal for which management activities should be directed. This objective is formulated in the form of a concept or task of finding ways to implement an infrastructure program, in other words, identifying ways of achieving a mission to decide which program management methodologies to use. At this stage, it is desirable, whenever it's possible to describe the steps required to carry out the mission of the infrastructure program in the form of specific objectives. Infrastructure program management tools investigate, narrow, and sift through numerous scenarios and related management methodologies for the implementation of the infrastructure program, selecting a specific scenario that becomes the basis for further management and evaluation of the infrastructure program architecture.

Consider contextual analysis as a method of comprehending and presenting a holistic picture of an infrastructure program. This analysis is used to interpret the mission and strategy mainly when the interacting multiple values of the infrastructure program are expressed in abstract terms. In context analysis, the rules that shape the system or the appropriate methodology for generating a general context must be presented visually, and the requirements of the client or specialist from the infrastructure planner should be maximally embodied.

---

### **Study results**

---

Appropriate knowledge is applied to solve complex infrastructure program management problems, diagnostics are made, and the relationship between the whole and parts is improved by maintaining the right balance between the overall management of the whole and the autonomy of the parts, often different in nature of

---

implementation and life cycles. This is necessary because the essence of managing infrastructure program is to generate decisions while reducing managerial uncertainty, the programs are considered as a whole, are reciprocal, and must be coordinated to ensure the smooth progress of the infrastructure program. Therefore, bureaucratic obstacles between the implementation of different components of an infrastructure program must be eliminated in order for the programs to interact in a harmonious way and to produce results defined by the mission. For this reason, program management establishes specific rules for the interaction between component and projects, maintains and ensures the inherent autonomy of programs.

In order to build relationships between the whole and parts and to align them with the content of the mission and the strategy of the infrastructure program, the project management should analyze and determine the principles and organization of the relationship, the behavior of the whole and its components. Both the rules for managing the infrastructure program and the principles and methodologies of management for reaching a compromise and determining the direction of action in the organizations implementing the programs should be established and, if necessary, revised and improved.

Infrastructure program management is designed to interpret mission-defined, mission-relevant components and values at the strategic level to identify synergies across the subject areas, objectives, goals and tools, implementation of integration management, which focuses on prioritizing implementation of components in all program implementation processes.

The conceptual model proposed in the study is based on the organization's life cycle, problems and challenges

related to specific situations during the infrastructure project lifecycles, early warning indicators, and proactive impact model generation during program implementation [17].

For the purpose of understanding the terms that are not well known, here are the basic definitions of the study.

Definition 1. By the hybrid methodology, we define a methodology that combines different management principles and methodology approaches. For example: Agile with flexible lifecycle, Waterfall lifecycle PMBoK, Value-based P2M and Prince 2 with Gateway project phase management model.

Definition 2. Proactive management is based on forecasting and decision making based on a vision of the future and challenges or perturbations.

Definition 3. Threat is a net risk that is damaging and has a critical or a negative impact on the status and success of a project or program.

Definition 4. Bifurcation is a critical state of the system in which two scenarios of its development are possible. It's a rise or fall. A bifurcation point is a change in the system's default mode.

Definition 5. Value determines the benefits a stakeholder receives. In projects and programs, value must be balanced across all stakeholders.

Definition 6. Turbulence is a state of the system or its environment that generates the uncertainties (vortices, tsunamis, or other forms) in organizational development processes. In this case, the development of the system is significantly inhibited or accelerated.

The conceptual diagram of infrastructure program management based on the hybrid methodology is shown in fig. 1.

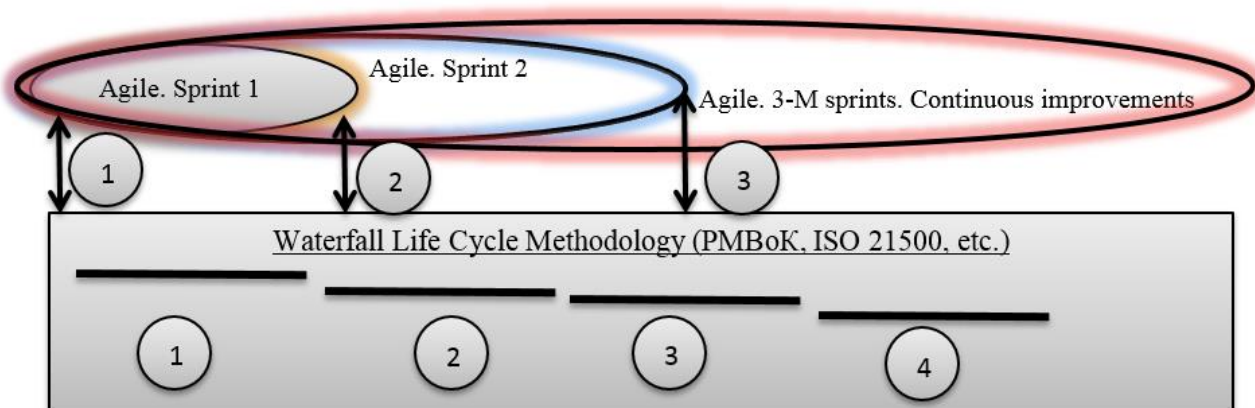


Fig. 1. Conceptual scheme for managing infrastructure programs based on hybrid methodology

This example provides an overview of how Agile and PMBoK methodologies work together. Two sprints are highlighted in the Agile methodology. At the first sprint a minimum working product was created. The second sprint is where a working product is created with the necessary features that support the functioning of this component of the infrastructure project. The third and subsequent sprints are dedicated to the system of continuous improvement (Kaizen). The waterfall life cycle methodology outlines 4 phases of the projects. Hybrid methodology models 1-3 are harmonized, integrating,

converging and updating based on relationships 1-3. These operations are shown in fig. 2 when developing a hybrid methodology for managing infrastructure programs based on genomic representations of components.

Managing the success of an infrastructure program can only be guided by value vectors for different stakeholder groups, use trends to accelerate development, convergence of knowledge, timely change in management paradigms, understanding the philosophy of life cycles, [18]. Each of these elements is part of the success of the

infrastructure program, and the formula for success is determined by the synergy of their interaction [1].

The return from a proactive to a reactive management method is associated with the transformation of a challenge into a problem. The term proactivity is called the period of transformation of a call into a problem. The proactive term assessment approach is used in software development projects based on Agile methodology. For example, in a definition such as proactive protection of an infrastructure program means a set of technologies used in information and communication systems. The main purpose is to identify potentially dangerous software and eliminate its impact or the code itself within the operating software systems. Unlike other technologies, they warn and try to block dangerous activity, rather than detecting a known malware on the system. It uses a model of active bifurcation points that are linked to life-cycle events and change the priorities of the infrastructure components to implement one of the strategies – anti-crisis, stabilization and sustainable development.

Stakeholder management philosophy assumes that their claims are legitimate and therefore subject to consideration. It should be noted that those interpretations of the stakeholder concept that limit the legitimacy of their claims should be rejected for economic reasons as they ignore the fact that the organization's resources are limited. Unlimited satisfaction is not possible because it will cause a shortage of the exchange product. For their part, the stakeholders in many cases do not intend to relinquish their claims without resistance. In practice, this leads to political processes in the relations between groups, in particular, to the struggle for the distribution of material and other goods.

Let's consider a generalized model for implementing infrastructure programs in which companies from several countries are involved.

The model is represented as:

$$K = \langle \check{E}, \check{O} \rangle,$$

where  $\check{E}$  – the environment of the infrastructure program;  $\check{O}$  – model of infrastructure program implementation activities.

The environment of the organization  $\check{E}$  is also considered as a fractal consisting of self-similar models of the cultural, political and economic environment of the countries where the organizations that are involved in the implementation of the infrastructure program are operating.

$$\check{E} = \{E_1, E_2, E_i, \dots, E_n\},$$

where  $n$  number of countries where the organization does business.

Accordingly, a project-oriented organization contains a number of separate units in these countries and is displayed by a fractal model  $\check{D}$  in the organization of self-similar in structure and functions of organizations.

$$\check{D} = \{D_1, D_2, D_j, \dots, D_m\},$$

where  $m$  number of organizational units.

On the basis of the divisions of the organization  $\check{D}$ , a model of its activity  $\check{O}$  is formed on the basis of a conceptual scheme of value creation and migration in the cultural, political and economic environment. At the same time, organizational units in different countries have self-similar structures. This makes it possible to apply fractal models to the formation of control mechanisms.

Model of the environment of the organization:

$$\forall E_i \in \check{E} \exists M_i^0 = \langle \check{R}_i, \check{G}_i, C_i \rangle,$$

where  $M_i^0$  – the environment model of the organization in the  $i$ -th country;  $\check{R}_i$  – model of market and country influence on organization activity;  $\check{G}_i$  – model of interaction with partners in the  $i$ -th country;  $C_i$  – model of interaction with competitors in the  $i$ -th country.

Let the model of activity in each country be formed as:

$$\forall D_j \in \check{D} \exists O_j^0 = \langle P_j, \hat{R}_j, \hat{U}_j \rangle,$$

where  $O_j^0$  – model of the organization's activity in the  $j$ -th country;  $P_j$  – model of product creation in the  $j$ -th country of the organization;  $\hat{R}_j$  – production model in the  $j$ -th country;  $\hat{U}_j$  – management model in the  $j$ -th country.

The interaction model is determined by the matrices  $\Psi_o, \Psi_p, \Psi_c$  expressed in the form of multipliers that interact through dampers or risk acceptors of market influence on the organization, partners, and competitors. Here  $\Psi_o$  is a matrix of the impact of the environment on organizations;  $\Psi_p$  – matrix of influence of environment on partners;  $\Psi_c$  is the matrix of influence of environment on competitors. The elements of the matrices  $\Psi_o[1, j], \Psi_p[1, j], \Psi_c[1, j]$  determine the influence of the environment on the activity of the unit of the  $j$  organization. The elements of the matrices  $\Psi_o[2, j], \Psi_p[2, j], \Psi_c[2, j]$  determine the influence of the activity of the unit  $j$  of the organization on the environment. The model of influence, which determines the immune mechanisms, includes coefficients distributed over five risk zones of influence of critical factors on the state of the organization and future destruction. The model is based on trends monitored by the project team on a scale of estimates  $\Omega$ :

Suppose that for each element of the matrices  $\Psi_o[1, j], \Psi_p[1, j], \Psi_c[1, j]$ ,

$F_o(\Omega_j), F_p(\Omega_j), F_c(\Omega_j)$  mechanisms of control of the hybrid methodology – market dampers and competitors and risk absorbers passed on to the partners of the infrastructure program are known.

Then, the organization's infrastructure management mechanism implements the following steps for each unit:

Assessment of the state of the environment for each unit of the organization  $\Omega_j$ .

For each unit of the organization, the value of risk absorption is assessed through their transfer to contract partners and the company as a whole.

$$\forall_j = \overline{1, j}: F_p^{MK} = \sum F_p(\Omega_j),$$

where  $j$  – the number of countries in which the organizational units are located,  $F_p^{MK}$  the total amount of potential losses transferred to partners.

For each unit of the organization, the values of accepted threats, risks of market behavior and possible damping of their negative impact on the organization as a whole are evaluated.

$$\forall_j = \overline{1, j}: F_o^{MK} = \sum F_o(\Omega_j),$$

where  $F_o^{MK}$  the total amount of potential losses from the negative impact of the market in the  $j$ -th country.

For the organization the values of the accepted threats, risks and their partial transfer to the partners are evaluated

$$F = F_o^{MK} F_c^{MK} F_p^{MK},$$

where  $F$  – the total amount of losses from the negative impact of the environment of the infrastructure program.

The values of losses that form the maximum negative impacts of the market or competitors are highlighted.

$$\forall_j = \overline{1, j}, \Psi_e = \max(F_o(\Omega_j), F_c(\Omega_j)).$$

For each maximum loss value  $\Psi_e$ , an anti-crisis project is formed, which assesses the  $C_e$  costs and the BCR cost benefit indicator. If the BCR factor is greater than 1, then this project is placed in the pool of projects of crisis management.

If there are not yet considered  $F_o(\Omega_j), F_c(\Omega_j)$ , then another iteration occurs and goes to p. 3.

After the infrastructure program pool is formed, it is selected into the current project portfolio. The selection of projects is subject to limitations

$$\sum_1 C_e \leq B_p,$$

where  $B_p$  is the budget of the infrastructure program for the current period.

In order to build an effective hybrid infrastructure project management methodology, the feasibility of using genomic representations of the portfolio management, program and project management methodologies is substantiated [2, 3].

We will analyze the use of genomic representations of management methodologies, taking into account existing problems of financial organizations, turbulence of internal and external environment. The problems can be divided into four groups: definition of purpose, goal achievement, organizational competence and organizational behavior (fig. 2).

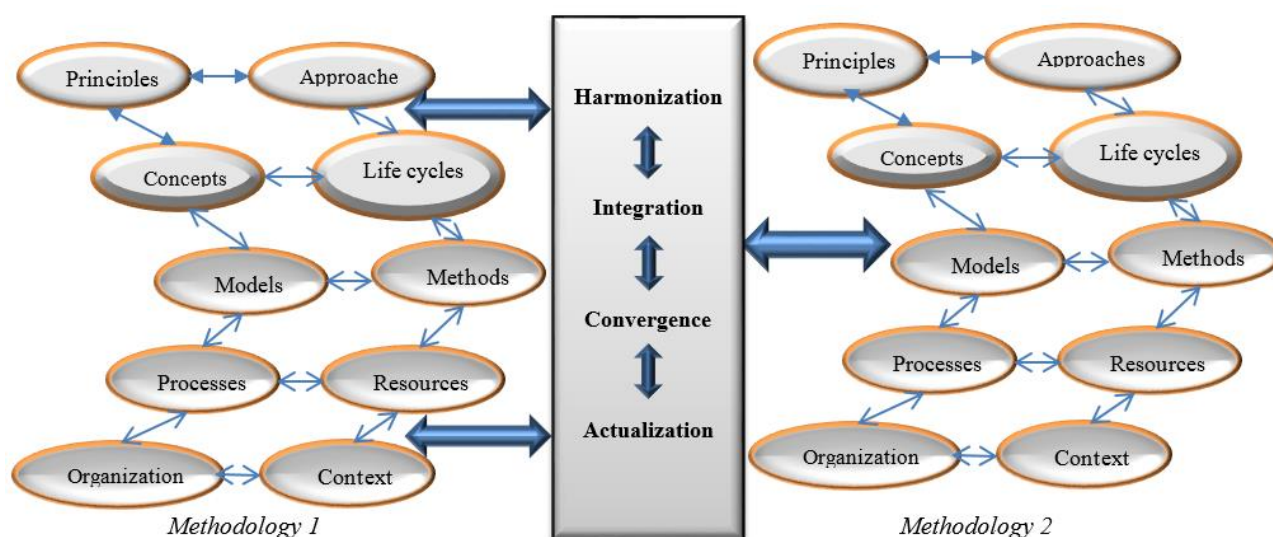


Fig. 2. Genome model of hybrid infrastructure program management methodologies

As an example, consider the step-by-step formation of methodologies. The use of interaction mechanisms depends on the level of maturity of project management in the organization [17]. At low levels of maturity, the methodology is not fully needed and may not be represented by all elements. At the high levels of maturity, organizations implementing large-scale, integrated programs and projects require a methodology that has the full range of elements that contain all the variety of

elements needed. That is, for the most complex and hypothetically diverse portfolio of programs and projects, the methodology approaches a "hypothetically complete system".

The knowledge carrier of the methodology formed is based on this model. The formalized model of the methodology genome is written as follows

$$M = \langle P, K, A, L, Y, D, V, O \rangle.$$

Let there be a set of principles that define the methodology:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}.$$

This set must have the properties of completeness and consistency. As part of the implementation of the principles and alternative concepts, many approaches are known to be used in determining the methodology:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}.$$

Alternative concepts can be formed based on these principles:

$$K = \{k_1, k_2, \dots, k_i\}.$$

The methodology should be acceptable for multiple project life cycles:

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_r\}.$$

Models and methods for managing projects, programs, and portfolios are superimposed on combining models. These models, methods and mechanisms are implemented based on the process components of the methodology:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_q\}.$$

The documents that accompany the management process system are defined as a set of:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_z\}.$$

Each methodology is linked to the corporate culture of management (culture is expressed through a set of cultural values):

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}.$$

This methodology should be linked to the organizational environment and context:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_g\}.$$

where the indices  $n, m, i, r, q, z, c, g$  determine the number of elements of each set, which describes the genome of methodologies.

In this model, we will distinguish two mechanisms: systematization within each level and harmonization between the levels of the model.

The harmonization mechanism provides a systematic elaboration of models at each level. The elements of each level are systematized based on the adjacency matrix.

The integration mechanism ensures the formation of a complete model of the hybrid methodology. This integration depends on the specifics of each methodology that is included in the hybrid.

The convergence mechanism ensures the interpenetration of best practices (solutions) within the framework of applied methodologies.

The update mechanism prepares a hybrid methodology for implementation.

Each of these mechanisms has a complex structure, functions inputs and outputs. Such mechanisms will be defined in detail in the following publications of the authors.

For example, relationships at the first level between principles and approaches are systematized by the adjacency matrix. At the same time, the matrix elements determine the system compatibility of individual principles and approaches. A value of 0 indicates that elements do not match or do not interact with each other, and 1 indicates that they are fully consistent and have the maximum interaction. Similarly, matrices are formed at other levels of the model. The task of the systematization mechanism is to determine the system compatibility of the selected elements of methodologies. In this case, the term "genetic code of the project (program)" will mean its system model, which includes an initial idea of the "vision" of the project or program product, an integrated process for the development of a specific functional activity, built for the entire life cycle of the project, tools for its interaction with the external environment. At the same time, the genome of project management methodologies, project and program portfolio management have the same spiral structure for different content. We introduce the concept of algebra of project management methodologies:

$$A = \langle \check{S}, \Omega \rangle,$$

where  $\check{S}$  – carrier of knowledge of methodologies, placed in the genome;  $\Omega$  – a signature that defines a set of operations on methodology elements.

The signature contains operations for projecting individual elements of the methodology and their groups, combining, intersecting, and supplementing methodologies, and so on.

The purpose of the genetic code of projects, programs and portfolios is navigation in the implementation of functions and development processes. At the same time, the Navigator, moving through the phases and steps of the life cycle, uses information from the genetic code – its interconnected structures in the management processes. Most often, the process of forming the genetic code of a project occurs spontaneously, based on the intuition and practice of project management of the organization. Moving further in the application of project management analogies in the field of genomic models, we will distinguish two additional genomes of the hybrid model - the genome of competencies in methodology 1 and the genome of competencies in methodology 2. These genomes intersect at the point where project competencies are implemented at the expense of project manager's competence. This interaction forms the "chromosome" of the project [17].

#### **An example of the application of a hybrid infrastructure program management methodology**

As an example of application of methodology of profile of mission and strategy of implementation of the infrastructure program which was implemented in PJSC

"Mykolaiv bread factory". Today, this organization has facilities for storage and processing of cereals, production and granulation of compound feed, bran. The mission of the infrastructure program for the development, reconstruction and modernization of the production facilities of the Public Joint Stock Company "Mykolaiv bread factory" was to increase, diversify production facilities, increase logistical and commercial attractiveness, by reconstruction, modernization of existing fixed assets and construction. The strategy of the infrastructure program determines the order of construction, reconstruction and modernization of production facilities of the program of development of PJSC "MBF", provided that in the near future from the beginning of the implementation of the development program, the company will be able to receive income from the commissioned new production facilities without waiting for completion all projects [19].

This strategy allowed in a short time, not more than one and a half years, to complete the implementation of the development program, while not stopping production activities, gradually increasing the capacity of services, production. The purpose of creating a linear object of engineering and transport infrastructure to ensure stable cargo flow through berth No. 10 of Mykolaiv seaport through public-private partnership is to increase the volume of cargo processing and diversify cargo flows through the berth, to increase the logistical and commercial attractiveness of seaport and its technical equipment.

The structure includes the infrastructure program includes the following components:

- project No. 1 – "Silo-type storage facility for storage of agricultural products with auxiliary buildings and structures";

- project No. 2 – "Item No. 1 for receiving loads of agricultural products with auxiliary buildings and structures";

- project No. 3 – "Item No. 2 for receiving loads of agricultural products with auxiliary buildings and structures";

- project No. 4 – "Storage of silo type No. 2 for storage of cargoes of agricultural products with auxiliary buildings and structures";

- project No. 5 – "Non-residential buildings of the elevator complex (reconstruction of the elevator building - lit. F1-5 with an extension of the tower No. 2"

- project No. 6 – "Thermal Station with Auxiliary Buildings and Structures";

- project No. 7 – "Linear object of engineering and transport infrastructure - gallery for transportation of goods of agricultural products";

- project No. 8 – "Creation of information system for management of the infrastructure program of PJSC "Mykolaiv bread factory" according to Agile methodology.

Projects No. 1–7 were created using the "waterfall model" of management.

A panorama of the results of implementing the infrastructure program is shown below (fig. 3).



**Fig. 3.** Panorama of the results of the implementation of the infrastructure program of PJSC " Mykolaiv bread factory

The given infrastructure program "creation of a linear object of engineering and transport infrastructure to ensure stable cargo flow through berth No. 10 of the Mykolaiv seaport has been successfully completed and the constructed objects of the grain terminal have been put into operation.

The implementation of this program allowed to solve the following tasks:

- a) create additional port facilities, expand existing port infrastructure;

b) to increase the receipt of budgets of all levels and trust funds, the collection of port fees by increasing the volume of cargo through berth No. 10 of the seaport;

c) to expand the integration of the seaport with the business lines of the OREXIM Group of Companies through attractive service, differentiated flexible tariff policy, optimal logistics;

d) optimize and develop the structure of the port;

e) to create conditions for attracting sustainable freight traffic;

f) to increase, gradually after three years, the cargo turnover of the seaport by approximately 1800 thousand tons per year, increase the number of ship activities by 156 units per year, which will result in a significant increase in the revenues from the port fees at berth No. 10 not less than UAH 50.987 million per year, from the service of access of the port operator to the berth No. 10 additionally at least UAH 6,552 million per year,

payments to the state budget of at least UAH 33.749 million annually.

### Conclusions

1. The study of hybrid methodologies for managing infrastructure programs is determined by the practice of implementing program components that differ in their essence.

2. The use of a hybrid project management methodology allowed the authors to complete essentially different projects within a specified time frame with a specified budget and quality of construction projects and projects for creating information and communication systems for infrastructure management.

3. Further research areas are related to detailed elaboration of mechanisms for harmonization, integration, convergence and actualization.

### References

1. Bushuyev, S., Verenych, O. (2018), "Organizational Maturity and Project: Program and Portfolio Success", *Developing Organizational Maturity for Effective Project Management (Chapter 6: Organizational Maturity and Project: Program and Portfolio Success)*, Under the head. ed. G. Silvius & G. Karayaz, IGI Global, P. 349 (chapter 6 P. 104–127). ISBN13: 9781522531975 / ISBN10: 1522531971 / EISBN13: 9781522531982. DOI: 10.4018/978-1-5225-3197-5
2. ISO 21500:2012 (2012), *Guidance on project management*, Project Committee ISO/PC 236, ISO, 36 p.
3. *The Standard for Program Management – Fourth Edition* (2017), Project Management Institute, 2006, 104 p.
4. Azarov, N. Ya., Yaroshenko, F. A., Bushuev, S. D. (2011), *Innovative mechanisms for managing development programs*, Kyiv : Summit Book, 564 p.
5. Lefley, F., Sarkis, J. (2005), "Applying the FAP model to the evaluation of strategic information technology projects", *International Journal of Enterprise Information Systems*, No. 1, P. 69–90.
6. Turner, J. (2007), *A guide to project-oriented management*, Moscow : Dom Grebennikova, 552 p.
7. Archibald, R. D. (2004), *Management of high-tech programs and projects*, Moscow : DMK Press, 472 p.
8. Burkov, V. N., Novikov, D. A. (1997), *How to manage projects*, Moscow : Sinteg, 188 p.
9. Bushuyev, S., Verenych, O. (2017), "Competencies as an Instrument for the Blended Mental Space Management of a Project", *The 11th International Conference on Project Management (ProMac2017)*, Munich, Germany, P. 850–859.
10. Verenych, O., Bushuyev, S. (2018), "Interaction researching mental spaces of movable context, stakeholder and project manager", *Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal*, Vol. 10, Issue 1, P. 1684–1695, DOI: 10.1515/otmcj-2016-0021
11. Phillips, J. J., Bothell, T. W., Snead, G. L. (2003), *The project management scorecards*, Amsterdam : Elsevier, 353 p.
12. Verenych, O., Bushueva, V. (2017), "The Blended Mental Space as one of the factors for sustainability and success in the project implementation process", *International Research Conference*, Dortmund, Germany, P. 118–125.
13. Molokanova, V. M. (2011), "Investigation of synergetic levels of design-oriented management", *Project management and production development: Coll. Sciences. Ave.*, Lugansk : SNU them. Dalia, No. 3, P. 30–37.
14. Verenych, O., Dorosh, M. (2017), "Blended Mental Space: the methodology for creation and approaches for its management", *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Vol. 2, P. 30–37. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2017.8099423
15. Verenich, O. V. (2016), "Management of infrastructure projects and programs as a key element for the development of social and economic systems", *Management of the development of folding systems: zb. Sciences prac*, Kyiv : KNUBA, No. 25, P. 23–31.
16. Yaroshenko, Yu. F. (2013), "Organization development in bifurcation", *Managing the development of complex systems*, Vol. 15, P. 93–97.
17. Bushuyev, S. D., Bushueva, N. S. (2007), "Proactive management of organizational development programs", *Project and program management*, Moscow : SOVNET, No. 4 (12), P. 270–282.
18. Bushueva, N. S. (2007), *Models and methods of proactive management of organizational development programs* : Monograph, Kyiv : Science. light, 200 p.
19. Bushuyev, S., Kozyr, B., Zapryvoda, A. (2019), "Nonlinear strategic management of infrastructure programs", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.014>.

Received 14.02.2020

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бушуєв Денис Антонович** – кандидат технічних наук, Київський національний університет будівництва та архітектури, доцент кафедри інформаційних технологій, Київ, Україна; email: BushuyevD@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5340-5165>.

**Бушуєв Денис Антонович** – кандидат технических наук, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, доцент кафедры информационных технологий, Киев, Украина.

**Bushuiev Denis** – PhD (Engineering Sciences), Kiev National University of Construction and Architecture, Associate Professor of the Department of Information Technology, Kyiv, Ukraine.

**Козир Борис Юрійович** – кандидат технічних наук, Київський національний університет будівництва та архітектури, доцент кафедри управління проектами, Київ, Україна; email: KozyrB@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-4571>.

**Козырь Борис Юрьевич** – кандидат технических наук, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, доцент кафедры управления проектами, Киев, Украина.

**Kozyr Boris** – PhD (Engineering Sciences), Kiev National University of Construction and Architecture, Associate Professor of the Department of Information Technology, Kyiv, Ukraine.

## ГІБРИДНІ МЕТОДОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ІНФРАСТРУКТУРНИМИ ПРОЄКТАМИ

**Предметом** статті є розробка гібридних методологій управління проектами, програмами і портфелями проєктів. Істотною скорочення життєвих циклів інфраструктурних програм, які містять проєкти різних напрямків діяльності та різними методологіями управління, наприклад "водоспадні" з жорстким життєвим циклом і Agile з гнучким життєвим циклом методології, вимагають використання інструментів конвергенції для формування "гібридних" методологій. **Мета** – розробити конвергентний підхід до побудови гібридних методологій управління проектами з точки зору процесів прийняття рішень в управлінні проектами на основі різних платформ. **Результати дослідження** отримані на основі використання конвергентного підходу до побудови методологій управління інфраструктурними проектами і програмами. Представлена змістовна модель отриманої гібридної методології управління інфраструктурними проектами і програмами. **Висновки:** Гібридні методології управління інфраструктурними проектами і програмами стають більш затребуваними в цій категорії програм. Головною причиною є наявність в програмі компонентів з різними життєвими циклами, а, отже, і методологіями, які вимагають інтеграції та гармонізації. Методологію перевірено практикою використання механізмів систем гібридного багаторівневого управління інфраструктурними проектами та програмами. Дослідження гібридних методологій управління інфраструктурними програмами визначено практикою впровадження різних, за сутністю, компонентів програм. Застосування гібридної методології управління проектами дозволило авторам виконати різні за сутністю проєкти в обумовлені терміни з заданим бюджетом та якістю будівельних проєктів та проєктів створення інформаційно-комунікаційних систем управління інфраструктурою. Подальші напрямки досліджень пов'язані з детальним опрацюванням механізмів гармонізації, інтеграції, конвергенції та актуалізації.

**Ключові слова:** конвергенція моделей; гібридні методології управління; інфраструктурна програма; модель взаємодії базових методологій управління проектами; менеджер програми.

## ГИБРИДНЫЕ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФРАСТРУКТУРНЫМИ ПРОЕКТАМИ

**Предметом** статьи является разработка гибридных методологий управления проектами, программами и портфелями проектов. Существенные сокращения жизненных циклов инфраструктурных программ, которые содержат проекты разных направлений деятельности и разными методологией управления, например "водопадные" с жестким жизненным циклом и Agile с гибким жизненным циклом методологии, требуют использование инструментов конвергенции для формирования "гибридных" методологий. **Цель** – разработать конвергентный подход к построению гибридных методологий управления проектами с точки зрения процессов принятия решений в управлении проектами на основе различных платформ. **Результаты** исследования получены на основе использования конвергентного подхода к построению методологий управления инфраструктурными проектами и программами. Представлена содержательная модель полученной гибридной методологии управления инфраструктурными проектами и программами. **Выводы:** Гибридные методологии управления инфраструктурными проектами и программами становятся более востребованными в этой категории программ. Главной причиной является наличие в программе компонентов с различными жизненными циклами, а, следовательно, и методологиями, которые требуют интеграции и гармонизации. Методологию проверено практикой использования механизмов систем гибридного многоуровневого управления инфраструктурными проектами и программами. Исследование гибридных методологий управления инфраструктурными программами определено практикой внедрения различных по сути компонентов программ. Применение гибридной методологии управления проектами позволило авторам выполнить различные, по сути, проекты в оговоренные сроки с заданным бюджетом и качеством строительных проектов и проектов создания информационно-коммуникационных систем управления инфраструктурой. Дальнейшие направления исследований связаны с детальной проработкой механизмов гармонизации, интеграции, конвергенции и актуализации.

**Ключевые слова:** конвергенция моделей; гибридные методологии управления; инфраструктурная программа; модель взаимодействия базовых методологий управления проектами; менеджер программы.

### Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бушуев Д. А., Козир Б. Ю. Гібридні методології управління інфраструктурними проектами. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.035>.

Bushuiev, D., Kozyr, B. (2020), "Hybrid infrastructure project management methodologies", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.035>.

KOWO SOLOMON AKPOVIRORO, KADIRI ISMAILA BOLARINWA, ZEKERI ABU

## IMPACT OF EMPLOYEES DIVERSITY ON ORGANIZATIONAL PERFORMANCE OF SELECTED MULTINATIONAL FOOD PRODUCING INDUSTRY IN SOUTH-WEST NIGERIA

**Subject matter:** Diversity has, nonetheless, been a powerful influence on terminology and practice worldwide. Employee diversity encompasses a wide variety of differences, including age, gender, culture, work experience, parental status, educational background, geographic location, and much more. **Goal:** Examine the effect of gender diversity on sales Patronage of multinationals Food Industry and also to determine the effect of age diversity on multinationals operational cost. **Tasks:** The optimum outcome of this study is to benefit the Multinational Food industry in Nigeria by getting along with the top management and workers from different backgrounds that would find the information in this research study useful in accessing the value of workforce diversity in their organization. **Methods:** Two research questions were posed for the study and two hypotheses formulated in line with the objectives. The paper adopted descriptive research design. Simple random sampling was employed. The total population of the study consists of 9,376 employees of Multinational Food Companies in South-West Nigeria. The study made use of macorr sample size determination. The research questionnaire was administered to three hundred and seventy-five (375) employees which was the sample size representing the chosen study population of the 5 selected multinational food industry in South-West Nigeria. The study made use of statistical tools such as Hierarchical regression analysis in testing hypotheses, Cross tabulations, Inter-item correlation test and ANOVA which helped in the interpretation of results. **Results:** The study found out that there is a positive relationship between gender diversity and sales patronage such that sales patronage is affected by gender diversity. The findings of the study further revealed a positive relationship between age diversity and operation cost such that operation cost is affected by age diversity in the organization. **Conclusions:** The research concludes that there exists a relationship between employee diversity and organizational performance and organizations should ensure that diversity existent in their employees is aimed at improving organizational performance. The research recommends that multinational food industry should not only ensure employee diversity in their businesses but they should also make sure that diversity is used to improve organizational performance. Further studies should focus on other sector and not limited to food and beverage and conglomerate sectors of the Nigeria economy.

**Keywords:** Employees Diversity; Organizational Performance; Gender Diversity; Age Diversity; MNCs.

### Introduction

Today, workforce diversity is a global phenomenon. Any business that intends to be successful must have a borderless view and an underlying commitment to ensuring that workforce diversity is part of its day to day business operation. Understanding the impacts of diversity on organizational outcomes, such as organizational performance, employee satisfaction, and turnover, is very essential (Sungjoo and Rainey, 2014; Afolabi & Omole, 2012). Employee diversity encompasses a wide variety of differences, including age, gender, culture, work experience, parental status, educational background, geographic location, and much more. Diversity management and workforce diversity is a forced integration that creates conflict and uncertainty in the workforce as leadership is not skilled in the discipline of diversity management and its principles. Managers do not know how to effectively practice diversity management, and what factors contribute to effective diversity management and task that can deal with diversity related issues in the work place. Companies train employees upon hire, conduct ethics test, online training and targeted anti-harassment training, employees still make decisions to break the rules with their behavior when it comes to diversity. Nigeria provides an interesting setting to investigate diversity, given the multiple diversities that characterize the country. Africa's most populous state with a population of over 180 million, the country has over 300 ethnic groups, with three major groups making up about 70 per cent of the population: Hausa-Fulani in the northern regions, Yoruba's in the

southwest region and Igbos in the southeast. Several other minority ethnic groups are scattered along the 36 states of the federation, some with populations of up to 10 million. There is also religious diversity, with a largely Muslim in the north and a predominantly Christian in the south, although dense populations of religious minorities can be found in most states and regions. Diversity discussion in Nigeria has traditionally been dominated by cultural and religious issues. Nigeria places unusually high focus for the national diversity issues based on cultural and religious issues and has one of the five most diverse populations with poor workplace inclusion, a weak legal framework, government and social exclusivity in the world. Nevertheless the extent to which employee's diversity has enhanced organizational performance in Nigeria states has not been ascertained by many researchers.

### Statement of the Problem

Gender differences of workforce in organization have been of contention in relation to nature of jobs. Today employees are more aware of gender differences and their importance to enhance their performance for organization growth. But various previous researches shown that though opportunity is given to female employees but still female employees are not considered as competent as male employees. Men's and Women's differences may provide insights into the different needs of male and female customers. Researchers have further argued that men and women may also have different cognitive abilities. Tajfel (1986) in their research on social

identity theory suggested a negative relationship between gender diversity and performance. Hassan (2013); Greenberg (2014) also found the negative relationship between performance and the gender differences. From the foregoing it is clear that the research on the relationship between gender and organizational performance is not conclusive. Several researchers have opined that how organizations approach age diversity can have significant implications for whether the organization is helped or harmed by its diversity. Organizational age diversity sometimes increase conflict, reduces social cohesion, and increase employee turnover. Some researchers, on the other hand, believe that workforce age diversity possesses potentials for enhancing performance. Successful age diversity management and a resulting improvement in organizational performance are positively correlated and that age diversity has enhanced performance by broadening the group's perspectives. Some studies have found that various forms of diversity are associated with greater innovation, improved strategic decision making, and organizational performance. However, the challenges that organizations face in promoting teamwork with employees from diverse cultural background, age, gender, race, education religion and harmoniously directing their efforts towards the achievement of organizational goals and objectives, still shows that there is much to be done in terms of the improvement of workforce diversity management strategies. A number of questions have therefore emanated from the research problem as the study intends to answer the following research questions to solve the research problem. (i) How does gender diversity affect the sales Patronage? (ii) What is the effect of age diversity on operational cost?

### Objectives of the Study

1. Examine the effect of gender diversity on sales turnover of multinationals Food Industry.
2. Determine the effect of age diversity on multinationals operational cost.

### Research Hypotheses

#### Hypotheses One

Ho1: Gender diversity does not significantly affect sales Patronage of multinationals Food Industry

#### Hypotheses Two

Ho2: Age diversity does not significantly affect operational cost of multinationals Food Industry

## Literature Review

### Conceptual Overview

#### Meaning and Concept of Diversity

Diversity has been an evolving concept. The term is both specific, focused on an individual, and Contextual, defined through societal constructs (Ndubisi, 2006). Many current writers define diversity as any significant difference that distinguishes one individual from another, a description that encompasses a broad range of overt and hidden qualities. Generally, researchers organize diversity characteristics into four areas: personality (e.g., traits,

skills and abilities), internal (e.g., gender, race, ethnicity, I.Q., sexual orientation), external (e.g., culture, nationality, religion, marital or parental status), and organizational (e.g., position, department, union/non-union) (Friday & Friday 2013). The trend in defining diversity "seems to favour a broad definition, one that goes beyond the visible differences" that, for many people, are too closely linked to affirmative action (Erasmus, 2016). Diversity is generally defined as acknowledging, understanding, accepting, valuing & celebrating differences among people with respect to age, class, and ethnicity, and gender, physical & mental ability. Over the past decade the work force in industrialized countries has become increasingly heterogeneous. These countries are spending huge amount for diversifying the workforce. Thus, diversity is increasingly recognized & utilized as an important organizational resource in regards to whether the goal is to be an employer of choice to provide an excellent customer service or to maintain a competitive edge. (Weiliang et al, 2011). Even though many researchers agree that the results of diversity conscious organizations add value to their performance. Researches on the effects of within teams & small groups indicate that diversity can have both positive and negative effects.

### Age diversity

Unlike other forms of equality such as race and gender, age discrimination as a policy issue has only began to emerge over the past twenty years (Erasmus, 2016). Duncan, (2013) has argued that the business case for age diversity may also be used to stake claim against recruiting older workers, on account of higher employment costs. Diversity scholars have argued that age-diverse workforces display a host of different knowledge, values, and preferences. Their perspectives, including their mental models are different (Childs, 2016). Thus as a team, they have a larger pool of knowledge and a larger problem solving toolbox leading to improved firm performance (Gelner & Veen, 2013). (Dimatosa, 2015) have observed that younger managers are more likely to have attended school in a more diverse environment, or worked with minority groups at some point during their careers. Medical, psychological and economic research has also shown that employees of different age groups differ in skills, attitudes and abilities and that these differing characteristics have different effects on productivity (Gelner & Veen, 2013). Young employees are considered to be more flexible and can portray an attitude of more change readiness as opposed to older employees. Old employees can also be considered as reservoirs of knowledge carrying the institutional memory of an organization thus enabling effective transfer of skill. Moreover, succession planning becomes more effective in age diverse organizations. Innovation has become one of the key strategies of the firm for gaining competitive advantage, expanding market share, and increasing overall firm performance (Franko, 1989; Richard, 2014).

**Gender Diversity.**

The increase in gender diversity at the workplace has attracted the attention of both researchers and practitioners and a particular question that arise is whether gender composition in an organizations' workforce will affect individual, group or organizational level performance (Gupta, 2013). Due to rapid environmental changes, many countries are changing to accommodate the increasing diverse workforce in their organizations, (Ojo, 2012). Several researchers investigating workforce diversity have found that gender diversity in the boardroom can positively affect firm performance (Opanachi, 2012). However, other studies have reported contrary findings of a negative relationship between women in boards and firm performance (Ojo, 2012; Afolabi & Omole, 2012). Zheng and Hyland (2013) reported no direct relationship between gender diversity and firm performance. Several researchers have argued that high levels of gender diversity are a source of competitive advantage. Based on literature, we argue that a well-balanced gender composition of employees may help create synergy leading to positive organization outcomes. Gender diversity is associated with resources that can provide a firm with a sustained competitive advantage. These resources include market insight, creativity, innovation and improved problem solving capabilities (Richard, 2014). Men's and Women's differences may provide insights into the different needs of male and female customers. Researchers have further argued that men and women may also have different cognitive abilities. A combination of different cognitive abilities in a gender diverse team may enhance overall team cohesion, creativity, and innovation leading to improved organizational performance. The increase in workforce gender diversity on work place has attracted the attention of both researchers and practitioners. In the early 1990s, both scholars and practitioners were generally optimistic about the effects of workforce diversity on performance (Akinusi, Sonubi & Oyewunmi 2017) Welliang et.al. (2012) argued that gender diversity can result competitive advantage for organizations. However, theories and empirical research suggest that gender diversity can lead to either positive or negative outcomes. Iliang et.al. (2012) argued that gender diversity can result competitive advantage for organizations.

**Challenges of workforce diversity.**

According to Greenberg (2014) the major challenges are communication, resistance to change, and implementation of diversity in the workplace. Ozbilgin and Tatli (2016) cite challenges from workforce diversity as meeting diversity challenges requires a strategic human resource plan that includes a number of different strategies to enhance diversity and promote the productivity and effectiveness. It also compels Human resource managers to solicit a trainable population, check required skills and competencies against the job, market jobs sufficiently ahead of needs, and extend the workforce boundaries to include the nationals of other countries. It brings with it the need for re-examining Human resource practices from top to bottom need to be re-examined to cope with the

new strengths and challenges of diversity, so better approaches can be created by management to recruit new talent, retain them, and manage them more effectively (Denton, 1992). Robinson et al., (1994) also cite that Human resource managers are faced with the challenge of convincing their senior management that diversity programs are beneficial to the organization. Following social identity theory, it is possible to explain the lack of positive association between gender and ethnic diversity and performance reported in the major investigation by Kochan et al. (2003). For example, it has been argued that members of diverse groups (particularly minority groups or out groups) frequently provoke distrust and competition (from the dominant groups or in groups) and that such groups tend to show less affiliation and commitment to each other, all of which may have negative consequences for performance (Opanachi, 2012).

**Workforce Diversity Management.**

Contemporary trends in the legal framework have necessitated the putting in place specific statutes making it unlawful to discriminate on grounds such as sex, marital status, race, national origin, ethnicity, disability, sexual orientation, religion or belief, union membership or non-membership, part-time or full time workers, or ex-offenders whose convictions are spent (Torrington et al., 2015). Torrington (2005) continues to argue that equal pay law requires men and women to be paid the same wage for doing work which is the same or which can be shown to be of equal value unless the employer can justify a difference on grounds other than sex. There are different approaches to equality such as legislative action/the equal opportunities or liberal approach and the managing diversity (Childs, 2016). According Daladi (2013) positive work climate includes an identifiable, open and nurturing school ethos that foster a sense of responsibility, achievement, commitment and efficacy among staff and students. It is also characterized by a commitment to organizational achievement and development of students, mutual respect and collaboration among the head and staff. Sungjoo and Rainey (2014) posits that positive work climate has been identified as a driver of performance and contributes a third of an organizational results. The responsibility of creating work climate lies solely on the head of the institution whose behavior determines the work climate. The positive behavior drives the work climate which arouses motivation and the aroused motivation is a major driver of bottom-line performance. To create a positive work climate, the leaders of the organization must work with staff in order to manage diversity as to foster and sustain staff motivation. The desired outcomes include attracting and developing the best employees which should give the organization a competitive edge to generate greater profits that support job security. Due to the fact that employees can understand how these outcomes are desirable, they will support the organization's efforts at managing diversity and embrace a culture that supports diversity (Ogunyinka, 2013). The increased diversity in the workplace converges with the increased use of teams in the workplace through clusters of attributes like personal demographics;

knowledge, skills, and abilities; values, beliefs, and attitudes; personality and cognitive and behavioral style; and organizational demographics. Diversity recognizes the unique barriers of race and gender among others while at the same time creating a work environment that values the diversity that all employees bring to the organization. Employees may have low self-esteem or isolated due to their race and national origin. Hence, top management must pay high attention into employee perceptions regarding to the cultural diversity either through the organization structure or formal or informal communications. It is important for management to recognize employee perceptions that foreign workers are supported and integrated into informal networks. Once they recognize management support, they will feel integrated into their informal network and work in a positive working environment.

### **The Concept of Organizational Performance.**

The concept of "scientific management" by Fredric Taylor in the early twentieth century laid the foundation for the modern concept of organizational performance. Organizational performance comprises the actual output or results of an organization as measured against its intended outputs (or goals and objectives). It is one of the most important variables in the field of management research today. Although the concept of organizational performance is very common in academic literature, its definition is not yet a universally accepted concept. (Gavrea, Ilies & Stegorean, 2011). Richard et al, (2006) view organizational performance as encompassing three specific areas of firm outcomes: (a) financial performance (profits, return on assets, return on investment, etc.), (b) product market performance (sales, market share, etc.); and (c) shareholder return (total shareholder return, economic value added, etc.). Specialists in many fields are concerned with organizational performance including strategic planners, operations, finance, legal, and organizational development. In recent years, many organizations have attempted to manage organizational performance using the balanced scorecard methodology where performance is tracked and measured in multiple dimensions such as financial performance (e.g. shareholder return), customer service, social responsibility, internal business processes & employee stewardship. (Richard et al, 2009). Daft (2000) defines organizational performance as the organization's ability to attain its goals by using resources in an efficient and effective manner; effectiveness being the degree to which the organization achieves a stated goal, and efficiency being the amount of resources used to achieve an organizational goal.

### **Sales Patronage.**

Sales Patronage is a challenge every organization faces especially as the business landscape continues to grow more competitive at unprecedented speeds (Atta, 2012; Ajala & Alonge, 2013). With goals becoming more aggressive, and the average quota attainment being at a disappointing 54%, reducing sales patronage is at the top of every sales leader's priority list (Hassan, 2013; Afolabi

& Aina, 2014). Ogunyinka (2013) posit that sales patronage impacts more than just sales leaders, when a sales rep leaves, it affects the entire company. Human resources and recruiting teams must quickly try to attract top talent in highly-saturated markets and develop career paths and opportunities to ensure high performers stay (Noon, 2007; Daladi, 2013). Sales operations teams must adjust sales capacity planning for potential sales patronage. Otherwise, there will be shortage amount of resources on the sales floor to cover territories and reach goals. Finance leaders need to adjust forecasting based on expected revenue changes resulting from sales patronage (Dandi & Nguyen, 2010). Scholars discovered that there is need for high volume of sales to increase the market share (Price, 1977; Ojo, 2012 ; Damatosa, 2015). In every industrialized society, the degree of competition among producer is rampant. It is certain that only most economically viable method of production will increase output and profitability. This constant demand for sales can only be actualized if the marketing department of an organization is able to put in place proper the setting strategies such as sales promotion which can be used to promote awareness on the existence of the products.

### **Operational Costs.**

Operating costs are expenses associated with the maintenance and administration of a business on a day-to-day basis (CIPD, 2014). The total operating cost for a company includes the cost of goods sold, operating expenses as well as overhead expenses. The operating cost is deducted from revenue to arrive at operating income and is reflected on a company's income statement (Meyer & Sternthal, 1991; Taylor, 2002; Griffeth & Hom, 2001). Long, Perumal & Ajagbe, (2012) pointed that operation cost, often referred to as operating cost, is the money that it takes to run a business. Operating costs are often reflected on the income statement, which is recorded for a company each year; the income statement reviews broad financial indicators such as overall revenues, the costs of goods sold, the operating costs and net profits (Amstrong, 2012). Operating costs also include the costs of buying or making your products and services. These are often called the cost of goods sold (COGS). These are the costs that are subtracted from total revenues to generate the gross revenue numbers. Operating expenses are then subtracted from this, with taxes and interest on loans to determine the net profit of the company (Tracey & Hinkin, 2008). Allen, Bryant and Vardaman (2010) emphasized that operating costs and operating expenses are different variable. The operating expenses refer to the specific costs after gross revenue is defined in the income statement. These include the rent, sales and marketing costs, administrative costs, payroll and office expenses, expenses are part of overall costs. Costs include expenses, plus COGS. Failing to understand this distinction could lead to misreading reports and not having a true picture of your company's financial health. The operating costs consist of a mixture of fixed and variable costs. Fixed costs are costs that don't change regularly, whereas variable costs do. Fixed costs include lease payments, while variable costs include payroll, utilities and even raw

materials (Tracey & Hinkin, 2008; Long, Perumal & Ajagbe, 2012).

### Theoretical Framework

#### Blau's Theory of Heterogeneity.

Blau, (1977) argued in his theory of heterogeneity that firms with different levels of cultural diversity experience dissimilar dynamics and organizational outcomes. Within culturally homogeneous groups, members will tend to communicate with one another more often and in a greater variety of ways resulting in in-group attachments and shared perceptions. This enhances group cohesion and subsequent organizational outcomes. An important but ignored topic of study in the research on group diversity is the basis for work group formation. According to (Blau, 1977), many organizational groups, such as functional departments, may be experiencing greater gender and culture diversity as the increasing diversity of the workforce brings a more diverse set of workers to organizations. However, the inflow of diverse workers does not necessarily mean that all organizational groups will assemble in a diverse way. Blau's, (1977) discussion of group heterogeneity and social structure may be instructive. On the one hand, Blau asserts that similarities on one nominal parameter (e.g., race) will promote social associations. On the other hand, he maintains that people will associate not only with members of their own groups but also with members of other groups. This theory is applicable to the research because organizations consist of different group and classes of people coming together to achieve an objective and also the importance of communication amongst team members who are employees cannot be overemphasized as individual interest differs.

#### Empirical Review of Studies on Age and Gender Workforce Diversity.

According to the findings of the research study by Adler (2015) on the effects of diverse recruitment policies on employee performance, discovered that diversity can improve performance and recruiting from a wider range of age and ethnicity gives the firm a larger talent pool. Adler (2015) also found out that increasing diversity expands the breadth of perspectives and ideas available to organizations in making decisions and that cultural diversity, educational, individual personalities and professional background can influence the range and depth of information use. In another empirical study by the Runnymede Trust (2000) titled 'Survey on racial equality', it was discovered that managers explained their equal opportunities policy differently from employee views about what happened in practice. Creegan et al. (2003) investigated the implementation of a race equality action plan and found a stark difference between paper and practice. Gupta (2013) in his study found out that high levels of gender diversity are a source of competitive advantage. He further pointed that a well-balanced gender composition of employees may help create synergy leading to positive organization outcomes. Gupta (2013) in his findings reported that gender diversity is associated

with resources that can provide a firm with a sustained competitive advantage. These resources include market insight, creativity, innovation and improved problem solving capabilities. Maxwell et al, (2015) Men's and Women's differences may provide insights into the different needs of male and female customers. Researchers have further argued that men and women may also have different cognitive abilities. A combination of different cognitive abilities in a gender diverse team may enhance overall team cohesion, creativity, and innovation leading to improved organizational performance. Gellner and Veen, (2014) found that age heterogeneity on its own has a negative effect on individual productivity. Moreover, in the case of routine tasks, there are no substantial gains from age heterogeneity that could offset the increasing costs resulting from greater age heterogeneity. Thus, in companies with routine types of work, increasing age heterogeneity overall leads to a decline in productivity. The researchers also stated the western findings suggested that the older and younger employees must come together to form coherent and viable corporate culture. Winnie (2008) in her study result showed that different age groups provide different values for companies and these values can complement each other which improve companies' performance negative predictions. (Konrad, 2003; Maurer & Rafuse, 2001).

#### Gaps in Literature.

The resource-based view of the firm (Barney & Clark 2007; Yang & Konrad 2013) suggests that there is a positive relation between diversity & performance, whereas social identity theory (Tajfel and Turner, (1986) suggests a negative diversity-performance relationship. Gender-based inequities in organizations are reinforced and justified by stereotypes and biases that describe positive characteristics and therefore a higher status to the males (Leonard and Levine, 2003; Kossek, Lobel, and Brown (2015) states only 54% of Working age women are in the workforce worldwide compared to 80% of men. Furthermore, women continue to have the upper hand on the "invisible care" economy, which relates to care giving and domestic work. From the web search on workforce diversity, it was discovered that only very few researches on workforce diversity and its relative effect have been conducted in Africa precisely Nigeria. Some that exist, focused more on diversity effect on employee performance or productivity, not so much have been done to inspect the relationship and effect of workforce diversity and organizational performance. Few of such studies that exist, have failed to deliver detailed examination of on workforce diversity. Therefore, this study seeks to add to already existing literature on workforce diversity by examining empirically and theoretically concept of workforce diversity in terms of age and gender as its relationship with organizational performance (effectiveness and efficiency).

#### Research method.

This research study adopted the Survey Research Method to explore Employee diversity and its influence on employment coefficient of Nigeria's multinational

Food companies. The survey method involved the use of structured questionnaire (Appendix A), which was designed to obtain data from respondents on their perception of Employee diversity and its influence on employment coefficient of Nigeria's multinational corporations. This research study adopted the descriptive research design. The instrument used for gathering data was designed and is subjected to a validity and reliability test (Cresswell, 2009). The target population for this study is the employees of multinational corporations in Nigeria, which helped to determine the sample frame and sample size. The procedure for data collection was done with the aid of a research instrument, which was designed from existing instruments. When the data is collected and

collated, it was analyzed using frequencies, inter-item correlation, correlation and regression tools with the aid of Statistical Package for Social Sciences (SPSS). The study population cuts across all levels of employees in the multinational Food companies. The study selected five multinational corporations in the South west that are homogenous in nature and are listed on the Nigerian Stock Exchange. The hierarchical structure of the study population is made up of three tiers, which include Top, Middle and Low level employees. The characteristic of the study population was mixed at every level of the multinationals irrespective of gender, age, marital status, number of dependents, highest educational qualification, job status and years worked in the corporation.

**Table 1.** List of the selected multinational firms in the South West, Nigeria

S/N	COMPANY	LOCATION	CEO	EXECUTIVE DIRECTORS	OFFICERS	NO. OF SAMPLES FOR EACH COMPANY
1	PZ Cussons Plc	South West	1	12	4,961	75
2	Unilever Plc.	South West	1	8	944	75
3	Cadbury Plc	South West	1	6	727	75
4	Nestle Plc	South West	1	9	2,325	75
5	GlaxoSmithKline Plc	South West	1	7	419	75
	<b>TOTAL</b>		<b>5</b>	<b>45</b>	<b>9,376</b>	<b>375</b>

Source: Researchers Compilation, (2019).

Table 1 shows the five (5) selected multinational Food firms in south west Nigeria, with their number of employees, As shown in their annual reports as at 2016, the total number of the employees were 9,367, which was used as the total population for the study. The companies include. PZ Cussons, Unilever Plc, Cadbury, Nestle and GlaxoSmithKline Plc. The basis for considering the multinational Food firms in the South West is based on the fact that most multinational Food firms have their headquarters and Plants located in Lagos and Ogun State.

1. They are quoted on the floor of the Nigerian stock exchange.

2. Have existed for a minimum of 10 years.

3. Posted annual balance sheet of two billion and above.

4. Involved in nationwide physical distribution of products.

5. They have presence in all the six geographical zones of Nigeria.

6. The organizations are similar in technology they employ

7. The organizations are autonomous; self – contained entity.

The sample size for this study was determined using a software called MaCorr Sample Size Calculator. The calculator consisted of fields that allowed input of population size and level of significance. The sample size was determined with 9,367 employees using 95% as the confidence level, which meant we were 95% certain that the sample is real and repeatable. Below is a pictorial representation of MaCorr Sample Size Calculator in operation.

**Determine Sample Size**

Confidence Level: 95% ▾ ?

Confidence Interval: 5 (%) ?

Population: 9367 ?

Calculate Clear

**Sample Size:** 369 ?

**Fig. 1.** Maccor Sample Size Calculator (Step 1)

Source: www.macorr.com

**Find Confidence Interval**

Confidence Level: 95% ▾

Sample Size: 369

Population: 9367

Percentage: 50 (%) ?

Calculate Clear

**Confidence Interval:** 5 (%)

**Fig. 2.** Maccor Sample Size Calculator (Step 2)

From fig. 1 and fig. 2, 5% or 0.05 confidence level was selected with 5 entered at the confidence interval space, while the population size (9,367) was entered in the population cell. When the "calculate" button was clicked, the sample size figure was generated at as shown in fig. 2. The sample size for this is 369 and represents the number of respondents across the multinational corporations to which copies of questionnaire will be administered. The use of the software was justified by professionals in various industries as stated in the website (<http://www.macorr.com>) from where the software was downloaded. The 60 professionals had made use of the software and it yielded their results. A comparison of results from the MaCorr Sample Size Calculator with those from conventional formulas, such as Yard and Yamane's formulas, showed no marked difference. The sample size of 369 employees will be spread among the 5 selected multinationals companies in Nigeria and respondents were selected randomly to give all the companies equal opportunities of being studied. The sample size for this study was determined using the Yamane's sample size formula. Giving the population of 9,367, a 95% confidence level and P = 5% the equation is thus presented as:

$$n = \frac{N}{1 + N(e)^2}$$

Where  $n$  is the sample size,  $N$  is the population size, and "e" is the level of precision. The computed sample size therefore, using Yamane's formula was:

$$\begin{aligned} \text{If } n &= \text{Sample Size} \\ N &= 9,367 \text{ Employees} \\ e &= 5\% \text{ or } 0.05 \\ \text{CL} &= 95\% \\ \text{Therefore, } n &= 9,367 \\ &1 + 9,367(0.05)^2 \\ &2 \\ n &= 374.70 \\ n &\sim \mathbf{380 \text{ Employees}} \end{aligned}$$

Approximately 380 employees were calculated as the sample size using the Yamane's sample size formula. This

meant that averagely 70 copies of the questionnaire were administered in each of the multinational corporations. Simple random sampling method was used in the selection of 369 multinational corporations' employees in Nigeria. Simple random sampling was adopted because of the homogeneous characteristics of the study population, that is, non-managerial employees (Top, middle and lower level employees) of 5 multinational firms in Nigeria. Also, each element of the population had an equal chance of being selected and represented. The selection of employees from the multinational firm was based on the adoption of stratified random sampling technique, which is attributed to (Maguire, 2005). For the purpose of this research project, the face validity approach was adopted where by three Faculty Professors examined the questionnaire, make relevant corrections which was implemented based on the belief that the instrument is appropriate. Towards this end, the test re-test reliability approach was adopted for the research. Reliability was ensured by test re-test. Content analysis was used to identify similar patterns in respondents' responses to the open-ended questions. Statistical analysis, on the other hand enabled the researcher to calculate correlation, partial correlation, multiple regression, hierarchical multiple regression and one-way analysis of Variance (ANOVA), which was used in testing the two stated hypotheses.

#### Data presentation, analysis, interpretation and discussion of findings

##### Data presentation.

The research questionnaire was administered to three hundred and seventy-five (375) employees which is the sample size representing the chosen study population of the 5 selected multinational food industry in Southwest Nigeria. Of this lot, three hundred (300) questionnaires representing 80% were returned, and seventy-five (75) questionnaires representing 20% were not returned. The table below shows the details at a glance.

**Table 2.** Analysis of Response Rate

Questionnaire	Respondents	Percentage (%)
Returned	300	80
Not Returned	75	20
<b>Total Distributed</b>	<b>375</b>	<b>100</b>

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

**Table 3.** Frequency Distribution of the Respondents' Demographic Characteristics

Characteristics	Category	Frequency	Percentage	Cumulative percent
Sex	Male	189	63	63
	Female	111	37	100
Marital Status	Single	84	28	28
	Married	146	48.7	76.7
	Others	70	23.3	100
Work Experience	1-5 yrs	136	45.3	45.3
	6-10 yrs	99	33	78.3
	11-15 yrs	45	15	93.3
	Over 15 yrs	20	6.7	100

The end **Table 3**

Management category	Lower level	71	23.7	23.7
	Middle level	180	60	83.7
	Top level	49	16.3	100
Educational Qualification	SSCE	57	19	19
	HND/BSc	196	65.3	84.3
	MSc/MBA	36	12	96.3
	Others	11	3.6	100
Age	21-30	146	48.7	48.7
	31-40	95	31.7	80.3
	41-50	26	8.6	89
	Above 50	33	11	100
Multinational Organization	Nestle PLC	50	16.7	16.7
	Stallion group	42	14	30.7
	Cadbury PLC	37	12.3	43
	Unilever PLC	75	25	68
	PZ Cussons PLC	57	19	87
	Others	39	13	100

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

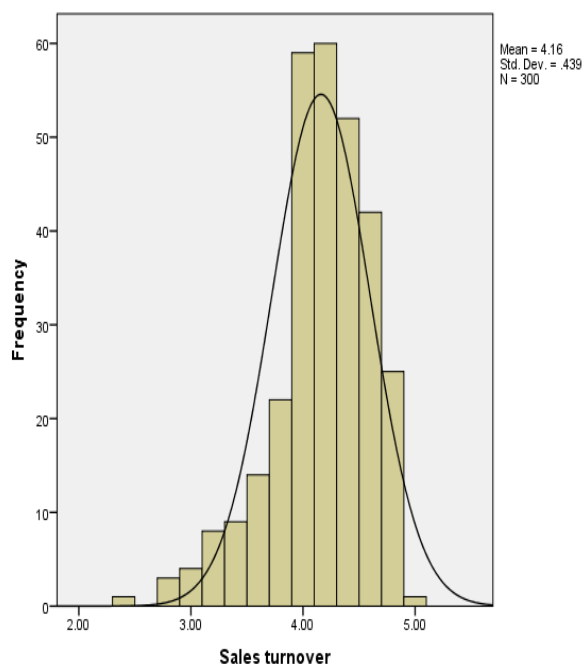
**Table 4.** Descriptive Statistics

Variables	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Age diversity	300	2.80	5.00	4.3147	.46860
Gender diversity	300	2.00	5.00	4.3680	.39972
Cost of operation	300	3.00	5.00	4.3420	.45651
Sales patronage	300	2.40	5.00	4.1600	.43861

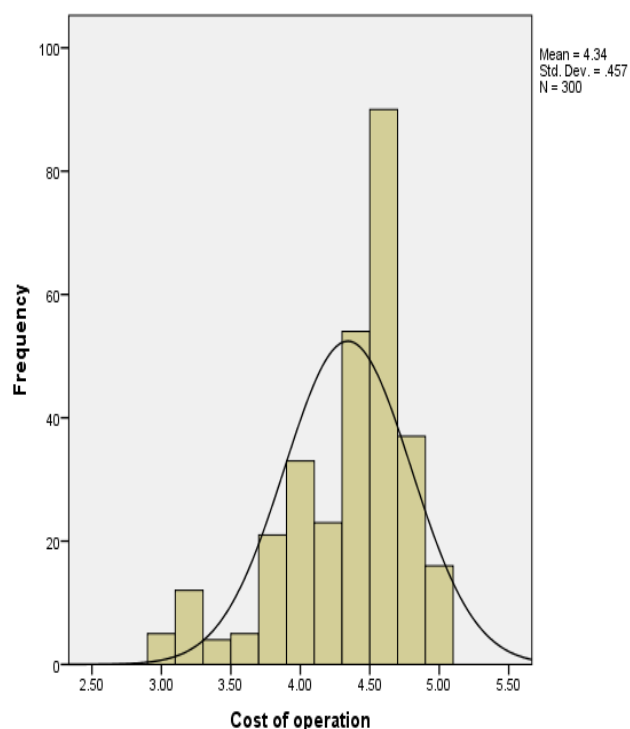
Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

#### Data Analysis Based on Hypotheses.

The hypotheses of the study are: (1) Gender diversity and Age diversity does not significantly affect Sales patronage; (2) there is no significant effect of Gender diversity and Age diversity, on cost of operation. To test these hypotheses and achieve the objectives of the study, multiple regression analysis was used.



**Fig. 3.** Histogram of Perceived Sales patronage Scores  
Source: Author's Fieldwork Computation, 2019



**Fig. 4.** Histogram of Perceived Cost of Operation scores  
Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

#### Test of Multicollinearity.

In the table 5, the highest correlation was 0.484. It shows low multicollinearity problem among Employee Diversity variables (Gender diversity and Age diversity). Therefore, all the variables are retained.

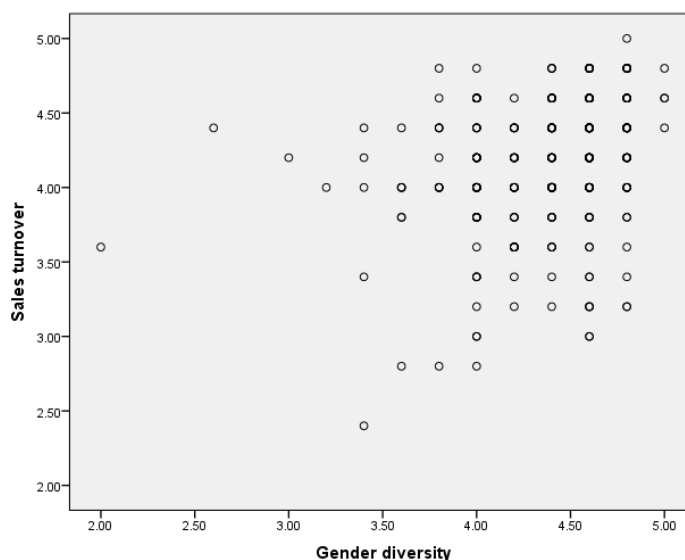
**Table 5.** Correlation among Employee Diversity Variables

Variable		Gender diversity	Age diversity	Cultural Diversity	Work experience
Gender diversity	Pearson Correlation	1	.429**	.337**	.366**
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000
	N	300	300	300	300
Age diversity	Pearson Correlation	.429**	1	.408**	.478**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000
	N	300	300	300	300
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	
	N	300	300	300	300

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

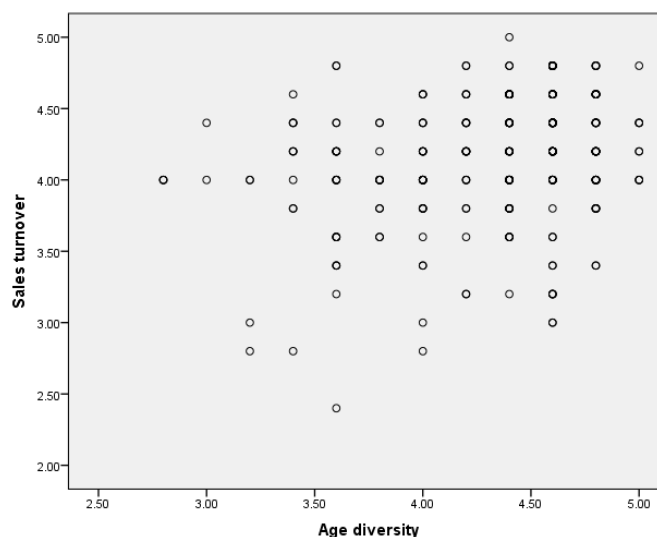
Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

### Test of Homoscedasticity and Linearity for Hypothesis One



**Fig. 5.** Scatter Plot of Perceived Gender diversity and Sales Patronage Scores

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019



**Fig. 6.** Scatter Plot of Perceived Age diversity and Sales Patronage Scores

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

### Test of Hypothesis One.

Ho1: Gender diversity, Age diversity, Cultural diversity and Work experience do not significantly affect Sales turnover. Standard multiple regression was used to explore the effects of Gender diversity, Age diversity,

Cultural diversity and Work experience on Sales Patronage. Preliminary analyses were performed to ensure no violation of the assumptions of normality, Multicollinearity, homoscedasticity and linearity. The result of regression as contained in table 6 ANOVA,

shows that the F-test was 11.065, significant at 5 percent [ $p < .000$ ]. This showed that the model was well specified.

**Table 6. ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	7.504	4	1.876	11.065	.000b
	Residual	50.016	295	.170		
	Total	57.520	299			

a. Dependent Variable: Sales Patronage  
b. Predictors: (Constant), Gender diversity, Age diversity

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

Also, the result of regression as contained in table 7: Model Summary, shows that the R Square gave a large value of 13 per cent. This means that the model (which

includes Gender diversity, Age diversity, Cultural diversity and Work experience) explained about 13 per cent of the variance in perceived Sales Patronage.

**Table 7. Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.361a	.130	.119	.41176

a. Predictors: (Constant), Gender diversity, Age diversity

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

Specifically, the result of regression as contained in table 8 Regression Coefficients, tests the first hypothesis of this study. From the output below, there was positive relationship between perceived Gender diversity and perceived Sales patronage such that a unit increase in Gender diversity scores caused about .198 unit increases in perceived Sales patronage scores which was statistically significant at 5 per cent with the aid of the p value (0.004). Based on the result, the null hypothesis is rejected; thus,

there was positive relationship between Sales patronage and Gender diversity. Also, there was positive relationship between perceived Age diversity and perceived Sales patronage such that a unit rise in perceived Age diversity scores induced about .120-unit increase in perceived sales patronage scores which was statistically not significant at 5 per cent going by the p value (0.54). Based on the result, the null hypothesis is accepted; thus, Sales patronage is not affected by Age diversity.

**Table 8. Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	2.058	.319		6.445	.000
	Gender diversity	.198	.068	.180	2.907	.004
	Age diversity	.120	.062	.128	1.932	.054

a. Dependent Variable: Sales patronage

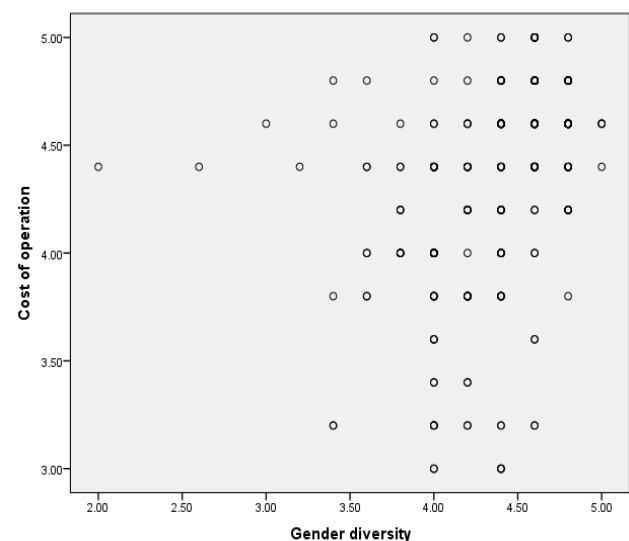
Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

### Test of Homoscedasticity and Linearity for Hypothesis Two.

From the output below, there appears to be a moderate, positive correlation among the variables. Respondents that are highly affected by Gender diversity and Age diversity, On the other hand, firms that are less affected by Gender diversity and Age diversity have high levels of operation cost. There is no indication of a curvilinear relationship (test of linearity) and the scatter plot shows a fairly even cigar shape along its length (test of Homoscedasticity).

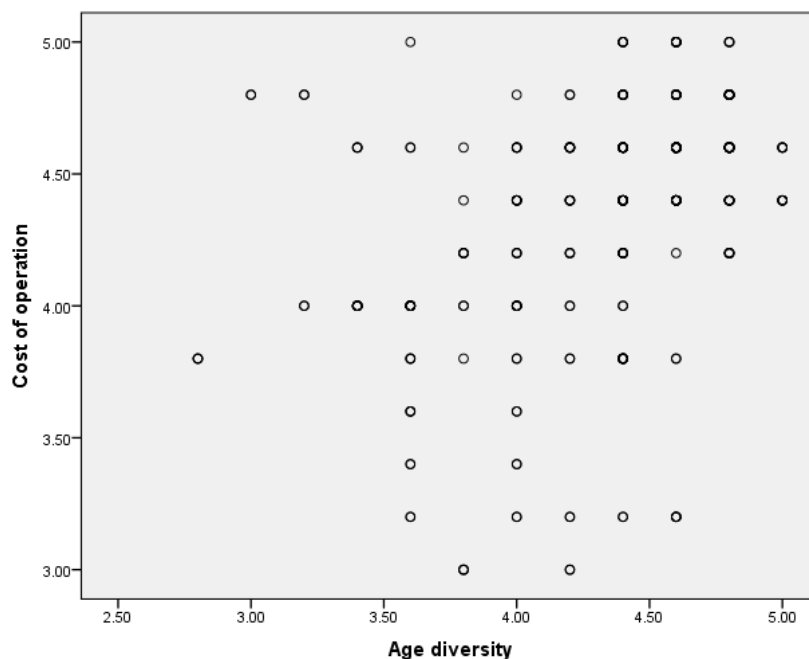
### Test of Hypothesis Two.

Ho2: Gender diversity, Age diversity, Cultural diversity and Work experience do not significantly affect Operation cost. Standard multiple regression was used to explore the effects of Gender diversity, Age diversity, Cultural diversity and Work experience on Operation cost. Preliminary analyses were performed to ensure no violation of the assumptions of normality, Multicollinearity, homoscedasticity and linearity. The result of regression as contained in table 9: ANOVA, shows that the F-test was 31.541, significant at 5 percent [ $p < .000$ ]. This showed that the model was well specified.



**Fig. 7. Scatter Plot of Perceived Gender diversity and Cost of operation Scores**

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019



**Fig. 8.** Scatter Plot of Perceived Age diversity and Cost of operation Scores

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

**Table 9.** ANOVA

Model		Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	18.666	4	4.666	31.541	.000 <sup>b</sup>
	Residual	43.645	295	.148		
	Total	62.311	299			
a. Dependent Variable: Cost of operation						
b. Predictors: (Constant), Gender diversity, Cultural Diversity, Age diversity, Work experience						

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

Also, the result of regression as contained in table 10: Model Summary, shows that the R Square gave a value of 30 per cent. This means that the model (which

includes Gender diversity, Age diversity, Cultural diversity and Work experience) explained about 30 per cent of the variance in perceived Cost of Operation.

**Table 10.** Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.547a	.300	.290	.38464
a. Predictors: (Constant), Gender diversity, Age diversity,				

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

Specifically, the result of regression as contained in table 11 Regression Coefficients, tests the second hypothesis of this study. From the output below, there was positive relationship between perceived Age diversity and perceived operation cost such that a unit increase in Age diversity scores caused about .190 unit increases in perceived operation cost scores which was statistically significant at 5 per cent with the aid of the p value (0.001). Based on the result, the null hypothesis is rejected; thus, operation cost is affected by Age diversity. More importantly, there was positive relationship between perceived cultural diversity and perceived operation cost such that a unit rise in perceived cultural diversity scores induced about .215-unit increase in perceived operation cost scores which was statistically significant at 5 per cent going by the p value (0.000). Based on the result, the null hypothesis is rejected; thus, operation cost is affected by

cultural diversity. In addition, there was positive relationship between perceived work experience and perceived operation cost such that a unit rise in perceived work experience scores induced about .161-unit increase in perceived operation cost scores which is statistically not significant at 5 per cent going by the p value (0.006). Based on the result, the null hypothesis is accepted; thus, operation cost is affected by work experience. Lastly, there was positive relationship between perceived gender diversity and perceived operation cost such that a unit rise in perceived gender diversity scores induced about .184-unit increase in perceived operation cost scores which was statistically significant at 5 per cent going by the p value (0.004). Based on the result, the null hypothesis is rejected; thus, operation cost is affected by gender diversity.

**Table 11.** Coefficients<sup>a</sup>

	Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	1.091	.298		3.657	.000
	Age diversity	.190	.058	.195	3.290	.001
	Gender diversity	.184	.063	.161	2.894	.004

a. Dependent Variable: Cost of operation

Source: Author's Fieldwork Computation, 2019

### Discussion of Findings

The findings of this study have shown a positive relationship between gender diversity and sales patronage such that sales patronage is affected by gender diversity. Gender diversity can be defined as the equitable or fair representation between genders. In conclusion, the findings have shown that gender diversity affected the degree at which sales patronage is achieved and the effectiveness of sales performance in the organization. In other words, this research finding is tangential to past findings of scholars that have discovered that gender diversity has the tendencies to affect sales patronage. The findings of the study further revealed a positive relationship between age diversity and operation cost such that operation cost is affected by age diversity in the organization. From the findings, age diversity affects operation cost of MNCs in Nigeria. In conclusion, the findings are in consonance with previous findings that age diversity has the likelihood to affect operation cost.

### Conclusion

Empirically, the impact of employees' diversity on organizational performance has been authenticated. The implication is that organizations should ensure employees diversity such as gender diversity and age diversity improves the performance of the organization in terms of sales patronage and reduces cost of operation in the organization. Also, the question of how employee diversity affects organizational performance is still being debated till date. Organizations therefore have the final decision on which action to take as regards diversity. For example, some multinational organizations in Nigeria believe in all form of diversity and all the forms can be instrumental to achieving organizational performance. The research concludes that there exists a relationship between employee diversity and organizational performance. The findings conclude that there is a positive relationship between the variables of employee diversity which include gender diversity and age diversity. All the findings of this research are tangential to previous findings of scholars. In conclusion, organizations should ensure that diversity existent in their employees is aimed at improving organizational performance.

### References

1. Afolabi, F. & Aina, O. (2014), "Gender differentials in subjective well-being among religious elderly Yoruba people in Southwest Nigeria", *Ageing International*, No. 39 (2), P. 180–193. DOI: 10.1007/s12126-014-9197-8
2. Ajala, A. O. A and Alonge, K. S. (2013), "Gender Issues in basic education and national development in Nigeria", *Journal of Emerging Trends in Educational Research and Policy Studies (JETERAPS)*, No. 4 (4), P. 644–649.
3. Atta-Asamoah, A. (2012), "Overview of the Nature and Management of Diversity in Africa", *Prepared for the Office of the Special Adviser on Africa (OSAA)*, Institute for Security Studies, Pretoria, South Africa.
4. Adler, N. J. (2015), *Cultural Synergy: Managing the Impact of Cultural Diversity*, London : Sage Publications.
5. Afolabi, O. A. and Omole, E. O. (2011), "Personality Type and Workforce Diversity as Predictors of Ethical Behavior and Job Satisfaction Among Nigerian Policemen", *Current Research Journal of Social Sciences*, No. 3, P. 381–388.
6. Al-Lamki, S. M. (2002), "Orientation: The essential ingredient in cross-cultural management", *International Journal of Management*, Vol. 19, No. 4, P. 568–575.
7. Akinnusi, D. M., Sonubi, O., & Oyewunmi, A. E. (2017), "Fostering Effective Workforce Diversity Management", *International Review of Management and Marketing in Nigerian Organizations: The Challenge of Human Resource Management*, No. 7(2), P. 108–116.
8. Armstrong, M. (2012), *Armstrong's Handbook of Human Resource Management Practice*, 12th ed, London : Kogan.
9. Allen, D. Bryant, P and Vardaman, M (2010), "Retaining Talent: Replacing Misconceptions with Evidence-Based Strategies", *Academy of Management Perspectives*, P. 48–64
10. Blau, P. M. (1977), *Inequality and heterogeneity*, New York : Free Press.
11. Borman, W. C., and Penner, L. A. (2001), "Citizenship performance: Its nature, antecedents, and motives", *In Personality psychology in the workplace*, ed. B. W. Roberts and R. Hogan, Washington, DC : American Psychological Association, P. 45–61.
12. Carrel, M. R, Mann, E. E., Sigler, T. H. (2016), "Defining Workforce Diversity Programs and Practices in Organizations: A Longitudinal Study", *Labor Law Journal*, available at : <https://www.questia.com/library/journal/1P3-1021348691/defining-workforce-diversity-programs-and-practices>
13. CIPD (2014), "Employee Turnover and Retention", *CIPD*, available at : <http://www.cipd.co.uk/hr-resources/factsheets/employee-turnover-retention.aspx>
14. Creswell, J. W. (2009), *Educational research Planning, conducting and evaluating quantitative and qualitative research*, 2nd Ed, Upper Saddle River, N. J : Pearson Education.
15. Childs, J., (2016), "Managing workforce diversity at IBM: A global HR topic that has arrived", *Human Resource. Management*, No. 44 (1), P. 73–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/hrm.20042>

16. Cox, T.H. (2001), "Cultural diversity in organisations: theory, research and practice", *Human Resource Development Review*, San Francisco, CA : Berrett-Koehler, Vol. 7.
17. Danladi, S. S. (2013), "Language policy: Nigeria And the role of English language in the 21st Century", *European Scientific Journal*, No. 9 (17).
18. Daudi, P and Nguyen, K. (2010), "The Ethical Challenge of Multinational Corporations in Inadequate Institutions: The Case of Shell in Nigeria", November 30, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2039786>
19. Ditomasso, N. (2015), "Understanding the Effects of Workforce Diversity on Employment Outcomes: A Multidisciplinary and Comprehensive Framework", *Paper presented at the annual meeting of the American Sociological Association, Hilton San Francisco and Renaissance*, San Francisco, Emerald Group Publishing Limited, *International Journal of Academic Research*, available at : <http://www.allacademic.com>
20. Duncan, C. (2013), "Assessing Ant-Ageism Routes to Older Worker Re-Engagement", *Work Employment And Society*, Vol. 17, No. 1, P. 101–120.
21. Erasmus, L. J. (2016), "The Management of Workforce Diversity and the Implications for Leadership at Financial Asset Services" *Business Management*, University of Johannesburg.
22. Friday, E., & Friday, S. S. (2013), "Managing diversity using a strategic planned change Approach", *Journal of Management Development*, No. 22, P. 863–880.
23. Griffeth, W. and Hom, W. (2001), *Retaining valued employees*, Thousand Oaks, CA : Sage.
24. Gelner, B. & Veen, S., (2013), "Positive Effects of Aging And Age Diversity In Innovative Companies: Large Scale Empirical Evidence on Company Productivity", *Human Resource Management Journal*, Vol. 3, No. 3, P. 279–295.
25. Gellner & Veen. S. (2014), *The Impact of Aging and Age Diversity on Company Performance*.
26. Greenberg, J. (2014), *Workplace Diversity: Benefits, Challenges and Solutions*, Alpha Measure.
27. Gupta, R. (2013), "Workforce Diversity and Organizational Performance", *International Journal of Business Management Invention*, Vol. 2, Issue 61, P. 36–44.
28. Hassan, O. M. (2013), *The Inevitability of Multinational Corporations towards Achieving Sustainable Development in Developing Economies: A Case Study of the Nigerian Economy*, Vol. 2.
29. Harrison, D. A., Price, K. H. & Bell, M. P. (1998), "Beyond relational demography: Time and the effects of surface- and deep-level diversity on work group cohesion", *Academy of Management Journal*, No. 41 (1), P. 96–107.
30. Kochan, T., Bezrukova, K., Ely, R., Jackson, S., Joshi, A., Jehn, K., Leonard, J., Levine, & Thomas (2012), *The Effects of Diversity on Business*.
31. Konrad (2003), "Managing Workforce Diversity in Competitive Environment", *International Journal of Business and Management Invention (IJBMI)*.
32. Long, S., Perumal, P. and Ajagbe, M., (2012), "The Impact of Human Resource Management Practices on Employees", *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*, No. 4 (2), P. 629–641.
33. Maurer, T. J., Wrenn, K. A., Pierce, H. R., Tross, S. A. and Collins, W. C. (2013), *Beliefs about 'improvability' of career-relevant skills: Relevanceto job/task analysis, competency modelling, and learning*.
34. Maxwell, G. A., et al (2015), "Benefits of Workforce Diversity", *International Journal of Business and Management Invention (IJBMI)*.
35. Maxwell, G. A., Blair, S. and McDougall, M. (2015), "Edging towards managing diversity in practice", *Employee Relations*, No. 23 (5), P. 468–482.
36. *Advertising, Patricia Cafferata and Alice Tybout*, eds. Lexington, MA : Lexington Books, 229 p.
37. Meyer and Sternthal (1991), "Gender Differences in the Use of Message Cues and Judgments," *Journal of Marketing Research*, No. 28 (February), P. 84–96.
38. Ndubisi, N. O. (2006), "Effect of gender on customer loyalty: a relationship marketing approach", *Marketing Intelligence and Planning*, No. 24 (1), P. 48–61.
39. Oliver, R. L. (1999), "Whence Consumer Loyalty?", *Journal of Marketing*, No. 63 (Special Issue), P. 33–44.
40. Otiike, W, Messah, B, & Mwaleka, K, (2010), "Effects of Workforce Diversity on Organizational Effectiveness: A Case Study On Kenya Commercial Bank Ltd", *Journal Of Business And Management*.
41. Ozbilgin M., Tatli, A. (2016), *Global diversity management: An evidence-based Approach*, London, England : Palgrave.
42. Ogunyinka, E. K. (2013), "Higher education funding and cost sharing: case study of universities in Nigeria", *Academic Research International*, No. 4 (5).
43. Ojo, G. U. (2012), "Economic diversification and second-tier political conflict: assessing bitumen political ecologies in southwest Nigeria", *Singapore Journal of Tropical Geography*, No. 33 (1), P. 49–62. DOI: 10.1111/j.1467-9493.2012.00447.x
44. Okpanachi, E. (2012), "Ethno-religious Identity and Conflict in Northern Nigeria", available at : <http://www.cetri.be/spip.php?article2470&lang=fr>
45. Porter, M. (1987), "From competitive advantage to corporate strategy", *Harvard Business Review*, May – June, P. 43–59.
46. Pan, Y., & Zinkhan, G. M. (2006), "Determinants of retail patronage: A meta-analytical prospective", *Journal of Retailing*, No. 83 (1), P. 229–243.
47. Price, J. L. (1977), *The Study of Turnover*, Ames, Iowa : Iowa State University Press.
48. Richard, O. C. (2014), "Racial diversity, business strategy and firm performance: A resource based view", *Academy of Management Journal*, No. 43, P. 164–177.
49. Ricardo, R. (2016), "Corporate Performance Management: How to Build A Better Organization Through Measurement Driven Strategies Alignment", *Butterworth Heinemann*.
50. Roberson, M. Q & Park, H. J. (2007), "Examining The Link Between Diversity And Firm Performance: The Effects of Diversity Reputation and Leader Racial Diversity", *Group & Organizational Management*, Vol. 32.
51. Singh, Ramadhar, and Soo, Yan Ho (2000), "Attitudes and Attraction: A New Test of the Attraction, Repulsion and Similarity-Dissimilarity Asymmetry Hypotheses", *British Journal of Social Psychology*, No. 39 (2), P. 197–211.
52. Sungjoo & Rainy, G. (2014), "Managing Diversity In U.S Federal Agencies: Effects of Diversity and Diversity Management On Employee Perceptions Of Organizational Performance", *Public Administration Review*, P. 109–120.

53. Tajfel, H. (1986), *Differentiation between social groups: studies in the social psychology of intergroup relations*, Academic Press, New York.
54. Thomas, D. A. & Eli, R. J. (2014), "Making differences matter: A new paradigm for managing diversity", *Harvard Business Review*, September-October, P. 77–90.
55. Torrington, D., Hall, L., and Taylor, S. (2015), *Human Resource Management*, Sixth Edition, London : Pearson education Ltd.
56. Taylor, S. (2002), *The Employee Retention Handbook*, London : CIPD.
57. Zheng, C., Hyland, P., & Soosay, C. (2013), "Training practices of multinational companies in Asia", *Journal of European Industrial Training*, Vol. 31, Issue 6, P. 472–494.

Received 02.03.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Kowo Solomon Akpoviro** – PhD (Business Administration), National Open University of Nigeria, Course Facilitator of the Department of Business Administration, Lagos, Nigeria; email: kowosolomon@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0504-2248>.

**Kadiri Ismaila Bolarinwa** – PhD (Business Administration), University of Ilorin, Reader (Associate Professor) of Industrial Relations and Personnel Management, Ilorin, Nigeria; email: bolakadiri@yahoo.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-4833>.

**Zekeri Abu** – PhD (Business Administration), Assistant Professor, Kwara State University, Department of Business and Entrepreneurship, Malete, Nigeria; email: solokingng@yahoo.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0567-4432>.

## ВПЛИВ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ СПІВРОБІТНИКІВ НА ОРГАНІЗАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ОКРЕМИХ БАГАТОНАЦІОНАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В ПІВДЕННО-ЗАХІДНІЙ НІГЕРІЇ

**Предмет дослідження:** Диверсифікація потужно впливає на термінологію і практику в усьому світі. Диверсифікація співробітників включає в себе широкий спектр відмінностей, включаючи вік, стать, культуру, досвід роботи, батьківський статус, освіту, географічне положення і багато іншого. **Мета:** вивчити вплив гендерної диверсифікації на заступництво продажу багатонаціональних підприємств харчової промисловості, а також визначити вплив вікової диверсифікації на операційні витрати багатонаціональних підприємств. **Завдання:** Оптимальний результат цього дослідження – принести користь багатонаціональній харчовій промисловості в Нігерії, підтримуючи вище керівництво і працівників з різних верств суспільства, які можуть знайти інформацію в цьому дослідженні корисною для доступу до значення різноманітності робочої сили в їх організації. **Методи:** для дослідження були поставлені два дослідних питання і сформульовані дві гіпотези відповідно до поставлених завдань. У статті прийнятий описовий дизайн дослідження. Використовувалася проста випадкова вибірка. Всього в дослідженні взяли участь 9376 співробітників багатонаціональних продовольчих компаній Південно-Західної Нігерії. У дослідженні використовувалося визначення розміру вибірки Макорра. Анкета для дослідження була розіслана трьомстам сімдесяти п'яти (375) співробітникам, що було розміром вибірки, що представляє обрану досліджувану популяцію із 5 відібраних з багатонаціональної харчової промисловості в Південно-Західній Нігерії. У дослідженні використовувалися такі статистичні інструменти, як ієрархічний регресійний аналіз при перевірці гіпотез, перехресні таблиці, межелементний кореляційний тест і ANOVA, які допомагали в інтерпретації результатів. **Результати:** дослідження показало, що існує позитивний зв'язок між гендерною різноманітністю і патронажем продажів, так що на патронаж продажів впливає гендерна різноманітність. Результати дослідження також виявили позитивний зв'язок між віковою різноманітністю і операційними витратами, так що операційні витрати залежать від вікової різноманітності в організації. **Висновки:** в дослідженні робиться висновок про існування взаємозв'язку між різноманітністю співробітників і ефективністю роботи організації, і організації повинні забезпечити, щоб диверсифікація була спрямована на підвищення ефективності роботи організації. У дослідженні рекомендується, щоб багатонаціональна харчова промисловість не тільки забезпечувала різноманітність співробітників в своєму бізнесі, а й забезпечувала використання диверсифікації для підвищення ефективності роботи організації. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на інших секторах і не обмежуватися секторами продуктів харчування, напоїв і конгломератів економіки Нігерії.

**Ключові слова:** диверсифікація співробітників; організаційні показники; гендерна різноманітність; вікова різноманітність; МНК.

## ВЛИЯНИЕ ДИВЕРСИФИКАЦИИ СОТРУДНИКОВ НА ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОТДЕЛЬНЫХ МНОГОНАЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ НИГЕРИИ

**Предмет исследования:** Диверсификация оказывает мощное влияние на терминологию и практику во всем мире. Диверсификация сотрудников включает в себя широкий спектр различий, включая возраст, пол, культуру, опыт работы, родительский статус, образование, географическое положение и многое другое. **Цель:** изучить влияние гендерной диверсификации на покровительство продажам многонациональных предприятий пищевой промышленности, а также определить влияние возрастной диверсификации на операционные издержки многонациональных предприятий. **Задачи:** Оптимальный результат этого исследования - принести пользу многонациональной пищевой промышленности в Нигерии, поддерживая высшее руководство и работников из разных слоев общества, которые могут найти информацию в этом исследовании полезной для доступа к значению разнообразия рабочей силы в их организации. **Методы:** для исследования были поставлены два исследовательских вопроса и сформулированы две гипотезы в соответствии с поставленными задачами. В статье принят описательный дизайн исследования. Использовалась простая случайная выборка. Всего в

исследовании приняли участие 9376 сотрудников многонациональных продовольственных компаний Юго-Западной Нигерии. В исследовании использовалось определение размера выборки Макорра. Анкета для исследования была разослана тремстам семидесяти пяти (375) сотрудникам, что было размером выборки, представляющей выбранную исследуемую популяцию из 5 отобранных многонациональной пищевой промышленности в Юго-Западной Нигерии. В исследовании использовались такие статистические инструменты, как иерархический регрессионный анализ при проверке гипотез, перекрестные таблицы, межэлементный корреляционный тест и ANOVA, которые помогали в интерпретации результатов. **Результаты:** исследование показало, что существует положительная связь между гендерным разнообразием и патронажем продаж, так что на патронаж продаж влияет гендерное разнообразие. Результаты исследования также выявили положительную связь между возрастным разнообразием и операционными издержками, так что операционные издержки зависят от возрастного разнообразия в организации. **Выводы:** в исследовании делается вывод о существовании взаимосвязи между разнообразием сотрудников и эффективностью работы организации, и организации должны обеспечить, чтобы диверсификация была направлена на повышение эффективности работы организации. В исследовании рекомендуется, чтобы многонациональная пищевая промышленность не только обеспечивала разнообразие сотрудников в своем бизнесе, но и обеспечивала использование диверсификации для повышения эффективности работы организации. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на других секторах и не ограничиваться секторами продуктов питания, напитков и конгломератов экономики Нигерии.

**Ключевые слова:** диверсификация сотрудников; организационные показатели; гендерное разнообразие; возрастное разнообразие; МНК.

*Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Ково С. А., Кадірі І. Б., Зекері А. Вплив диверсифікації співробітників на організаційні показники окремих багатонаціональних підприємств харчової промисловості в Південно-Західній Нігерії. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 44–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.044>.

Kowo, S. A., Kadiri, I. B., Zekeri, A. (2020), "Impact of Employees Diversity on Organizational Performance of Selected Multinational Food Producing Industry in South-West Nigeria", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 44–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.044>.

---

UDC 005.8

DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.059>

V. PITERSKA, O. LOHINOV, L. LOHINOVA

## CONCEPTUAL MODEL OF PROJECT-ORIENTED MANAGEMENT OF EDUCATIONAL ACTIVITIES OF HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

The **subject matter** of the article is the methods, models and mechanisms of project-oriented management of the educational activities of higher education institutions. The **goal** of the work is to develop a conceptual model for managing the educational activities of higher education institutions on the basis of a project-oriented approach. The following **tasks** were solved in the article: analysis of the educational activity management model of higher education institutions, the study of modern methods of managing university educational projects portfolios, the development of a mechanism for the formation of a conceptual model of project-oriented management of educational activities of higher education institutions. The following **methods** are used – project and portfolio management methods, systems theory and systems analysis, risk management methods. The following **results** were obtained – the main stages of the life cycle, their products and the mission of the project "Introductory Campaign of Higher Education Institutions" were identified, the concept of "educational product", "product of an educational project", "educational project", "educational activity project" was defined, a model for determining introductory campaign project values and effectiveness, a conceptual model of project-oriented management of educational activities of higher education institutions has been developed taking into account the value of the project "Introductory Campaign of Higher Education Institutions". **Conclusions:** ensuring the effectiveness of the implementation of the project approach in the ongoing activities of higher education institutions should be based on a clear identification of the attributes of these projects, including products, values and effectiveness, which will allow not only to clearly understand the result of project activities, but also to control its receipt. The implementation of the concept of project-oriented institutions of higher education will increase the efficiency of the current activities of universities and their development by using the advantages of project management technologies. The definition "Mission of the project "Introductory Campaign of Higher Education Institutions" is proposed, which is understood as the achievement of the maximum possible enrollment of students in the current conditions on the educational services market. The value of the "Introductory Campaign of the Higher Education Institution" project has been established, which determines the usefulness of the project product for stakeholders. The proposed conceptual model of a project-oriented approach to the management of educational activities of higher education institutions will allow to extend the project approach to the development and functioning of various blocks of the university's activities based on the introduced concept of "product portfolio of higher education institutions". Such an approach in the future will make it possible to clearly identify the totality of university projects as part of educational activities and turn its current activities into a portfolio of projects.

**Keywords:** educational project; institution of higher education; project-oriented management; product of an educational project; value.

### Introduction

The concept of project management has successfully proven itself in various fields of activity. Taking into account that higher education institutions must meet the strict requirements set by the educational services market and the labor market, one of the ways to achieve high results of higher education institutions and better adapt them to the dynamics and turbulence of the external environment is to use the project management methodology to implement changes of any nature [1, 2]. Most research related to project-oriented institutions of higher education, aimed at using project methodology and appropriate tools for the development of universities, as well as to consider specific projects, for example, related to the introduction of new technologies (distance learning), ensuring the quality of education, etc. [3, 4].

Ensuring effective implementation of the project approach in the day-to-day activities of the higher education institution should be based on a clear identification of the attributes of these projects, including products, values and performance, which will allow not only to clearly understand the result of the project activity, but also to control its receipt.

### Analysis of recent research and publications

Note that according to the theory of systems, any

object can be in one of two States: functioning or development [5-8]. Therefore, any of the activities of higher education institutions can be considered in two modes—a functioning object and a developing object. Therefore, projects can be linked to two States of the respective activities:

- development of any type of activity (or their combination), which determines the corresponding project (program, portfolio) for the development of higher education institutions;

- functioning of the University in each area of activity, presented in the form of projects within the project-oriented approach, which is typical for project-oriented management (for example, the allocation of a group of students enrolled in the program of specialization – "educational program", can be an example of such a project in the framework of educational activities) [9-12].

In [13, 14] it is stated that higher level of project-oriented management is to carry out management activity in higher education institution in the form of projects, clearly defining terms, project success rates, project resources and budget, managing risks and quality. In this case, the project management is combined as a complex of works and the project management of the university as a management activity in the project format.

In [15-18] it is stated that project-oriented management implies managing not the enterprise as such, but its project portfolio, with all activities being broken

down into programs aimed at achieving the specific goals of the enterprise, and separate projects are already carried out within the programs.

Projects form the corresponding portfolio of higher education institutions, which can be represented as the following combination of portfolios [19, 20]:

- the portfolio of development projects;
- the portfolio of current activities;
- student's project portfolio.

Thus, to date, the theoretical basis for the organization of a project-oriented institution of higher education is presented only in a fragmentary way and practically does not cover the basic - educational activities of universities, which determines the relevance of addressing this issue.

The dissemination of the project management concept in the activity of a higher education institution can be carried out in various aspects, covering all types of activities, and above all, the basic – educational, which will allow to use the rich experience of development in the field of project management to improve the functioning and development of a higher education institution.

**The purpose of this article** is to develop a conceptual model for managing the educational activities of higher education institutions based on a project-oriented approach.

#### **Presentation of the main material**

Despite the fact that projects that correspond to the current activity of the higher education institution aimed at improving the efficiency of the university, the implementation of a project-oriented approach is part of the strategic development and, therefore, aimed at improving the competitiveness of the higher education institution.

According to the authors [21, 22] competitiveness is a general indicator of the viability of an enterprise, its ability to effectively use its financial, production, scientific, technical and labor potential. The competitiveness of a higher education institution means its ability to prepare competitive professionals in the internal and external labor markets, to create competitive innovations and to pursue a successful policy in each area of its activity; the mechanism of competitor-management includes the mission and connection of higher education institution with the external environment, application of tools of innovative economy, methods, principles and functions of management [23, 24]. The competitiveness of a university is its ability to train professionals who can withstand competition in a specific external or internal labor market; develop competitive innovations in their field; conduct effective reproductive policies in all areas of its activities [25-27].

According to most experts, the main factors of competitiveness of the institution of higher education are: the image of the university, the price of educational services, the quality of educational services, their range and the quality of providing processes. By analogy with manufacturing and commercial enterprises, the cost of

services should be added to this list. The formation of the effect of implementing a project-oriented approach to enhance the attractiveness of the university - its image - is mediated by improving the quality of services and efficiency of management. In this case, the effectiveness of management has a direct impact on competitiveness, for example, by reducing costs [28]. It implies that the time spent by the staff of a higher education institution to carry out activities as a project in the proper organization of management processes will be less than in the functional (traditional) approach. Therefore, the total cost of paying for the work, including the hourly rate, will be lower; and employees' time off can be spent on other projects [29]. Similarly, with the quality of educational services. Their high level ensures the attractiveness of higher education institutions, while directly affecting the competitiveness.

We formulate the main provisions of the concept of a project-oriented institution of higher education, which include:

- decomposition of university activities;
- the selection of projects that fall into two categories - projects related to the development of a higher education institution or its separate areas of activity; projects that are relevant to the current activity (project-oriented approach to production activity management);
- classification of the main types of university projects in content; hierarchy of portfolios of higher education institution projects;
- structural and logical scheme of effect formation from implementation of project-oriented approach to university management.

The implementation of the concept of a project-oriented institution of higher education will increase the efficiency of the current activities of universities and their development, by taking advantage of the technologies of project management. Proper organization of project-oriented management provides, above all, adequate structuring of the management object. Therefore, the next step in the development of the concept of creating a project-oriented institution of higher education in the main – educational activities, is the identification of relevant projects.

It should also be noted that under the Law on Higher Education, the number of specialties has been reduced, but universities are given the freedom to be creative in developing educational programs that allow them to respond more flexibly to changing demand in the educational services market [30]. Distance learning becomes an integral element of educational activity, gradually replacing the distance learning and supplementing the in-service, as well as allowing to obtain education at anytime, anywhere [31].

Thus, in the framework of educational activities of higher education institutions, a "flow" of projects is formed. Projects of each category for a particular institution of higher education form a specific portfolio, which is a logically isolated part of the university's project portfolio. Taking into account the individual part (variant part) in each educational program for each student forms his project – "Individual educational program of the

student", managed by the respective administrative body - the dean, the administration of the institute (within the university) with the participation of the student (in the formation part) variable part, work schedule) [32]. In turn, each educational program generates two projects – development and licensing, training. These projects are managed by an appropriate team, whose participants are without fail the so-called project team leader and the teaching staff that serves the program. If the project "Individual Student Educational Program" is of a largely organizational nature, then the licensing and training projects are related, to a greater extent, to the content of the training and the process of providing the educational service. This explains the different composition of the entities that manage these projects.

Note that one of the basic concepts of project management is "project product". In this case, "educational product" and "product of educational project" are different concepts. An educational product is a product, the essence of which is a set of educational services corresponding to that product. The result of consuming educational services is a set of competencies, knowledge, skills and competences acquired by the university graduates. Therefore, it can be argued that the specific set of individual acquired competencies, knowledge, skills and skills is the product of an educational project. "Educational project" and "educational product" are not identical concepts. The educational project corresponds directly to the learning process, and the project within the educational activity is any project related to educational services. Yes, the Educational Program Development and Licensing project is not an educational project, but is related to the provision of educational services.

Development of educational activities of higher education institutions involves changes in the set of specialties, specializations, educational programs, educational levels, forms of training, ie changes in the product portfolio; increasing the number of students in existing educational products. The implementation of a project-oriented approach to the management of higher education institutions, including educational activities, requires appropriate tools for organizing the implementation of works on various projects throughout the university, including their distribution and coordination. In this case, each unit can participate in several projects – both development and ongoing activities. The absence of this toolkit will not provide the effect of implementing a project-oriented approach and may, moreover, make it negative, that is, lead to worse results than in the traditional management of a higher education institution.

The main issues that require coordination are: terms, resources, "products" of each project work. It is known that any project can be decomposed at the level of work (tasks), the logical sequence of which forms a network model. Network Planning is a traditional project management tool that allows you to schedule deadlines in resource constraints.

According to the proposed concept, in a project-oriented approach, the task is a structural unit of logical

consistency (network model), not a separate event with unreasonable (in most cases in practice) terms and poorly structured interrelation with other tasks. In this case, employees of the unit do not just perform a set of operations in the form of a clearly structured process, but have a specific purpose, timing, interconnection for each of them, which, of course, has a positive impact on the quality of the tasks and provides greater likelihood of achieving project goals. Having a clearly defined goal and performance (value) indicators will allow you to evaluate the success of the project as a whole, rather than performing a specific task. For example, for the Admissions Office, many tasks are created related to projects within the portfolio of a higher education institution, both development projects and projects that correspond to the current activity.

Let's consider the product, value and effectiveness of the project "Entrance campaign" as one of the most important projects for higher education institutions. This project can be considered in several ways that differ in the scope of educational activities:

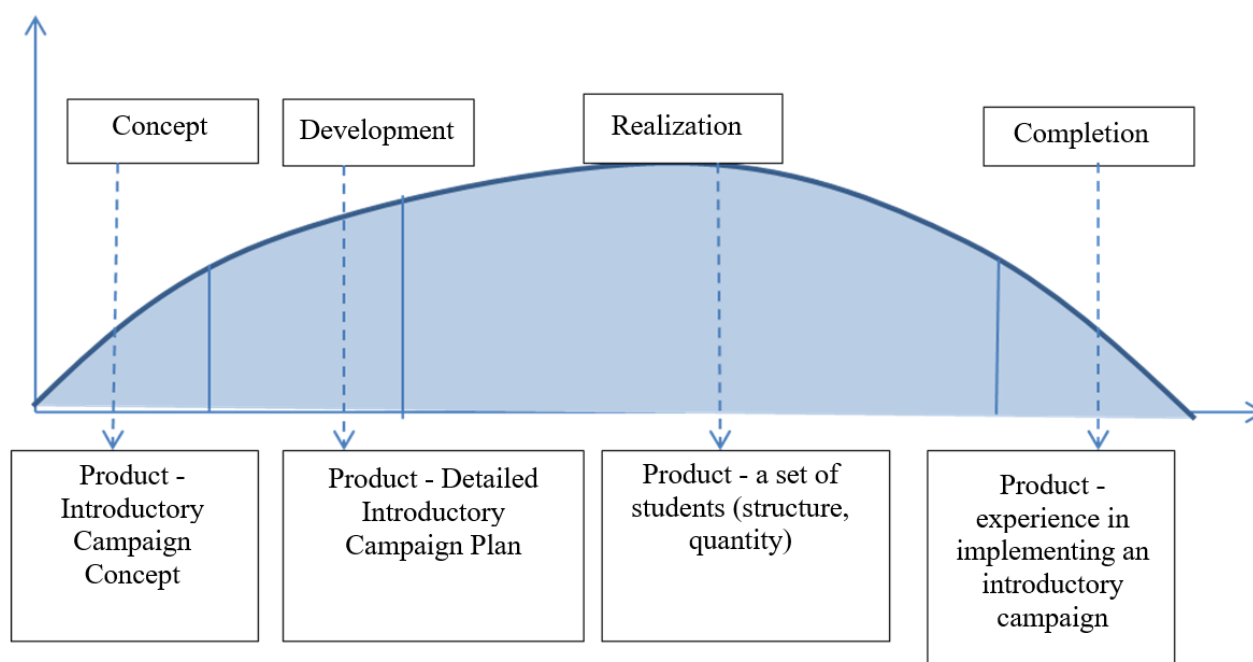
- recruitment of students by a higher education institution in General for the entire product portfolio-the project "University entrance campaign";
- recruitment of students for a specific educational product.

In this case, we will be talking about the project "Introductory Education Product Campaign"; enrollment of students by a certain faculty, institute – project "Introductory campaign of the faculty (institute, etc.)". Therefore, following a project-oriented approach, an institution of higher education can also be considered an introductory campaign.

Note that this event - an introductory campaign - has all the necessary properties of the project: is a temporary event, has a unique product, provides for consistent development. Indeed, the inaugural campaign has clear timeframes of one year. The product of the introductory campaign is a set of students for the specialties, educational programs and forms of study (depending on the scope of the project).

The uniqueness of the product – the recruitment of students – is that it is formed each time in new environmental conditions – the market of educational services, and also provides annually a new ratio of "budget contract" for each specialty. And, as practice shows, the structure of the recruitment of students in specialties and forms of study over the past few years has varied greatly. It is expected that this trend will continue in the near future, which is determined by the dynamics of markets, the country's economy, the world economy and the fierce competition of higher education institutions.

A specific product is formed not only as a result of the project implementation, but also as a result of the completion of each stage of the project life cycle. We identify the main stages of the life cycle and their products for the project "Introductory Campaign of Higher Education" (fig. 1).



**Fig. 1.** Life cycle of the project "Introductory Campaign of Higher Education Institutions"

At the "Concept" stage, the conceptual framework of the introductory campaign is developed, taking into account the experience of the past periods, the possibilities of the higher education institution and the state of the environment. It is at this stage that the project "Introductory Campaign of Higher Education" acquires its distinctive features (uniqueness) in comparison with the previous projects in this area.

At the stage of "Development" in accordance with the adopted concept is formed plan of the introductory campaign, within which must be formulated all activities, deadlines, responsible contractors, as well as determine the budget of the project.

"Implementation" involves the implementation of work in accordance with the plan and those adjustments that are necessary taking into account the features of the current situation. "Completion" is a short but important stage in which to analyze the success of an introductory campaign, with the main criterion being the effectiveness, that is, the compliance of the results achieved with the planned.

Summarizing the introductory campaign allows you to supplement the knowledge base in the field in the light of new experience. According to leading experts in the field of project management [33], a project is an obligation to create value based on the mission of the project, which must be completed over a period of time, within agreed times, resources and conditions; the mission defines the fundamental goals for which the project is designed and which must be achieved as a result of its implementation.

Under the mission of the project "Introductory Campaign of Higher Education" we will understand the achievement of the maximum possible enrollment of students in the conditions prevailing in the market of educational services.

The structure of this set of students should be consistent with the strategic goals and current goals of the higher education institution.

It should be noted that the purpose of the introductory campaign should be specified in conjunction with the development strategy in the areas of "Educational activity" and "International activity", as well as with current educational and international activities. Project resources - specialists; knowledge and experience of implementing such projects; information (for example, on the actions of competing higher education institutions); cash (directed to project marketing); the image of a higher education institution that can play both a positive and a negative role in the process of launching an introductory campaign. The value of the project "Introductory Campaign of Higher Education" is to reflect the usefulness of the project product for stakeholders (fig. 2).

The main stakeholder is the institution of higher education itself. Despite the specificity of this project, we consider it possible to use an economic indicator to evaluate its value. Yes, the value of an introductory campaign can be determined by the money that a higher education institution will earn by educating students in this set. The effectiveness of the project is an assessment of the achievement of the planned results, that is, an analysis of the conformity of the product obtained and its value of what was expected to be obtained as a result of the project implementation. Thus, at the stage of the development life cycle, the planned indicators characterizing the product and the value of the project are formed, at the stage of "Realization" actual indicators of the product and value are formed, and at the stage of "Completion" the project's performance is evaluated.

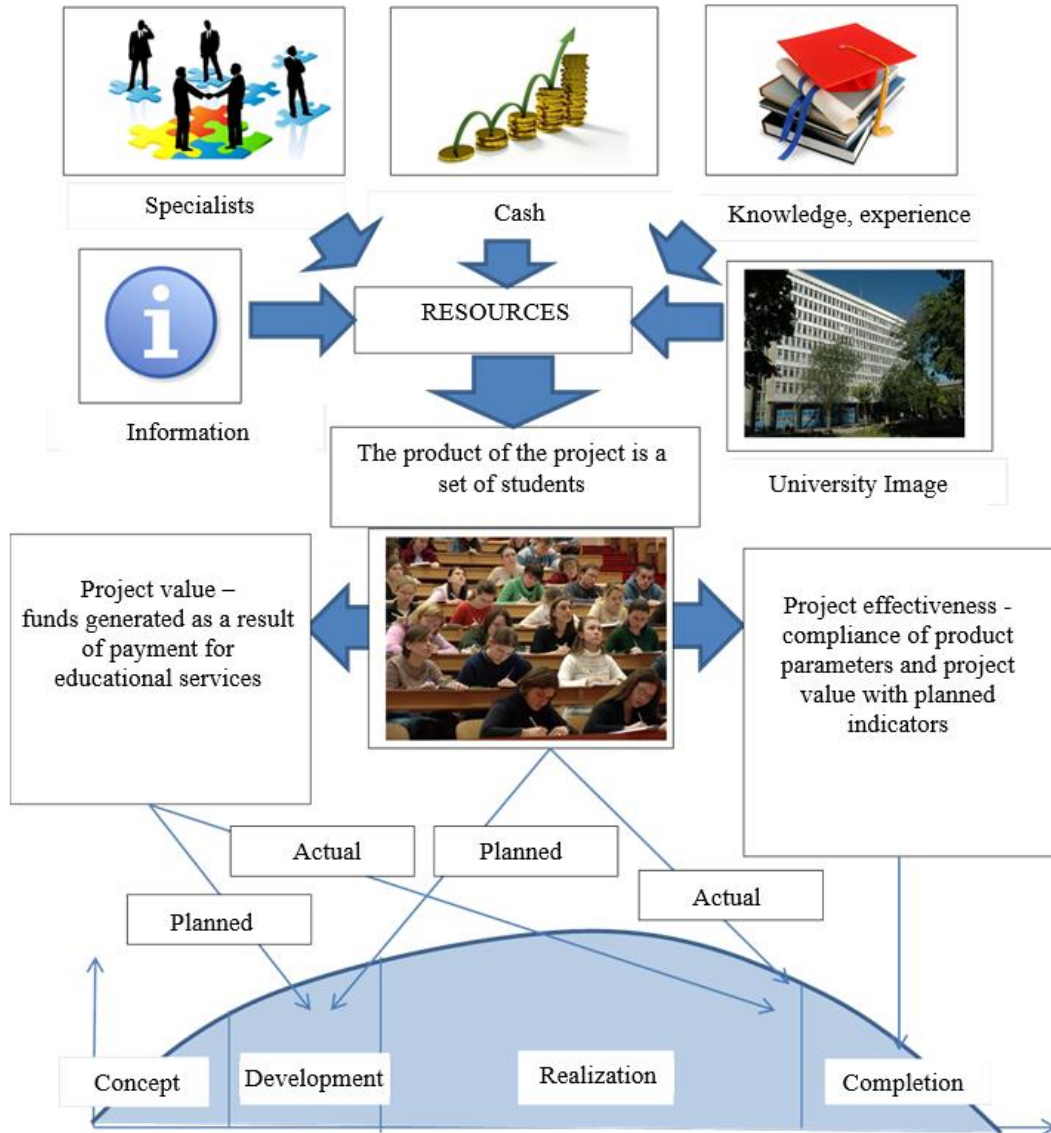


Fig. 2. The value and effectiveness of the Introductory Campaign project

To evaluate the value, we suggest using an expression that takes into account the cash inflows from providing educational services to the current student enrollment, as well as the cost of marketing an admission campaign:

$$\begin{aligned}
 K = & \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F (G_s^{UA,f} Q_s^{UA,f} + G_{master,s}^{UA,f} Q_{master,s}^{UA,f}) + \\
 & + \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F (G_s^{EU,f} Q_s^{EU,f} + G_{master,s}^{EU,f} Q_{master,s}^{EU,f}) + \\
 & + \sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F (H_s^f Q_s^f + H_{master,s}^f Q_{master,s}^f) - D^{IC},
 \end{aligned} \tag{1}$$

where  $s, f$  – specialty and form of education (inpatient, distance, distance, advanced training), respectively  $S, F$  – the number of specialties and forms of education in a higher education institution;  $G_s^{UA,f} Q_s^{UA,f}$ ,  $G_s^{EU,f} Q_s^{EU,f}$ ,  $H_s^f Q_s^f$  – accordingly, the cost of education and the amount received at the level of bachelor of citizens of

Ukraine (under the terms of the contract), foreigners and citizens of Ukraine at the expense of budgetary funds;  $G_{master,s}^{UA,f} Q_{master,s}^{UA,f}$ ,  $G_{master,s}^{EU,f} Q_{master,s}^{EU,f}$ ,  $H_{master,s}^f Q_{master,s}^f$  – accordingly, the cost of education and the amount received at the level of the Master of citizens of Ukraine (under the terms of the contract), foreigners and citizens of Ukraine at the expense of budgetary funds;  $D^{IC}$  – the cost of the institution of higher education for the introductory campaign (advertising, PR events, extra pay, etc.).

It should be noted that expression (1) does not take into account the costs of providing higher education institutions with educational services, as these costs reflect the efficiency of the organization of functioning of higher education institutions, and are not subject to management in this project. Thus, according to the proposed approach, it is possible to estimate the planned  $K^{Plan}$  and actual  $v$  value based on the planned (2) and actual (3) student enrollment.

$$V^{Plan} = \{Q_s^{Plan,UA,f}; Q_s^{Plan,EU,f}; Q_s^{Plan,f}; Q_{master,s}^{Plan,UA,f}; Q_{master,s}^{Plan,EU,f}; Q_{master,s}^{Plan,f}\}; \tag{2}$$

$$V^{Fact} = \{Q_s^{UA,f}; Q_s^{EU,f}; Q_s^f; Q_{master,s}^{UA,f}; Q_{master,s}^{EU,f}; Q_{master,s}^f\}. \quad (3)$$

It is suggested to evaluate the performance of the introductory campaign using the integral indicator, which is the sum of relative indicators (individual indices). Thus, it is proposed to form the final assessment (5) on the basis of individual indicators (4):

$$K_{master,s}^{f(UA,EU)} = \frac{Q_s^{f(UA,EU)}}{Q_{master,s}^{Plan,f}}; \quad (4)$$

$$K^{IC} = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F K_{master,s}^{f(UA,EU)}}{2SF}. \quad (5)$$

The use of the divider in (5) allows to obtain the value of the integral performance index in a form convenient for drawing conclusions: thus, at  $K^{IC} < 1$  the goals of the introductory campaign were not achieved, at  $K^{IC} \approx 1$  the result of the introductory campaign is at the planned level, at  $K^{IC} > 1$  the result exceeded the expectations of the institution of higher education.

Note that this indicator is based on the equivalence of all specialties, levels and forms of study at the university. If, on the basis of strategic considerations, different specialties, forms and levels are not equivalent (for example, some specialties are priorities for higher education institution, more closely match its profile, uniqueness, etc.), then (4) can be to enter the balance  $\lambda_{master,s}^{f(UA,EU)}$  for which (5) are fulfilled, which are determined by the expert way and allow to take into account this condition in (6):

$$\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \lambda_{master,s}^{f(UA,EU)} = 1; \quad (6)$$

$$K^{IC} = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{f=1}^F \lambda_{master,s}^{f(UA,EU)} K_{master,s}^{f(UA,EU)}}{2SF}. \quad (7)$$

The mismatch of the planned and actual results of the project implementation is the main type of risk that can be estimated by the value of the project's "undelivered" value:

$$\Delta K^{Forecast} = K^{Plan} - K^{Fact,Forecast}. \quad (8)$$

This value is estimated, as it is estimated at the stage of development within the project risk management.

The experience of previous introductory campaigns on the discrepancy between actual and planned values can be used to form it, for example, by specifying a percentage of deviation of actual project product parameters from planned ones. Note that the magnitude of

the risk is a dynamic value: its initial value is formed at the stage of development and specified in the implementation process, taking into account the factual information about the project environment and its results. To assess the value, it is suggested to use the University's cash inflows from the current student enrollment educational services to reflect the cost of admission. At the same time, the performance evaluation, that is, the achievement of the goals of the introductory campaign, is based on an integral indicator, which is formed from individual indices, taking into account the importance for higher education institutions of different specialties and forms of education.

## Conclusions

The conceptual model of the project-oriented institution of higher education is formulated, according to which the management of the university is reduced to managing the hierarchy of portfolios, which is identified by the example of educational activity of the institution of higher education. The project-oriented management of the higher education institution's educational activities envisages the extension of the project approach to the development and functioning of different units of the university's activity on the basis of the introduced concept of the product portfolio of the higher education institution. This approach makes it possible to clearly identify the totality of the university's projects within the framework of educational activities and to transform its current activities into the implementation of a project portfolio.

The proposed conceptual model of project-oriented management of educational activity of institutions of higher education allows to organize the fulfillment of tasks in such a way that more clear structuring of goals, time constraints and necessary results for each task is ensured by systematic consideration of tasks within network models of projects, networking models relevant higher education institution portfolio projects.

An indicator of the prevalence of a project-oriented approach based on the quantitative characterization of specific tasks performed in a higher education institution is introduced. The division of tasks into units of a project-oriented higher education institution in accordance with the proposed approach provides for the formation of a system of evaluation of the results of these projects (product, value, performance), which is performed on the example of the project "Introductory campaign of higher education institution", the results of which is the basis for the implementation of most projects within the framework of educational activities.

## References

1. Pitera, V., Lohinov, O. and Lohinova, L. (2019), "Mechanism for forming an effective portfolio of research projects of institution of higher education", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (9), P. 99–108. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.099>
2. Malyshekin, N. (2015), "University research management" ["Upravleniye nauchno- issledovatel'skoy deyatelnost'yu v vuze"], available at : <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-nauchno-issledovatel'skoy-deyatelnostyu-v-vuze> (last accessed 18.06.2019).

3. Piterska, V., Lohinov, O., Lohinova, L. (2019), "Portfolio method of scientific activity management of higher education institutions", ["Portfel'nyy metod upravleniya nauchnoy deyatel'nost'yu zavedeniy vysshogo obrazovaniya"], *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (8), P. 86–96. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.086>
4. Chumachenko, I., Docenko, N. (2011), "Formation of the holistic value of innovative projects and programs" ["Formirovaniye kholisticheskoy tsennosti innovatsionnykh proyektov i programm"], *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1 (5), P. 14–16.
5. Piterska, V. (2019), "Conceptual model of scientific activity management of higher education institutions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 111–119. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.111>
6. Horta, H. (2009), "Global and national prominent universities: internationalization, competitiveness and the role of the State", *Higher Education*, Vol. 58, No. 3, P. 387–405.
7. Armstrong, L. (2002), "A New Game in Town: Competitive Higher Education", *Digital Academe: the New Media and Institutions of Higher Education and Learning*, New York, Routledge Publ., P. 38–49.
8. Rădulescu, M., Rădulescu, C. Z. (2001), "Project portfolio selection models and decision support", *Studies in Informatics and Control*, Vol. 10, No. 4, P. 275–286.
9. Ebbesen, J. B. (2013), "Re-imagining the Iron Triangle: Embedding Sustainability into Project Constraints", *PM World Journal*, Vol. II, Issue III – March, P. 110–114.
10. Bushuyev, S., Verenych, O. (2018), "Organizational maturity and project: Program and portfolio success" (Book Chapter), *Developing Organizational Maturity for Effective Project Management*, P. 2–24.
11. Pavlov, A., Chernov, S., Koshkin, K. (2006), *Mathematical bases of project management of high-tech industries [Matematicheskiye osnovy upravleniya proyektami naukoemkikh proizvodstv]*, Nikolaev, NUK, 200 p.
12. Chernov, S. (2005), "Synergistic effect of project management in high-tech production", *Project Management and Production Development*, East-Ukrainian National University, Vol. 3, P. 57–62.
13. Bushuyev, S., Bushuev, D., Bushuyeva, N., Kozyr, B. (2018), "Information technologies for project management competences development on the basis of global trends", *Information technology and learning tools*, Vol. 68, No. 6, P. 218–234. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v68i6.2684>
14. Piterska, V., Shakhov, A., Lohinov, O. and Lohinova, L. (2019), "The Method of Transfer of Research Project Results of Institution of Higher Education," *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2019, P. 77–80. DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929887>
15. Vanyushkin, A., (2008), "Basis for the formation of a portfolio of high-risk projects" ["Osnovaniya dlya formirovaniya portfelya vysokoriskovykh proyektov"], *Project Management and Production Development*, No. 1 (25), P. 54–61.
16. Ivankevich, A., Piterska, V., Shakhov, A., Shakhov, V., Yarovenko, V. (2019), "A Proactive Strategy of Ship Maintenance Operations," *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, P. 126–129. DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929741>
17. Dulfer, E. (2002), *Projekte und Projektmanagement im internationalen Kontext*, Eine Einführung, in: *Projektmanagement international*, Stuttgart, P. 2–30.
18. Kosenko, V., Gopejenko, V. and Persiyanova, E. (2019), "Models and applied information technology for supply logistics in the context of demand swings", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (7), P. 59–68. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.059>
19. Piterska, V., Kolesnikov, O., Lukianov, D., Kolesnikova, K., Gogunskii, V., Olekh, T., Shakhov, A., Rudenko, S. (2018), "Development of the Markovian model for the life cycle of a project's benefits", *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5/4 (95), P. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.145252>
20. Kononenko, I. (2012), "Optimization of the project content according to the criteria of profit, time, cost, quality, risks" ["Optimizatsiya soderzhaniya proyekta po kriteriyam pribyl', vremya, stoimost', kachestvo, riski"], *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, No. 1/10 (55), P. 13–15.
21. Kononenko, I. (2010), "Model and method for optimizing enterprise project portfolios for the planning period" ["Model' i metod optimizatsii portfeley proyektov predpriyatiya dlya planovogo perioda "], *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, No. 1/2 (43), P. 9–11.
22. O'Connell, D. (2011), *Harvesting External Innovation. Managing External Relationships and Intellectual Property*, DATA-public, P. 21–26.
23. Chumachenko, I., Docenko, N., Kosenko, N., Sabadosh, L. (2011) "Formation of an adaptive project team" ["Formirovaniye adaptivnoy komandy proyekta"], *Project management and development of production*, Vol. 38, P. 67–71.
24. Piterskaya, V. (2016), "Using of the project-oriented approach in the innovative activity management" ["Zastosuvannya proektno-oriyentovanoho pidkhodu v upravlinni innovatsiynoyu diyal'nistyu"], *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, Vol. 1 (1173), P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2016.1173.7>
25. Tanaka, K. (2014), "The integration of engineering and program management with the marine economy", *Shipbuilding And Marine Infrastructure*, Vol. 1 (1), P. 5–9. DOI: <https://dx.doi.org/10.15589/smi20140108>
26. European Commission (2010), *Europe 2020: A strategy for smart sustainable and inclusive growth*, available at: [http://ec.europa.eu/europe2020/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/europe2020/index_en.htm) (last accessed 07.10.2019).
27. Project Management Association of Japan (2008), *P2M. Program and Project Management Guidebook*, 138 p.
28. Kosenko, V., Persiyanova, E., Belotsky, O. and Malyyeva, O. (2017) "Methods of managing traffic distribution in information and communication networks of critical infrastructure systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (2), P. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.048>
29. Bushuyeva, N. (2007), *Models and methods of proactive management of organizational development programs [Modeli i metody proaktivnogo upravleniya programmami organizatsionnogo razvitiya]*, Kyiv, Naukovii svit, 270 p.
30. Piterska, V. M., Kramskiy, S. O. (2017), "Methodological basis of innovative project-oriented organizations' management", *Management of development of complex systems*, Kyiv : KNUCA, No. 30, P. 11–20.

31. Bushuyev, S., Murzabekova, A., Murzabekova, S., Khusainova, M. (2017), "Develop breakthrough competence of project managers based on entrepreneurship energy", *Proceedings of the 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2017*, P. 11–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2017.8099420>
32. Fonstein, N. (2009), "Technology Transfer and Effective Implementation of Innovations", *ANH*, P. 175–196.
33. Eveleens, C. (2010), "Innovation management; a literature review of innovation process models and their implications", *Working Paper HAN University of Applied Sciences*, Vol. 23, P. 112–121.

Received 12.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Пітерська Варвара Михайлівна** – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний морський університет, професор кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт, Одеса, Україна; email: varuwa@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5849-9033>.

**Питерская Варвара Михайловна** – доктор технических наук, доцент, Одесский национальный морской университет, профессор кафедры эксплуатации портов и технологии грузовых работ, Одесса, Украина.

**Piterska Varvara** – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Odessa National Maritime University, Professor of the Department of Port Operations and Cargo Works Technology, Odessa, Ukraine.

**Логінов Олег Володимирович** – кандидат технічних наук, Одеський національний морський університет, доцент кафедри морського права, Одеса, Україна; email: ologinov@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4540-731X>.

**Логинов Олег Владимирович** – кандидат технических наук, Одесский национальный морской университет, доцент кафедры морского права, Одесса, Украина.

**Lohinov Oleh** – PhD (Engineering Sciences), Odessa National Maritime University, Associate Professor of the Department of Maritime Law, Odessa, Ukraine.

**Логінова Лілія Володимирівна** – Одеський національний морський університет, старший викладач кафедри філології, Одеса, Україна; email: llv2003@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2263-9457>.

**Логинова Лилия Владимировна** – Одесский национальный морской университет, старший преподаватель кафедры филологии, Одесса, Украина.

**Lohinova Liliia** – Odessa National Maritime University, Senior Lecturer of the Department of Philology, Odessa, Ukraine.

## КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЕКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ОСВІТНЬОЮ ДІЯЛЬНІСТЮ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

**Предметом** дослідження в статті є методи, моделі і механізми проектно-орієнтованого управління освітньою діяльністю закладів вищої освіти. **Мета** роботи – розробка концептуальної моделі управління освітньою діяльністю закладів вищої освіти на основі проектно-орієнтованого підходу. В статті вирішуються наступні **завдання**: аналіз моделі управління освітньою діяльністю закладів вищої освіти, дослідження сучасних методів управління портфелями проектів освітньої діяльності університетів, розробка механізму впровадження концептуальної моделі проектно-орієнтованого управління освітньою діяльністю закладів вищої освіти. Використовуються такі **методи**: методи управління проектами і портфелями, теорія систем і системного аналізу, методи управління ризиками. Отримано наступні **результати**: ідентифіковано основні етапи життєвого циклу, їх продукти та місію проекту "Вступна кампанія закладу вищої освіти", визначено поняття "освітній продукт", "продукт освітнього проекту", "освітній проект", "проект освітньої діяльності", запропоновано модель визначення цінності і результативності проекту "Вступна кампанія", розроблено концептуальну модель проектно-орієнтованого управління освітньою діяльністю закладів вищої освіти з урахуванням цінності проекту "Вступна кампанія закладу вищої освіти". **Висновки**: Забезпечення ефективності впровадження проектного підходу в поточну діяльність закладу вищої освіти має базуватися на чіткій ідентифікації атрибутів даних проектів, в тому числі, продуктів, цінностей і результативності, що дозволить не тільки чітко усвідомлювати результат проектною діяльністю, а й здійснювати контроль його отримання. Реалізація концепції проектно-орієнтованого закладу вищої освіти дозволить підвищити ефективність поточної діяльності університетів і їх розвитку, шляхом використання переваг технологій проектного менеджменту. Запропоновано визначення "Місія проекту "Вступна кампанія закладу вищої освіти"", під яким розуміється досягнення максимально можливого набору студентів в умовах, що склалися на ринку освітніх послуг. Встановлено цінність проекту "Вступна кампанія закладу вищої освіти", яка визначає корисність продукту проекту для зацікавлених сторін. Запропонована концептуальна модель проектно-орієнтованого підходу до управління освітньою діяльністю закладу вищої освіти дозволить поширити проектний підхід на розвиток і функціонування різних блоків діяльності університету на базі введеного поняття "продуктовий портфель закладу вищої освіти". Такий підхід у подальшому дозволить чітко ідентифікувати сукупність проектів університету в рамках освітньої діяльності і перетворить його поточну діяльність в реалізацію портфеля проектів.

**Ключові слова**: освітній проект; заклад вищої освіти; проектно-орієнтоване управління; продукт освітнього проекту; цінність.

## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ЗАВЕДЕНИЙ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Предметом** исследования в статье являются методы, модели и механизмы проектно-ориентированного управления образовательной деятельностью заведений высшего образования. **Цель** работы – разработка концептуальной модели управления образовательной деятельностью заведений высшего образования на основе проектно-ориентированного подхода.

В статье решаются следующие **задачи**: анализ модели управления образовательной деятельностью заведений высшего образования, исследование современных методов управления портфелями проектов образовательной деятельности университетов, разработка механизма формирования концептуальной модели проектно-ориентированного управления образовательной деятельностью заведений высшего образования. Используются следующие **методы**: методы управления проектами и портфелями, теория систем и системного анализа, методы управления рисками. Получены следующие **результаты**: идентифицировано основные этапы жизненного цикла, их продукты и миссию проекта "Вступительная кампания заведений высшего образования", определено понятие "образовательный продукт", "продукт образовательного проекта", "образовательный проект", "проект образовательной деятельности", предложена модель определения ценности и результативности проекта "Вступительная кампания", разработана концептуальная модель проектно-ориентированного управления образовательной деятельностью заведений высшего образования с учетом ценности проекта "Вступительная кампания заведения высшего образования". **Выводы**: Обеспечение эффективности внедрения проектного подхода в текущую деятельность заведений высшего образования должна базироваться на четкой идентификации атрибутов данных проектов, в том числе, продуктов, ценностей и результативности, что позволит не только четко осознавать результат проектной деятельности, но и осуществлять контроль его получения. Реализация концепции проектно-ориентированного заведения высшего образования позволит повысить эффективность текущей деятельности университетов и их развития путем использования преимуществ технологий проектного менеджмента. Предложено определение "Миссия проекта "Вступительная кампания учреждения высшего образования"", под которым понимается достижение максимально возможного набора студентов в условиях, сложившихся на рынке образовательных услуг. Установлена ценность проекта "Вступительная кампания учреждения высшего образования", которая определяет полезность продукта проекта для заинтересованных сторон. Предложенная концептуальная модель проектно-ориентированного подхода к управлению образовательной деятельностью учреждения высшего образования позволит распространить проектный подход на развитие и функционирование различных блоков деятельности университета на базе введенного понятия "продуктовый портфель учреждения высшего образования". Такой подход в дальнейшем позволит четко идентифицировать совокупность проектов университета в рамках образовательной деятельности и превратит его текущую деятельность в реализацию портфеля проектов.

**Ключевые слова**: образовательный проект; заведение высшего образования; проектно-ориентированное управление; продукт образовательного проекта; ценность.

#### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Пітерська В. М., Логінов О. В., Логінова Л. В. Концептуальна модель проектно-орієнтованого управління освітньою діяльністю закладів вищої освіти. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.059>.

Piterska, V., Lohinov, O., Lohinova, L. (2020), "Conceptual model of project-oriented management of educational activities of higher education institutions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.059>.

О. В. Попко

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОБЛЕМ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ МОЛОЧНОГО РИНКУ УКРАЇНИ

**Предметом** дослідження статті є теоретичні, методологічні й методичні засади формування та прогнозування тенденцій розвитку молочного ринку України. **Мета** роботи – виокремлення сучасних проблем розвитку молочного ринку України та прогнозування тенденцій його розвитку у короткостроковій перспективі. У статті вирішуються наступні **завдання**: проведення аналізу динаміки зміни поголів'я корів, виробництва молока та зростання кількості надоїв на одну корову в цілому в Україні та в розрізі сільськогосподарських підприємств і господарств населення протягом 2010-2018 років; дослідження динаміки середніх цін купівлі молока молокопереробними підприємствами на вітчизняному ринку; оцінювання якості молока коров'ячого, яке надходить у переробку, за гатунками; здійснення економічного аналізу виробництва молока в Україні, SWOT-аналіз молочної промисловості України. Використовуються такі **методи** дослідження: порівняльний та статистичний аналіз – при дослідженні обсягів виробництва молока коров'ячого в цілому в Україні та в розрізі сільськогосподарських підприємств і господарств населення протягом 2010-2018 років, а також динаміки середніх надоїв на одну корову на середнє поголів'я корів, обсягів переробки молока, середніх закупівельних цін на молоко-сировину та якості молока коров'ячого за гатунками; системно-структурний аналіз, логічне узагальнення – при проведенні SWOT-аналізу молочної промисловості України; економіко-математичне та графічне моделювання – метод Брауна першого порядку при прогнозуванні динаміки виробництва молока, приросту надоїв на одну корову в Україні в перспективі на 2020-2022 роки. Отримано наступні **результати**: на молочному ринку України сьогодні відслідковуються дві протилежні тенденції – тенденція до зростання надоїв та тенденція до скорочення молочного стада. За прогнозом на наступні три роки, виконаного за методом Брауна першого порядку, надалі очікуватиметься зростання надоїв на одну корову за скорочення загального поголів'я корів. Разом з тим, використання сильних сторін молочного сектору України та його потенційних можливостей, виявлених при проведенні SWOT-аналізу, зокрема: зростання молочної продуктивності худоби, нарощення обсягів виробництва молока "екстра-класу", покращення контрольних механізмів якості й безпечності молочної продукції, поступове поширення на вітчизняний агропромисловий сектор міжнародних правил торгівлі, страхування, кредитування, інвестування, дозволить вже у короткостроковій перспективі здійснити диверсифікацію торговельних потоків і максимально реалізувати експортний потенціал галузі, розширивши доступ до продовольчих ринків ЄС, азійського та африканського ринків. **Висновки**: У цілому можна ідентифікувати стан українського молочного ринку як такий, що досить активно розвивається та має всі шанси в найближчій перспективі увійти в п'ятірку країн-лідерів, які динамічно нарощують молочний напрям.

**Ключові слова**: молочний ринок; оператори ринку; метод Брауна; якість молока за гатунками; SWOT-аналіз.

### Вступ

Молочна промисловість – одна з провідних галузей народного господарства, яка забезпечує населення продуктами харчування. Молочна та молокопереробна галузі України сьогодні мають цілу низку проблем, які перешкоджають ефективному розвитку цих галузей. Виробники молока та продукції з нього намагаються відійти від стандартів радянських часів та засвоїти нові європейські технології. Проте для успішної конкуренції з міжнародними виробниками потрібно подолати технологічні та фінансові проблеми, а також удосконалити контроль над якістю сировини та готової продукції.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженню проблем ефективності розвитку молочної та молокопереробної промисловості присвячено праці провідних науковців країни, серед них: Н. С. Белінська, П. С. Березівський, С. В. Васильчак, П. І. Гайдучкий, Т. Г. Дудар, В. О. Рибінцев, П. Т. Саблук, В. Б. Смолінський та інші. У наукових працях Н. С. Белінської [1] зазначено проблеми ціноутворення на ринку молока за відсутності державного регулювання, а також проблеми нарощування обсягів виробництва, удосконалення роботи зі створеною новою

сировинною зоною. Т. Г. Дудар [5] досліджує раціональне розміщення й розвиток виробництва молока і молочної продукції з метою максимального завантаження виробничих потужностей молокопереробної промисловості та ефективного використання природного й економічного потенціалів кожного регіону. Смолінський В. Б. [15] пропонує подальші напрями державної політики щодо регулювання ринку молока. Проте потребує вирішення у короткостроковій перспективі ряд нагальних проблем, які перешкоджають ефективному розвитку молочної та молокопереробної промисловості України. Разом з тим, потребують дослідження питання подальших напрямків розвитку галузі в умовах постійно зростаючого світового попиту на харчові продукти.

**Метою даної статті** є виокремлення сучасних проблем розвитку молочного ринку України та прогнозування тенденцій його розвитку у короткостроковій перспективі.

### Постановка завдання

Проаналізувати стан молочної промисловості України, спрогнозувати її подальший розвиток у короткостроковій перспективі, виявити її сильні та слабкі сторони та співставити їх із зовнішніми можливостями та загрозами.

### Методи дослідження

Порівняльний та статистичний аналіз – при дослідженні обсягів виробництва молока коров'ячого в цілому в Україні та в розрізі сільськогосподарських підприємств і господарств населення протягом 2010–2018 років, а також динаміки середніх надоїв на одну корову на середнє поголів'я корів, обсягів переробки молока, середніх закупівельних цін на молоко-сировину та якості молока коров'ячого за гатунками; системно-структурний аналіз, логічне узагальнення – при проведенні SWOT-аналізу молочної промисловості України; економіко-математичне та графічне моделювання – метод Брауна першого порядку при прогнозуванні динаміки виробництва молока, приросту надоїв на одну корову в Україні в перспективі на 2020-2022 роки.

### Виклад основного матеріалу

Аналіз статистичних даних молокопереробної промисловості України дозволяє сформулювати певні

висновки щодо обсягів виробництва, кількості та якості молока, яке надходить на переробку від різних виробників. Фактичне виробництво молока в Україні значно нижче необхідних обсягів споживання, що позначається на якості харчування населення. Збільшення ж виробництва молока стримується недостатньо високою рентабельністю тваринництва і тим, що більшість населення України не може купувати необхідну кількість молочної продукції через високу його вартість [7]. Лівову частку обсягів виробництва молока в Україні забезпечують господарства населення – на рівні 73%, відповідно 27% обсягів виробництва молока забезпечують сільськогосподарські підприємства [2].

Якість та кількість молочної сировини залежать від багатьох факторів і, в першу чергу, від поголів'я великої рогатої худоби [9, 13]. За даними 2018 року чисельність поголів'я корів скоротилась на 2,5% до рівня 1967,6 тис.голів проти 2017,8 тис.голів в 2017 році [2]. Динаміку зміни поголів'я корів в Україні за період 1996–2018 рр. наведено на рис. 1 та рис. 2.

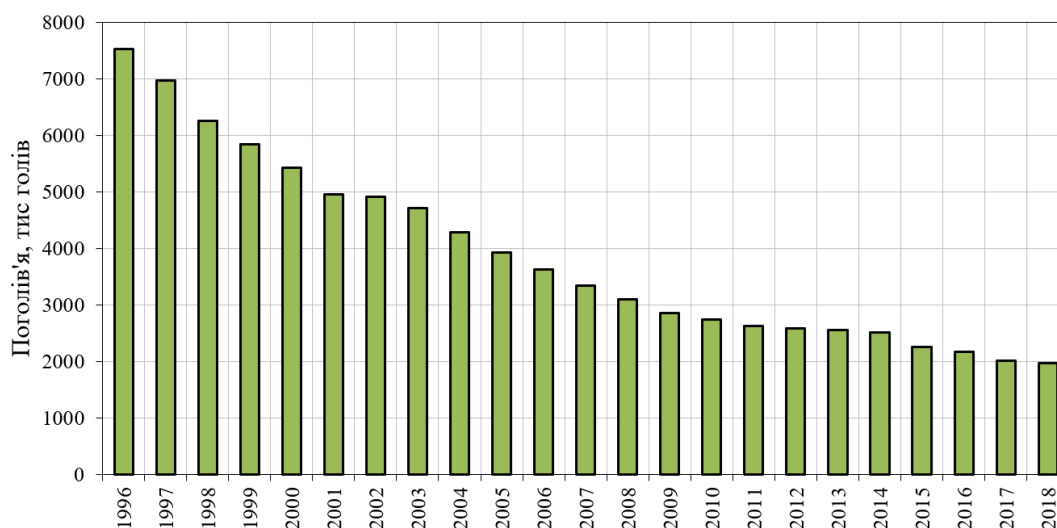


Рис. 1. Динаміка зміни поголів'я корів в Україні, тис.голів [0, 0]

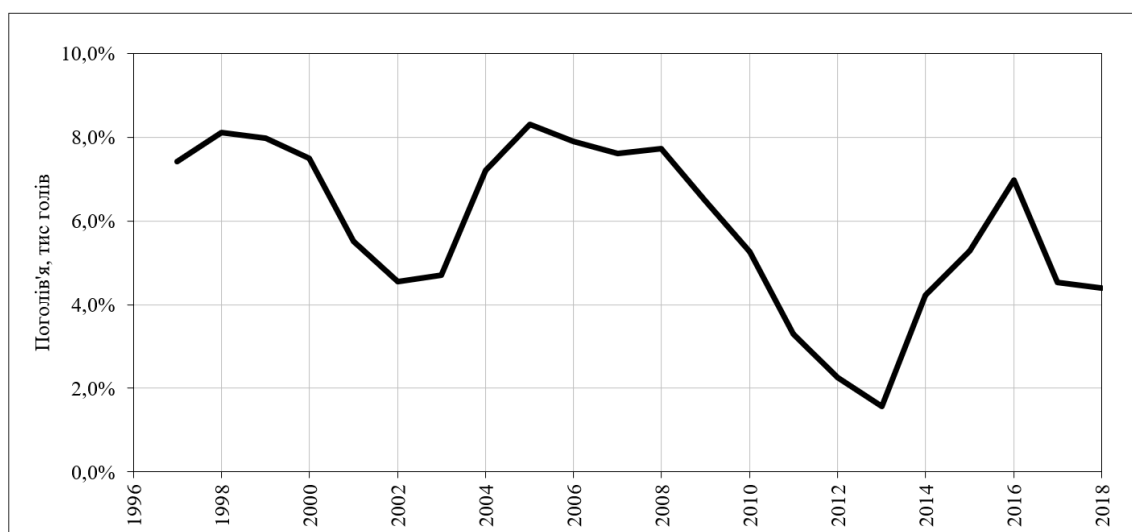


Рис. 2. Темпи зменшення поголів'я корів в Україні (згладжені, вікно 3 роки). Розрахунок автора

Як бачимо, поголів'я корів в Україні стабільно зменшується, хоча темпи цього зменшення дещо сповільнилися в останні роки.

На думку експертів молокопереробної промисловості, до основних причин скорочення поголів'я корів в Україні відносяться: 1) недосконала система дотацій для товаровиробників; 2) низький експортний потенціал підприємств з переробки молока; 3) низька покупна спроможність населення [17].

Разом з тим, скорочення поголів'я корів відбувається нерівномірно у розрізі сільськогосподарських підприємств та господарств населення. Так, поголів'я корів в

сільськогосподарських підприємствах останнім часом стабілізувалося та в 2018 році становило 467,9 тис.голів, що на 13,3 тис.голів перевищило чисельність поголів'я корів 2017 року (466,6 тис.голів). В індивідуальному секторі (господарствах населення), навпаки, в 2018 році чисельність поголів'я корів знизилась на 3,3% з 1551,2 тис.голів в 2017 році до 1499,7 тис.голів. Проте, не дивлячись на щомісячне падіння обсягів молока у господарствах населення, індивідуальний сектор все ж поки що вважається основним виробником молока в Україні.

У цілому по Україні спостерігається низхідна динаміка виробництва молока протягом 1996-2018 років (рис. 3).

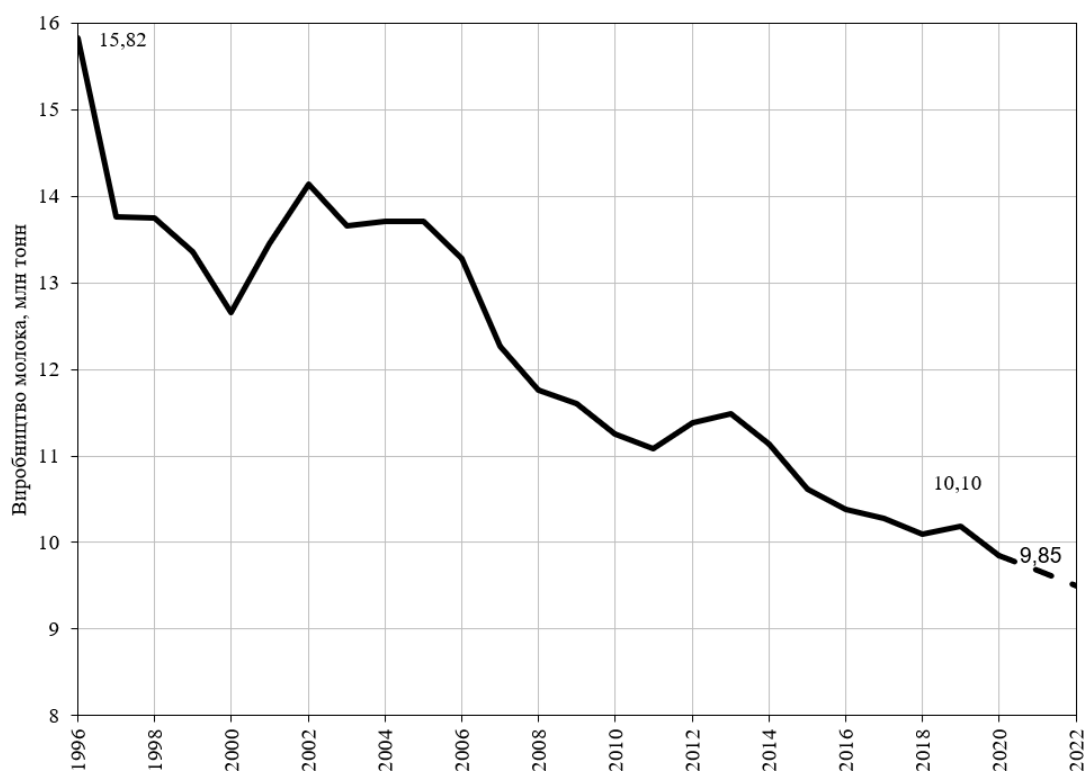


Рис. 3. Динаміка виробництва молока в Україні, тонн [3, 18]

Прим. Штрихова лінія – прогноз, виконаний методом Брауна [10]

Лише в 2018 році за даними Державної служби статистики України виробництво молока скоротилось на 1,8 % в порівнянні з даними минулого року і склало 10098,8 тис. тонн [2]. Згідно прогнозу, за методом Брауна, очікується, що така негативна тенденція спостерігатиметься і впродовж наступних 3-х років.

Метод Брауна відноситься до адаптивних методів прогнозування [10]. Його перевагою є модифікація прогнозуальної моделі з врахуванням нових даних, що дозволяє підвищити точність та справжність прогнозування. Метод Брауна першого порядку використовується для прогнозування процесів з лінійним трендом. Як видно з рис. 1, рис. 3, динаміка молочної галузі в останні роки має лінійну динаміку. Прогноз будується методом екстраполяції лінійного тренду

$$\hat{y}_t = a_1 + a_2 t. \quad (1)$$

По мірі просування вздовж часового ряду даних оцінки коефіцієнтів тренду змінюються і обчислюються за формулами:

$$a_{1,t} = 2S_t - S_t^{[2]}; \quad (2)$$

$$a_{2,t} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}(S_t - S_t^{[2]}).$$

Тут  $\alpha$  – параметр згладжування ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ),

$$S_t = \alpha y_t + (1-\alpha)S_{t-1}; \quad (3)$$

$$S_t^{[2]} = \alpha S_t + (1-\alpha)S_{t-1}^{[2]}.$$

Тут  $y_t$  – фактичні статистичні дані,  $\hat{y}_t$  – розраховані прогнозні дані,  $S_t$ ,  $S_t^{[2]}$  – проміжні дані, отримані в результаті згладжування початкового ряду.

Найбільші темпи росту обсягів виробництва молока в 2018 році забезпечили Закарпатська (+6,2%), Хмельницька (+4,7%), Житомирська (+0,9%), Харківська (+0,8%) та Кіровоградська області (+0,6%)

(рис. 4). Найнижчі – відповідно Запорізька (-6,4%), Волинська (-5,1%), Івано-Франківська (-4,8%), Черкаська (-4,7%), Львівська (-4,3%), Одеська (-3,8%), Рівненська (-3,8%), Полтавська (-3,4%), Чернівецька (-3,1%), Херсонська (-3%), Вінницька (-2,8%), Дніпропетровська (-2,2%), Чернігівська (-2,2%), Донецька (-2,1%), Миколаївська (-2%), Україна (-1,8%), Тернопільська (-1,4%), Сумська (-0,4%), Київська (-0,1%), Кіровоградська (0,6%), Харківська (0,8%), Житомирська (0,9%), Луганська (1,8%), Хмельницька (4,7%), Закарпатська (6,2%)

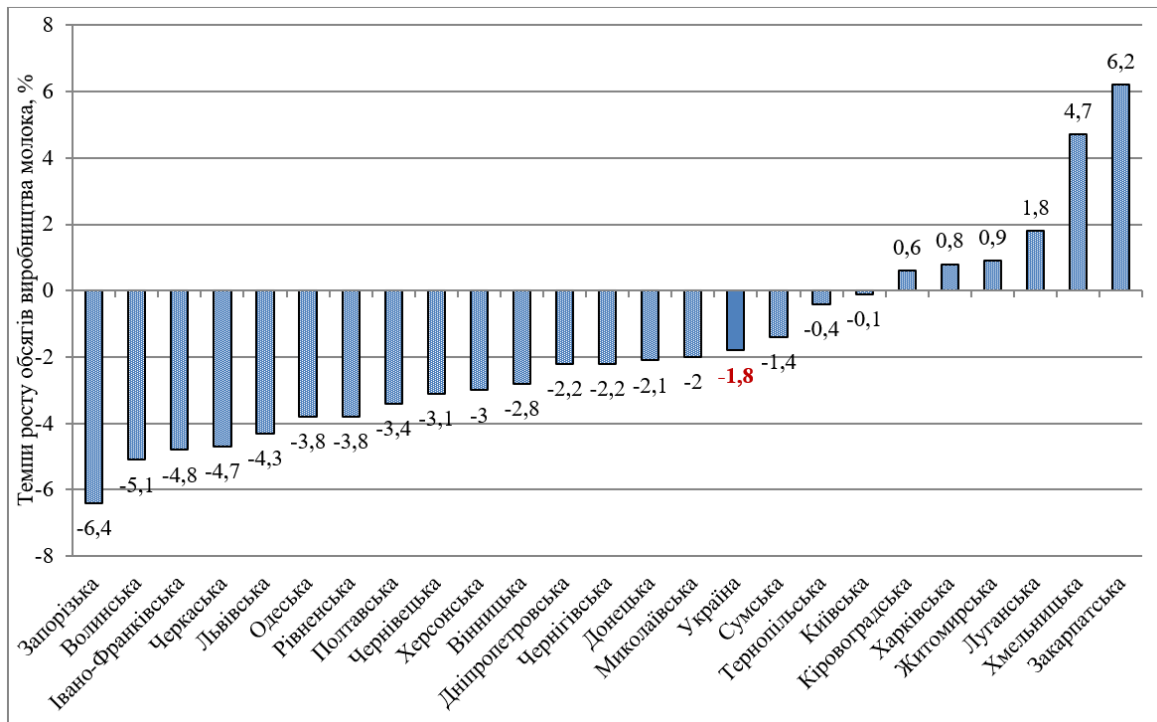


Рис. 4. Темпи росту обсягів виробництва молока в розрізі областей України в 2018 році, % [2, 3]

При цьому, якщо у секторі сільськогосподарських підприємств виробництво молока зменшилось несуттєво – в межах 0,2% до рівня 2760 тис. тонн проти 2765,7 тис.тонн в 2017 році, то в секторі господарств населення в 2018 році

спостерігається скорочення обсягів виробництва молока більш швидкими темпами – на 2,3% до рівня 7338,8 тис.тонн проти 7514,8 тис.тонн в 2017 році (рис. 5).

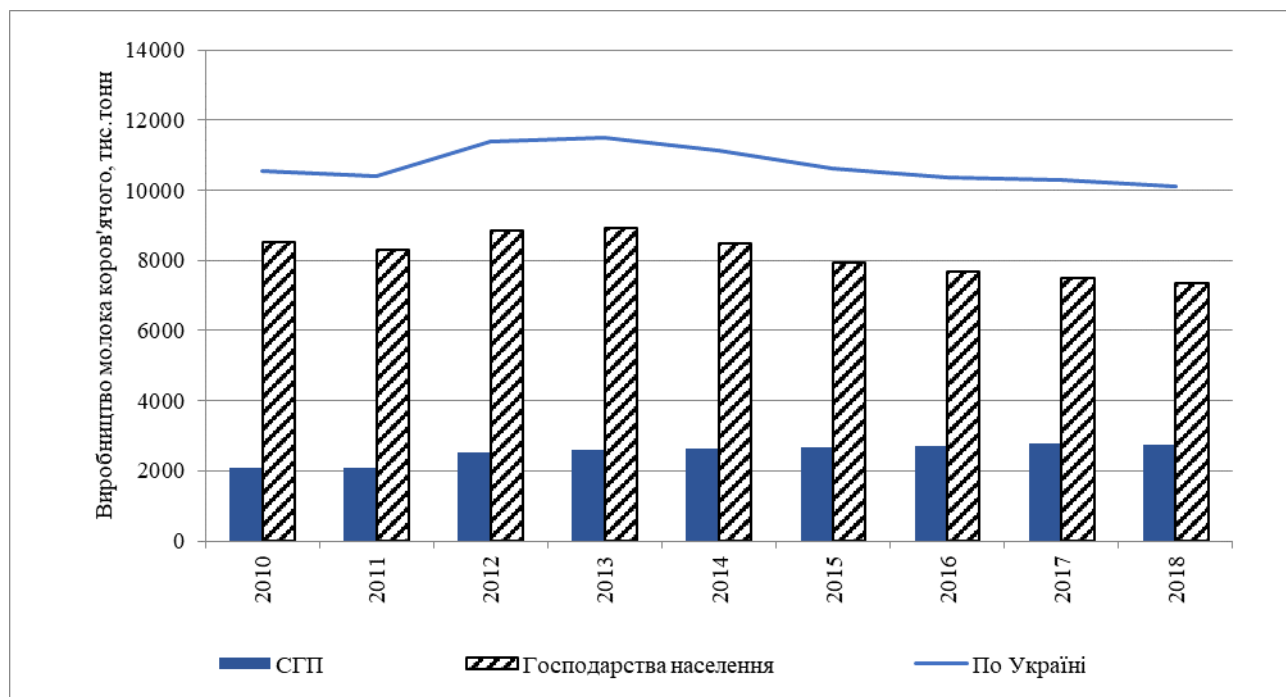
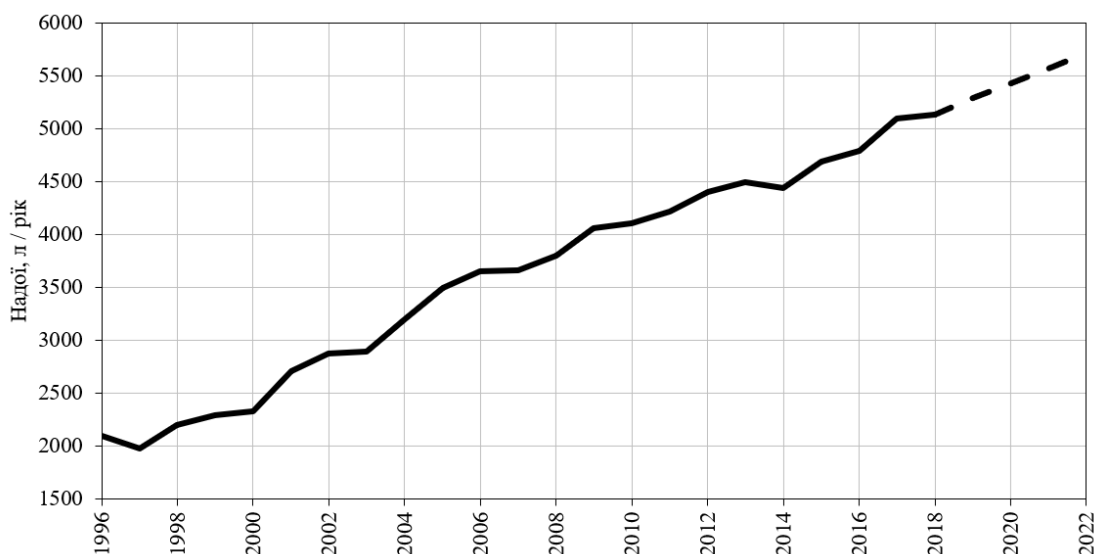


Рис. 5. Виробництво молока коров'ячого в розрізі сільськогосподарських підприємств і господарств населення в 2010-2018 роках, тис.тонн [2, 3]

Натомість показник середньостатистичного надою від однієї корови в Україні стабільно зростає (рис. 6), що пояснюється підвищенням продуктивності молочного стада сільськогосподарських підприємств за рахунок закупівлі корів високопродуктивних порід, при чому надої зростають більш швидкими темпами

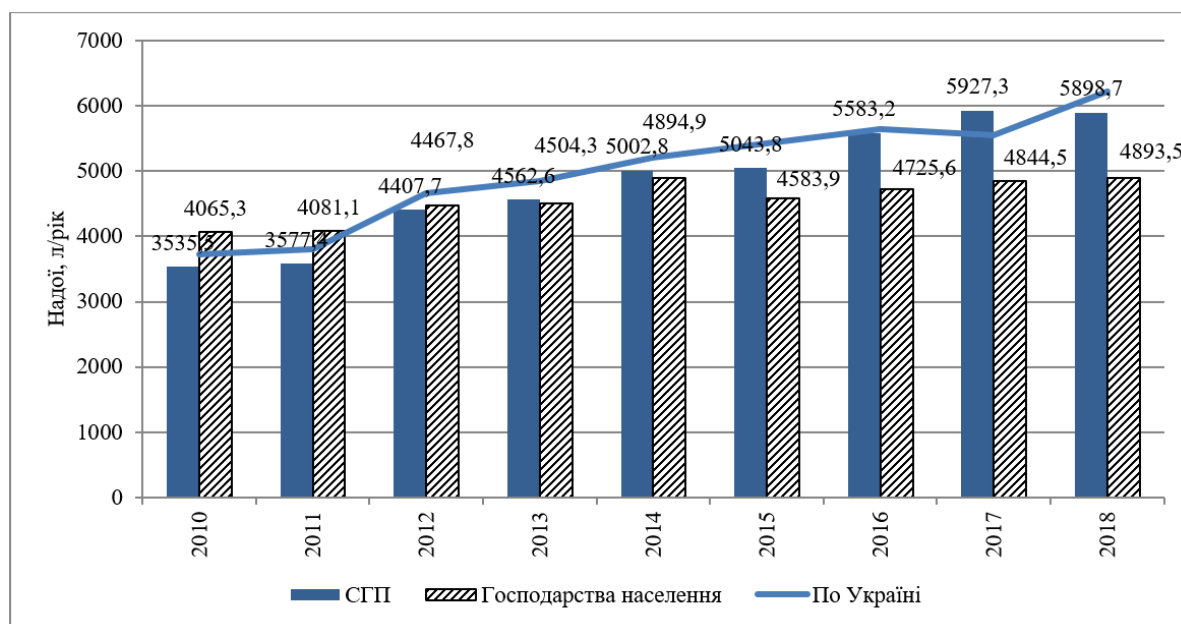
на сільськогосподарських підприємствах, аніж в господарствах населення, що зумовлено більшою досконалістю технологічних засобів виробництва [9, 17]. Важливим фактором високих надоїв є також правильно організована повноцінна годівля тварин.



**Рис. 6.** Динаміка зростання кількості надоїв на 1 корову в Україні  
Прим. Штрихова лінія – прогноз, виконаний методом Брауна [10]

Використовуючи метод Брауна першого порядку, ми побудували прогноз подальшого зростання надоїв у короткостроковій перспективі. Згідно з отриманим прогнозом, очікується зростання середніх надоїв в Україні до рівня понад 6000 л/рік на одну корову в 2020 – 2022 роках.

За даними Державної служби статистики України середній річний надій на корову в 2018 році склав на сільськогосподарських підприємствах – 5898,7 кг, в господарствах населення – 4893,5 кг [18] (рис. 7).



**Рис. 7.** Середній надій на одну корову на середнє поголів'я корів в розрізі сільськогосподарських підприємств і господарств населення в 2010–2018 роках, кг [3, 18]

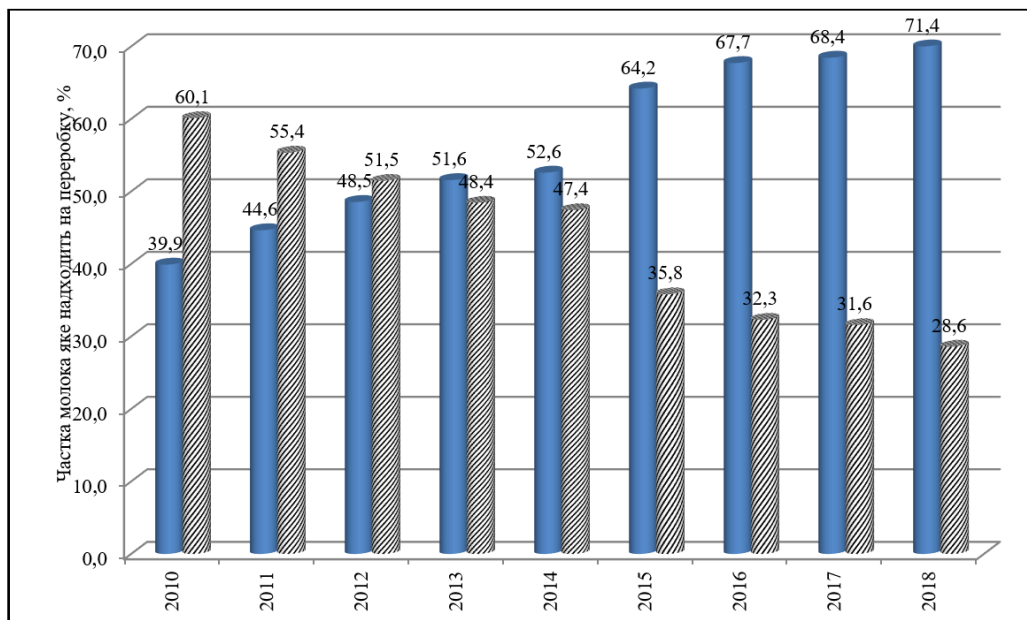
Середній надій на корову в світі в середньому в 2015–2017 роках склав 1,15 тонн. Максимальним є надій на корову в США – 10,4 тонн, в ЄС – 6,95 тонн,

в Індії – 1,27 тонн, в Китаї – 2,51 тонн. Для порівняння в Російській Федерації середній річний надій на

корову в 2019 році склав 6094 кг, в Білорусі 5004 кг на рік на одну корову [14].

На переробку до молокопереробних підприємств надходить лише 41–42% усього обсягу молока, що виробляється в Україні (як від сільськогосподарських підприємств, так і від господарств населення). Для прикладу в ЄС переробляється 94% обсягів молока.

Не зважаючи на те, що 73% обсягів виробництва молока забезпечують господарства населення, на переробку лівова частка надходить саме від сільськогосподарських підприємств в розмірі 71,4% і лише 28,6% – від господарств населення (рис. 8).

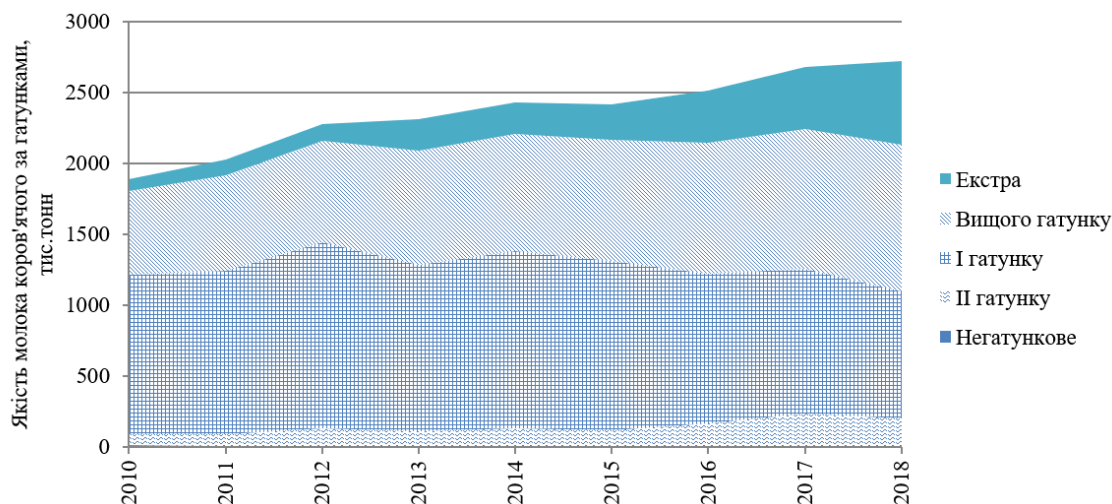


**Рис. 8.** Частка молока у загальній кількості, яка поступає на переробку [2, 3]  
Суцільна заливка – від СГП, штрихова заливка – від господарств населення

Умовно все молоко, яке надходить на переробку, поділяють на 5 класів: молоко екстра-класу, молоко вищого гатунку, молоко I гатунку, молоко II гатунку і неगतункове.

У структурі надходжень молока від сільськогосподарських підприємств в 2018 році можна виокремити: 1) молоко екстра-класу – 21,6%. Надходження молока-сировини екстра-класу в Україні забезпечують виключно сільськогосподарські підприємства. При цьому з 2010 року спостерігається нарощення частки молока-сировини цього гатунку з

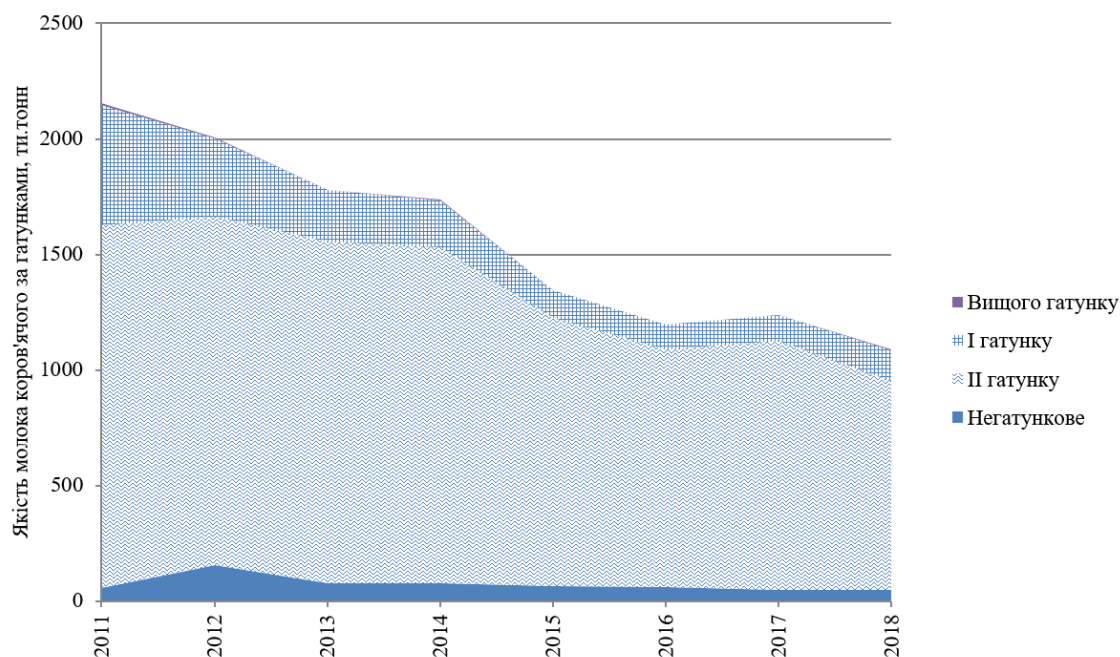
4,4% до 21,6%. Для прикладу в країнах ЄС переробники приймають молоко-сировину виключно екстра-класу, як від сільгоспвиробників, так і від господарств населення; 2) молоко вищого гатунку – 38,1% (відносно стабільне значення з 2010 року); 3) молоко I гатунку – 32,9%; 4) молоко II гатунку – 7,1%; 5) неगतункове – 0,3%. Аналіз якості молока коров'ячого за гатунками, отриманого на переробку від сільськогосподарських підприємств в 2010-2018 роках, тис.тонн наведено на рис. 9.



**Рис. 9.** Якість молока коров'ячого за гатунками, отриманого на переробку від сільськогосподарських підприємств в 2010-2018 роках, тис.тонн [2, 3]

Поставки молока від населення, своєю чергою, представлені переважно молоком II гатунку (83%). Значно меншою є частка молока I гатунку – на рівні 12,5% та негатурного – відповідно 4,3%. Аналіз

якості молока коров'ячого за гатунками, отриманого на переробку від господарств населення в 2010–2018 роках, тис. тонн наведено на рис. 10.



**Рис. 10.** Якість молока коров'ячого за гатунками, отриманого на переробку від господарств населення в 2010-2018 роках, тис. тонн [2, 3]

Слід мати на увазі, що згідно з домовленостями щодо виконання вимог євростандартів з 1 січня 2020 року молокозаводи повинні припинити прийом молока II сорту з домогосподарств, які не обладнані сертифікованими доїльними апаратами і спеціальними умовами утримання худоби. На сьогодні виконати ці умови можуть лише окремі фермерські господарства, що "розжилися" державною дотацією. Це ще більше підсилить процес концентрації молока, яке йде на переробку, у сільськогосподарських підприємствах. Що стосується індивідуальних виробників, то частка молока виробленого ними, яке йде на переробку стабільно зменшується (до 15% у 2018 році). Таким чином, законодавчі зміни, які увійдуть в дію з 1 січня 2020 року приведуть до кардинальних змін на молочному ринку України. Враховуючи зміщення ваги переробленої продукції в бік сільгоспдприємств, можна прогнозувати деяке здорожчання молочної продукції в Україні та дефіциту сировини для переробників [17]. Десять років тому картина була протилежною – лівову частку молока-сировини, яке надходило на переробку, забезпечували господарства населення. Для прикладу в 2010 році 54% усіх надходжень молока на переробку здійснювалось з індивідуальних господарств. Проте поглиблений аналіз тенденцій останніх років щодо підвищення вимог до рівня якості вихідної сировини дозволяють дійти висновку, що основним постачальником молока на переробку у найближчому майбутньому будуть саме сільськогосподарські підприємства.

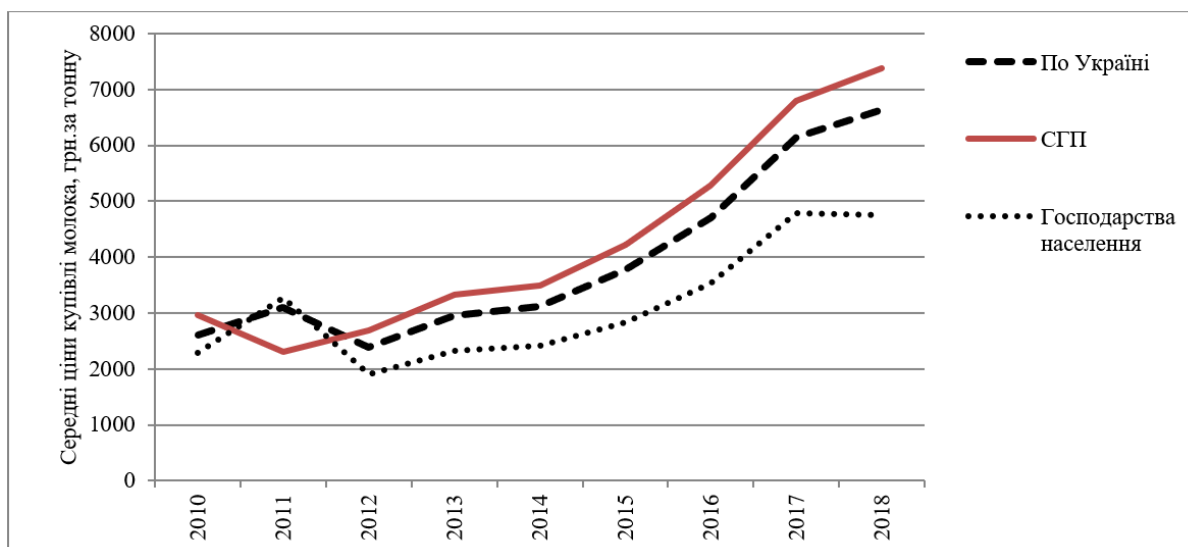
На нашу думку, для стабілізації обсягів виробництва молока в Україні необхідно стабілізувати його виробництво у приватному секторі. Для цього необхідно усунути причини, які ведуть до зменшення виробництва молока у приватних господарствах. Поряд з вище названими причинами, ще однією з вагомих причин є скорочення сільського населення [16]. Сьогодні частка сільського населення в Україні становить 30% і продовжує скорочуватися з темпом 0,7% на рік. Згідно з прогнозом авторів [16], процес скорочення сільського населення повинен стабілізуватися після 2040 року на рівні 22%. Для порівняння, сьогоднішня частка сільського населення у Польщі становить 39%. Частка сільського населення в інших країнах, які є сусідами України становить: Білорусь – 22%, Болгарія – 25%, Чехія – 26%, Естонія – 31%, Угорщина – 29%, Латвія – 32%, Литва – 33%, Молдова – 57%, Румунія – 46%, Росія – 26%, Словаччина – 46%, Туреччина – 25% [19].

Іншою причиною, яка веде до скорочення виробництва молока у приватних господарствах є його низька закупівельна ціна. Так, середня закупівельна ціна молока по Україні в 2018 році для сільськогосподарських підприємств становила 7385,9 грн/т. При цьому середня закупівельна ціна молока від населення становила 4758 грн/т, що є на 35,6% менше, аніж закупівельна ціна на молоко від сільськогосподарських підприємств.

Усунувши зазначені диспропорції можна зупинити падіння кількості поголів'я корів у приватних господарствах і це, непрямим чином, зменшить темпи падіння сільського населення в

Україні. На нашу думку, для встановлення паритетних ринкових відносин з населенням переробні підприємства повинні підняти закупівельні ціни за умови дотримання стандартів якості принаймні на

35% – 40%. Якщо тенденції останніх років, які притаманні для молочного господарства України збережуться, падіння виробництва молока буде продовжуватися.



**Рис. 11.** Середні ціни купівлі молока від сільськогосподарських підприємств та господарств населення в 2010-2018 роках, грн. за тону [3]

Усього в молокопереробній галузі функціонує близько 200 підприємств. На думку аналітиків, ефективно працюють не більше 100 з них. Застарілі технології не дають змоги багатьом українським підприємствам стати прибутковими [4].

В таблиці 1 наведені статистичні дані щодо затратності та рентабельності виробництва молока на підприємствах тваринницької галузі та у індивідуальних господарствах населення.

**Таблиця 1.** Економічний аналіз виробництва молока в Україні

Роки	Закупівельна ціна, грн/т		Витрати виробництва, грн/т		Рентабельність, %	
	СГП	Господарства населення	СГП	Господарства населення*	СГП	Господарства населення*
2010	2973	2296,8	2521,6	2521,6	17,9	-8,9
2011	2309,5	3275,2	1948,9	1948,9	18,5	68,0
2012	2689,7	1905,3	2629,2	2629,2	2,3	-27,5
2013	3337,4	2333,1	2937,9	2937,9	13,6	-20,6
2014	3498,8	2424,9	3152,1	3152,1	11	-23,1
2015	4227,1	2840,8	3754,1	3754,1	12,6	-24,3
2016	5277,3	3529,9	4464,7	4464,7	18,2	-20,9
2017	6803,8	4788,8	5361,5	5361,5	26,9	-10,7
2018	7385,9	4758	6361,7	6361,7	16,1	-25,2

\* - розрахунок автора

На основі цих даних ми оцінили рентабельність виробництва молока у господарствах населення. Для цього ми прийняли припущення, що затратність утримання корів на підприємствах і у приватному секторі однакова. Як показали наші розрахунки при наявних закупівельних цінах (дані взяті середні по Україні) рентабельність виробництва молока у

приватному секторі негативна і знаходиться на рівні - 25%. Якщо врахувати, що затратність утримання корів у приватних господарствах насправді є вищою від аналогічного показника для підприємств, то рентабельність виробництва молока в індивідуальному секторі буде ще меншою на 10% – 15%.

Реалізація подальшого розвитку молокопереробної промисловості України залежить від багатьох внутрішніх та зовнішніх факторів. На рис. 12 представлено узагальнення результатів,

проведеного на основі SWOT-аналізу сильних та слабких сторін галузі, можливостей і загроз її розвитку в умовах активізації інтеграційних процесів.

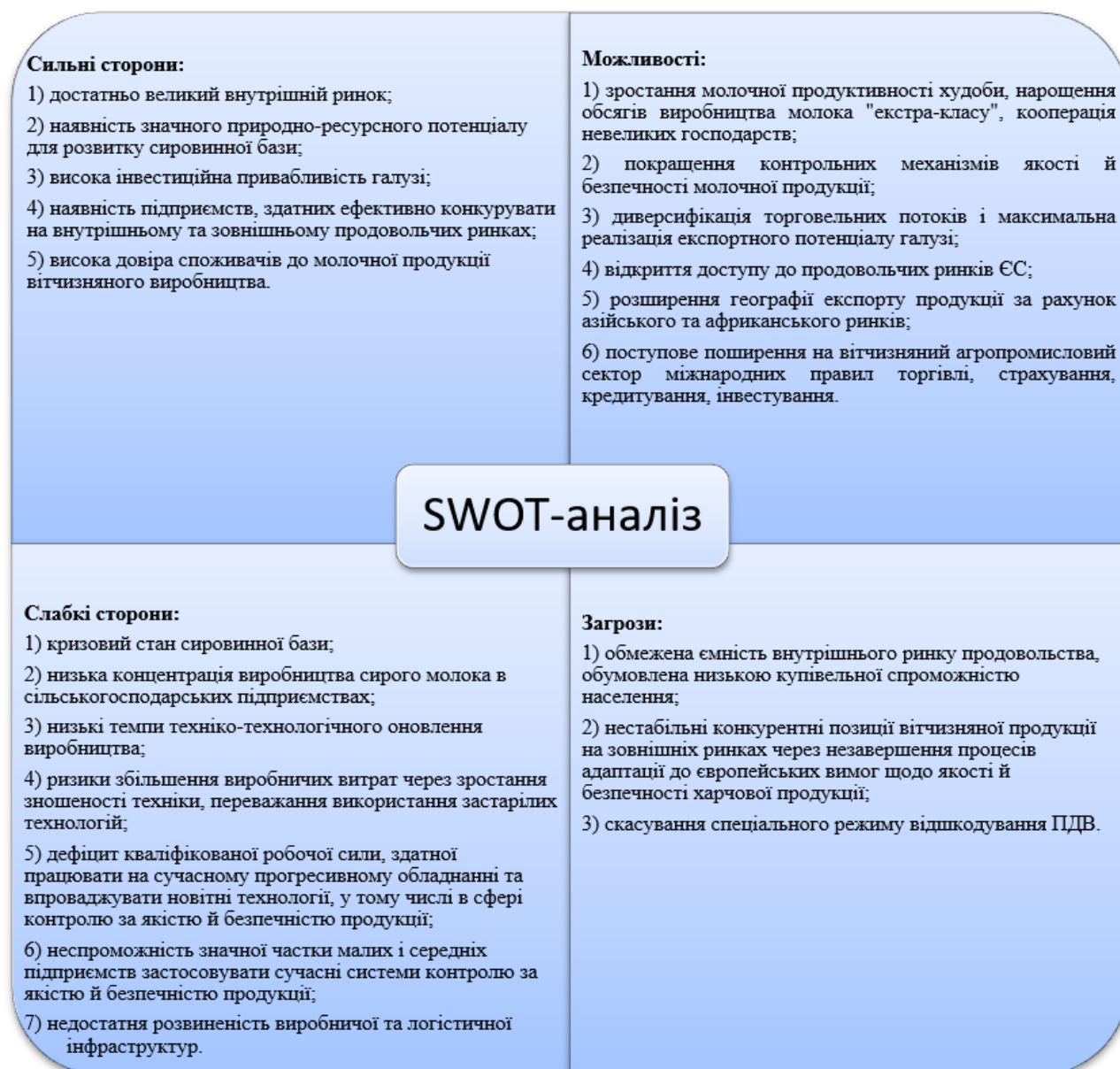


Рис. 12. SWOT-аналіз молочної промисловості України [8, 11, 12, 13]

З огляду на отримані результати SWOT-аналізу молочної промисловості України, можна ідентифікувати стан українського молочного ринку як такий, що досить активно розвивається та має всі шанси в найближчій перспективі увійти в п'ятірку країн, які динамічно нарощують молочний напрям. Використання сильних сторін молочного сектору та його потенційних можливостей, зокрема: зростання молочної продуктивності худоби, нарощення обсягів виробництва молока "екстра-класу", покращення контрольних механізмів якості й безпечності молочної продукції, поступове поширення на вітчизняний агропромисловий сектор міжнародних правил торгівлі, страхування, кредитування, інвестування, дозволить вже у короткостроковій перспективі

здійснити диверсифікацію торговельних потоків і максимально реалізувати експортний потенціал галузі, розширивши доступ до продовольчих ринків ЄС, азійського та африканського ринків.

#### Висновки та перспективи подальшого розвитку

На сьогодні в Україні присутні дві протилежні тенденції – тенденція до зростання надоїв та тенденція до скорочення молочного стада. Використовуючи метод Брауна першого порядку, представлено прогноз зростання надоїв та скорочення поголів'я корів. На основі цих прогнозів ми отримали прогноз щодо скорочення кількості виробленого молока у найближчі

три роки. Згідно з отриманим прогнозом, виробництво молока в Україні у 2020 році становитиме 9,85 млн тонн, у 2021 році – 9,68 млн тонн. Разом з тим, Україна має достатній потенціал для того, щоб не втрачати лідируючі позиції на світовому

продовольчому ринку та, адаптуючись до нових внутрішніх та зовнішніх умов, знаходити алгоритми поєднання загальних конкурентних переваг національної економіки в цілому та власних внутрішніх переваг.

### Список літератури

1. Белінська Н. С., Лесько О. Й. Економічна ефективність діяльності молокопереробних підприємств в період ринкових трансформацій в Україні (1991–2007 роки) : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2012. 280 с.
2. Вісник молочників. № 1 (85), 31 січня 2019 р. URL: <http://www.ukrmlprom.kiev.ua/ua/analitika/shchomisyachna-analitika/category/2019> (дата звернення: 05.06.2019).
3. Державна служба статистики України : веб-сайт. URL : <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 05.06.2019).
4. Дроздова В. А., Векшина А. П. Розвиток молокопереробної галузі: сьогодення та перспективи. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2018. Вип. 22. Ч. 1. С. 101–105. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/24275> (дата звернення: 04.02.2019).
5. Дудар Т. Маркетингове забезпечення в системі міжгалузевої взаємодії суб'єктів молокопродуктового підкомплексу АПК України. *Вісник Тернопільського національного економічного університету*. Тернопіль, 2015. Вип. 2. С. 28–38.
6. Закон України "Про молоко та молочні продукти" від 24 червня 2004 року №1870–IV. Законодавство України : веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1870-15>
7. Кернасюк Ю. Молочний сектор: реалії і перспективи. *Агробізнес сьогодні*. 2015. № 6. С. 10–12. URL: <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/7896-molochnyi-sektor-realii-i-perspektyvy.html> (дата звернення: 12.12.2019).
8. Купчак П. М. Харчова промисловість України в умовах активізації інтеграційних та глобалізаційних процесів : монографія. Київ : Рада по вивч. прод. сил України НАН України, 2009. 152 с.
9. Міністерство аграрної політики та продовольства України : веб-сайт. URL : <https://minagro.gov.ua/ua> (дата звернення: 05.06.2019).
10. Геєць В. М., Клебанова Т. С., Черняк О. І. та ін. Моделі і методи соціально-економічного прогнозування : підручник. Х. : ВД "ІНЖЕК", 2008. 396 с.
11. Попко О. В. До питання реалізації інноваційних напрямків розвитку харчової промисловості України. *Міжнародний науково-виробничий журнал "Сталий розвиток економіки"*. Вип. 4 (41), 2018р. С. 47–55.
12. Попко О. В. Маркетингове дослідження світового ринку молочної продукції та місця України в ньому. *Вісник економічної науки України*. Київ : Академія економічних наук України, Інститут економіки промисловості НАН України, 2019. Вип. 1 (36). С. 106–112.
13. Пропозиції до плану першочергових дій з розвитку промисловості України [Електронний ресурс]. URL : <https://www.uifuture.org/publications/news/22080-plan-po-razvitiu-promyslennosti-ukrainy-doklad-uif-dla-minekonomiki-2017> (дата звернення: 14.10.2018).
14. Річний надій на корову в 2018 році зріс до 6054 кг [Електронний ресурс]. URL : <https://agravery.com/uk/posts/show/ricnij-nadij-na-kogovu-v-2018-roci-zris-do-6054-kg> (дата звернення: 04.02.2019).
15. Смолінський В. Б., Гнаткович О. Д. Підприємництво в АПК: суть та тенденції формування ринку молока : монографія. Львів, 2009. 209 с.
16. Хомюк Н. Л., Грицюк П. М. Математичне моделювання структурних змін у населенні України на сільських територіях. *Сталий розвиток економіки*. 2019. № 3 (44). С. 98–104.
17. Експорт молочної продукції [Електронний ресурс]. URL : <https://www.segodnya.ua/economics/enews/skolko-molochnyh-produktov-prodala-ukraina-nazvany-glavnye-strany-pokupateli-1254460.html> (дата звернення: 16.04.2019).
18. Ukrstat.org : веб-сайт. URL : <https://ukrstat.org/uk> (дата звернення: 05.06.2019).
19. Human Development Reports. URL : <http://hdr.undp.org/en/composite/HDI> (дата звернення: 05.06.2019).

### References

1. Belinskaya, N. S., Les'ko, O. I. (2012), *Economic efficiency of dairy enterprises in the period of market transformations in Ukraine (1991-2007)* [Ekonomiczna efektyvnist' diyal'nosti molokopererobnykh pidpryyemstv v period rynkovykh transformatsiy v Ukraini (1991–2007 roky)] : monograph, Vinnytsia : National Technical University, 2012. 280 p.
2. The dairy herald [Visnyk molochnykiv], No. 1 (85), January 31, 2019, available at : <http://www.ukrmlprom.kiev.ua/ua/analitika/shchomisyachna-analitika/category/2019> (last accessed 05.06.2019).
3. State Statistics Service of Ukraine : website, available at : <http://www.ukrstat.gov.ua/> (last accessed 05.06.2019).
4. Drozdova, V. A., Vekshyna, A. P. (2018), "Development of milk processing industry: today and prospects", *Scientific Bulletin of Uzhgorod National University. International economic relations and the world economy*, No. 22, P. 1, P. 101–105, available at : <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/24275> (last accessed 04.02.2019).
5. Dudar, T. (2015), "Marketing support in the system of interbranch interaction of subjects of dairy subcomplex of agroindustrial complex of Ukraine" ["Marketynhove zabezpechennya v systemi mizhhaluzevoyi vzayemodiyi sub'yektiv molokoproduktovoho pidkompleksu APK Ukrayiny"], *Herald of Ternopil National Economic University*, Vol. 2, P. 28–38.
6. Law of Ukraine (2004), "On Milk and Dairy Products", dated June 24, 2004 No. 1870 – IV, Legislation of Ukraine : website, available at : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1870-15>
7. Kernasyuk, Y. (2015), "The dairy sector: realities and perspectives" ["Molochnyy sektor: realiyi i perspektyvy"], *Agribusiness today*, No. 6, P. 10–12, available at : <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/7896-molochnyi-sektor-realii-i-perspektyvy.html> (last accessed 12.12.2019).
8. Kupchak, P. M. (2009), *Food industry of Ukraine in the conditions of activation of integration and globalization processes* [Kharchova promyslovisht' Ukrayiny v umovakh aktyvizatsiyi intehtratsiynykh ta hlobalizatsiynykh protsesiv] : monograph, Kyiv : Council for the Study Continued of the Forces of Ukraine, NAS of Ukraine, 152 p.

9. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine [Ministerstvo ahrarynoyi polityky ta prodovol'stva Ukrainy] : website, available at : <https://minagro.gov.ua/ua> (last accessed 05.06.2019).
10. Geyets, V. M., Klebanova, T. S., Chernyak, O. I. and others (2008), *Models and methods of socio-economic forecasting [Modeli i metody sotsial'no-ekonomichnoho prohnuzuvannya]* : a textbook, Kharkiv : VD "INZHEK", 396 p.
11. Popko, O. V. (2018), "On the issue of realization of innovative directions of development of food industry of Ukraine" ["Do pytannya realizatsiyi innovatsyinykh napryamkiv rozvytku kharchovoyi promyslovosti Ukrainy"], *International scientific-production journal "Sustainable development of economy"*, No. 4 (41), P. 47–55.
12. Popko, O. V. (2019), "Marketing Investigation of the World Market of Dairy Products and Seat in Ukraine", *Scientific journal "Herald of the Economic Sciences of Ukraine"*, No. 1 (36), P. 106–112.
13. *Proposals to the Priority Action Plan for Industry Development of Ukraine* [Electronic resource], available at : <https://www.uifuture.org/publications/news/22080-plan-po-razvitiu-promyslennosti-ukrainy-doklad-uif-dla-minekonomiki-2017> (last accessed 14.10.2018).
14. *The annual cow hope in 2018 has grown to 6054 kg* [Electronic resource]. available at : <https://agravery.com/uk/posts/show/ricnij-nadij-na-korovu-v-2018-roci-zris-do-6054-kg> (last accessed 04.02.2019).
15. Smolinsky, V. B., Hnatkovich, O. D. (2009), *Entrepreneurship in agriculture: the nature and trends of the milk market formation* : monograph, Lviv, 209 p.
16. Khomyuk, N. L., Grytsyuk, P. M. (2019), "Mathematical modeling of structural changes in the population of Ukraine in rural areas" ["Matematychni modelyuvannya strukturnykh zmin u naselenni Ukrainy na sil's'kykh terytoriyakh"], *Sustainable economic development*, No. 3 (44), P. 98–104.
17. "Export of dairy products" ["Eksport molochnoy produktsii"], available at : <https://www.segodnya.ua/economics/enews/skolko-molochnyh-produktov-prodala-ukraina-nazvany-glavnye-strany-pokupateli-1254460.html> (last accessed 16.04.2019).
18. Ukrstat.org : website, available at : <https://ukrstat.org/uk> (last accessed 05.06.2019).
19. Human Development Reports, available at : <http://hdr.undp.org/en/composite/HDI> (last accessed 05.06.2019).

*Надійшла (Received) 10.01.2020*

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Попко Олена Володимирівна** – кандидат економічних наук, доцент, Національний університет водного господарства та природокористування, доцент кафедри маркетингу, Рівне, Україна; email: o.v.popko@nuwm.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3356-6070>.

**Попко Елена Владимировна** – кандидат економічних наук, доцент, Національний університет водного господарства та природокористування, доцент кафедри маркетингу, Рівне, Україна.

**Popko Olena** – PhD (Economics Sciences), Associate Professor, National University of Water and Environmental Engineering, Associate Professor of the Department of Marketing, Rivne, Ukraine.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОБЛЕМ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ МОЛОЧНОГО РЫНКА УКРАИНЫ

**Предметом** исследования статьи являются теоретические, методологические и методические основы формирования и прогнозирования тенденций развития молочного рынка Украины. **Цель работы** – выделение современных проблем развития молочного рынка Украины и прогнозирование тенденций его развития в краткосрочной перспективе. В статье решаются следующие **задачи**: проведение анализа динамики изменения поголовья коров, производства молока и роста количества надоев на одну корову в целом в Украине, а также в разрезе сельскохозяйственных предприятий и хозяйств населения в течение 2010-2018 лет; исследование динамики средних цен покупки молока молокоперерабатывающими предприятиями на отечественном рынке; оценивания качества молока коровьего, которое поступает в переработку, по сортам; осуществление экономического анализа производства молока в Украине, SWOT-анализ молочной промышленности Украины. Используются следующие **методы**: сравнительный и статистический анализ – при исследовании объемов производства молока коровьего в целом в Украине и в разрезе сельскохозяйственных предприятий и хозяйств населения в течение 2010-2018 годов, а также динамики средних надоев на одну корову на среднее поголовье коров, объемов переработки молока, средних закупочных цен на молоко-сырье и качества молока коровьего по сортам; системно-структурный анализ, логическое обобщение – при проведении SWOT-анализа молочной промышленности Украины; экономико-математическое и графическое моделирование – при прогнозировании динамики производства молока, прироста надоев на одну корову в Украине в перспективе на 2020-2022 годы. Получены следующие **результаты**: на молочном рынке Украины сегодня отслеживаются две противоположные тенденции – тенденция к росту надоев и тенденция к сокращению молочного стада. Согласно прогнозу на следующие три года, выполненного по методу Брауна первого порядка, в дальнейшем будет ожидать рост надоев на одну корову при сокращении общего поголовья коров. Вместе с тем, использование сильных сторон молочного сектора Украины и его потенциальных возможностей, выявленных при проведении SWOT-анализа, в частности: рост молочной продуктивности скота, увеличения объемов производства молока "экстра-класса", улучшение контрольных механизмов качества и безопасности молочной продукции, постепенное распространение на отечественный агропромышленный сектор международных правил торговли, страхования, кредитования, инвестирования, позволит уже в краткосрочной перспективе осуществить диверсификацию торговых потоков и максимально реализовать экспортный потенциал отрасли, расширив доступ к продовольственным рынкам ЕС, азиатского и африканского рынков. **Выводы**: В целом можно идентифицировать состояние украинского молочного рынка как таковой, что достаточно активно развивается и имеет все шансы в перспективе войти в пятерку стран-лидеров, которые динамично наращивают молочное направление.

**Ключевые слова**: молочный рынок; операторы рынка; метод Брауна; качество молока по сортам; SWOT-анализ.

## IDENTIFICATION OF PROBLEMS AND FORECASTING TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF THE UKRAINIAN DAIRY MARKET

The **subject** of this article is the theoretical, methodological and methodical basis for the formation and forecasting of trends in the development of the dairy market in Ukraine. The **purpose** of the work is to highlight the current problems of the dairy market of Ukraine and to forecast its development trends in the short term. The following **tasks** are solved in the article: analysis of the dynamics of changes in the number of cows, milk production and growth of milk yields per cow in Ukraine as a whole and in the context of agricultural enterprises and households during 2010-2018; study of the dynamics of average prices for buying milk by dairy enterprises in the domestic market; evaluation of the quality of cow's milk, which is received for processing, for samples; implementation of economic analysis of milk production in Ukraine, SWOT analysis of the dairy industry in Ukraine. The following research **methods** are used: comparative and statistical analysis – in the study of cow's milk production in Ukraine as a whole and in the context of agricultural enterprises and households during 2010-2018, as well as the dynamics of average milk yield per cow per average cow population, milk processing volumes, average purchase prices for raw milk and quality of cow's milk by variety; system-structural analysis, logical generalization - when conducting SWOT-analysis of dairy industry of Ukraine; economic-mathematical and graphical modeling - the first-order Brown method for forecasting the dynamics of milk production, milk yield per cow in Ukraine in the 2020-2022 period. The following **results** were obtained: two opposite tendencies are observed in the dairy market of Ukraine today - the tendency to increase milk yields and the tendency to decrease the dairy herd. For the next three years, based on the first-order Brown method, milk yields per cow are expected to continue to increase as the total number of cows decreases. At the same time, the use of the strengths of the dairy sector of Ukraine and its potential opportunities revealed during the SWOT-analysis, in particular: increase of dairy cattle productivity, increase of extra-class milk production, improvement of control mechanisms of quality and safety of dairy products, gradual expansion for the domestic agro-industrial sector of international rules of trade, insurance, crediting, investing, will allow to diversify trade flows already in the short-term perspective most realize the export potential of the industry, expanding access to EU food markets, Asian and African markets. **Conclusions:** On the whole, we can identify the state of the Ukrainian dairy market as one that is quite actively developing and has every chance of entering the top five countries that are dynamically increasing the dairy industry in the near future.

**Keywords:** dairy market; market operators; the Brown method; quality of milk by grades; SWOT analysis.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Попко О. В. Ідентифікація проблем та прогнозування тенденцій розвитку молочного ринку України. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.068>.

Popko, O. (2020), "Identification of problems and forecasting trends in the development of the Ukrainian dairy market", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.068>.

O. RESHETNYAK

## MODELING RATING OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE COUNTRIES

The **subject** of the article is rating assessment and development of recommendations on management of scientific and technological development of the countries. The **purpose** of the article is to develop an index that assesses the scientific and technological potential, the results of scientific and technological activities and the pace of changes in the scientific and technological development of different countries of the world. The following **tasks** are solved in the article: the model of rating estimation of scientific and technical development of the countries of the world is developed; the countries of the world are classified depending on a level of their scientific and technical development; recommendations on development of scientific and technical potential of the countries depending on the chosen groups are given. The following **methods** are used: indexing method, ranking and grouping. The following results were obtained: the calculations possible to identify three groups of countries according to the level of their scientific and technological development: leaders, potential leaders and "overtaking" countries. Main result of the project is to promote the development of the scientific and technological potential, to demonstrate the insignificant results of the scientific and technological activity, and to reduce the low level of development of new technologies. For each of the above groups of countries, recommendations have been made for raising the level of their scientific and technological development. **Conclusions:** the current stage of the world's technological development creates new opportunities for the countries of the world to ensure their sustainable growth. Therefore, the creating and maintaining the potential of scientific and technological development, coupled with an adequate government policy of economic development, opens up tremendous opportunities for the countries to ensure global competitiveness. The study presented provides general recommendations for individual countries to improve the processes of managing scientific and technological potential of individual groups of countries. The obtained results can become the basis for the concept and strategy development of scientific and technological development of different countries of the world.

**Keywords:** science; scientific and technological development; countries of the world rating; simulation.

### Introduction

At the moment, the economic growth of countries is largely dependent on the creation of new innovative technologies and industries based on cutting-edge advances in science and scientific knowledge. Scientific and technological development is one of the main priorities of state policy in many countries of the world, so the problem of assessing and determining the level of a country's scientific and technological development in relation to that of other countries based on ratings by various indexes is of particular importance. In the conditions of globalization of the world economy, implementation of the strategy of sustainable development of the leading economies of the world, understanding of the role of science in a particular country in comparison with that in other countries can contribute to its more dynamic development and ensuring better grounded decisions in the strategic management of the scientific and technical sphere, substantiating reasons for its support and financing.

International ratings can serve as a tool for evaluating the government performance in various aspects of their activities as compared to that of other countries. In addition, international ratings influence the governments' consistent activity for the development of their countries. International ratings show the level of a country's development and its effectiveness in various fields, such as: innovation, information technologies, national economy, the social sphere, defining the living standards, etc.

But, as a show of analysis, there is no index, which is the result of the development of science in the rest of the world. There are many indexes, which include the evaluation of the scientific development, such as the

warehouse part of the foreign indexes, which characterize the scientific and technological development, the competitive ability of the region, the level of economic development, human resources, only. That is the development of the index, which is bi-imaging mill of scientific development in the situation of intensification of the scientific knowledge on the zoom of the social-economical medium and the problems of the development of science [1], and the development of recommendations for the management of the development of scientific and technological potential of the country is relevant.

### Analysis of recent research and publications

The development of the region's scientific and technological level of the development of the science of the world, on the appendix, S. Anholt, A. Gani [2], M. Desai [4], M. Porter [5], M. Shahab [6] and others.

In scientific literature, technological changes have long been regarded as one of the main drivers of economic growth (Jones [7], Broughel & Thierer [8], Komkov [9]). A large number of scientists around the world have been engaged in analyzing the factors contributing to scientific and technological development at three different levels of analysis. Macro-level studies have been considered in the social, economic, and political aspects (Uzunidis & Boutillier [10], Cozzens [11]). On the mezzanine level, the influence of the distribution of state funding for research, educational attainment, and scientific training has been studied (Porter [5]). At the microlevel, the relationships between the indicators of scientific and technological progress and the level of the researchers' qualification, as well as between the organization of the research process and the age of the researcher have been looked into (Wang & Li [12]). Most scientists consider the levels of

education, research and development and the amount of education, research and development funding to be the main drivers of technological development. Human capital and its development are seen as a source of shaping the country's scientific and technological potential (Diebolt & Hippe [13], Kyzym [14]). The influence of the level of funding on the level of scientific and technical performance has also been proven (Checchi [15], Rosenbloom [16]). The number of registered patents and the number of publications in research journals (Korzhavykh [17], Weingart [18]) are viewed by many scientists as an important factor affecting scientific results. The outcomes of scientific and technological development are influenced by a demand for high-tech products and the scope of high-tech products exports (Siyabola, Adeyeye, Olaopa [19]).

Thus, it is possible to reach a conclusion that the level of the scientific and technological development of the countries of the world is influenced by a number of factors. In the meantime, all the factors of the scientific and technological development of the economy and the visa were not conducted.

### The purpose and objectives of the publication

The purpose of the article is to develop an index that assesses the scientific and technological potential, the results of scientific and technological activities and the

pace of changes in the scientific and technological development of different countries of the world.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- to develop a model of rating assessment of scientific and technical development of countries of the world;
- to classify the countries of the world depending on their level of scientific and technological development;
- give recommendations on the development of scientific and technological potential of the world countries depending on the selected groups.

This will allow not only to rank and group the countries of the world by these parameters, but also to suggest recommendations for their further scientific and technological development, which is very important in the modern globalized world.

### Materials and methods

The method for calculating the Scientific and Technological Development Index, which is proposed in this paper, is based on the determining its three main components (fig. 1): the sub-index of the potential of scientific and technological development, the sub-index of the results of scientific and technological development and the sub-index of scientific and technological growth.

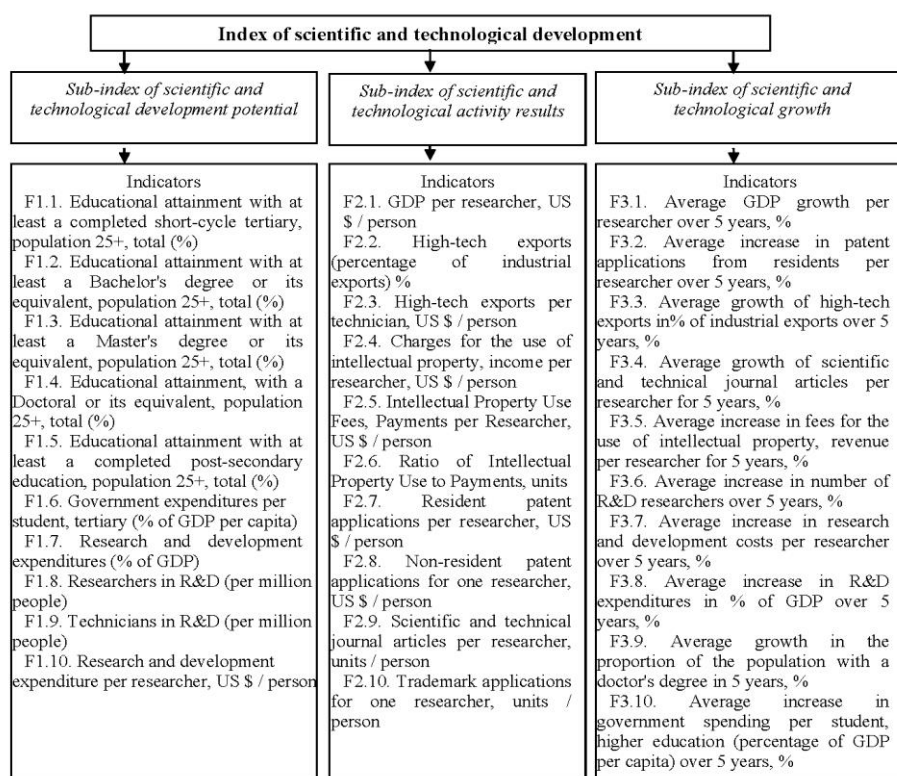


Fig. 1. Model of calculating the index of scientific and technological development

Source: own modelling

The sub-index of the scientific and technological development potential characterizes potential opportunities in the formation of scientific resources through two components: education (opportunities for

training highly qualified specialists) and science (opportunities for the development of scientific potential due to availability of highly qualified specialists and the funding of scientific research).

The sub-index of the scientific and technological activity results characterizes the results of scientific activity through the creation of a scientific product (patents, articles in scientific journals), the use of results of intellectual property and income from high-tech exports) characterizes the results of scientific activity through the creation of a scientific product (patents, publications in scientific journals), the use of the results of intellectual property and earnings from high-tech exports).

The sub-index of scientific and technological growth characterizes the dynamics of the scientific and technological potential growth and the results of scientific and technological activity.

In calculating The Science and Technology Growth Index (ISTD), only the hard data of 21 variables are used, based on the quantitative data available from the open World Bank database. The World Bank database provides data for 217 world economies. However, not all of the indicators that were singled out for the purpose of index calculation contain information on all the countries of the world included into the database. Also, for some indicators the data for after 2016 are missing. When calculating index indicators, the following assumption was made: if there are no data for more than 4 indicators across the country, then it is excluded from further

ranking; if there are no data for less than 4 indicators - the calculation is adjusted depending on the number of indicators included in the calculating indices and sub-indices for the given country.

The Science and Technology Development Potential Index includes 10 indicators available from the World Bank database. Indicators F1.1 – F1.9 are directly indicators presented in the World Bank database. Indicator F1.10 (Research and Development expenditure per researcher, US \$ / person) calculated on the basis of World Bank data as:

$$F1.10 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_3 \cdot x_4}, \quad (1)$$

where  $x_1$  – is the Research and development expenditure (% of GDP),  $x_2$  – is the GDP (current US \$),  $x_3$  – is the Researchers in R&D (per million people),  $x_4$  – is the Population (in millions of people).

The sub-index of the results of scientific and technological activity includes 10 indicators, whose characteristics and sources, regarding the calculation of the indicators, are given in table 1.

**Table 1.** Characteristics of the indicator and the source of information pertaining to the calculation of indicators included into the sub-index of the scientific and technological development potential

Indicator	Calculations	Comments
F2.1. GDP per researcher, US \$ / person	$F2.1 = \frac{x_2}{x_3 \cdot x_4}$	where $x_2$ – is the GDP (current US \$), $x_3$ – is the Researchers in R&D (per million people), $x_4$ – is the Population (in millions of people)
F2.2. High-technology exports (current US\$), %	$F2.2 = x_5$	where $x_5$ – is the High-technology exports (current US \$)
F2.3. High-tech exports per technician, US \$ / person	$F2.3 = \frac{x_5}{x_3 \cdot x_4}$	where $x_5$ – is the High-technology exports (current US \$), $x_3$ – is the Researchers in R&D (per million people), $x_4$ – is 1 million people
F2.4. Fees for Intellectual Property Use, Researcher Revenue, US \$ / person	$F2.4 = \frac{x_6}{x_3 \cdot x_4}$	where $x_6$ – is the Charges for the use of intellectual property, receipts (BoP, current US\$), $x_3$ – is the Researchers in R&D (per million people), $x_4$ – is the Population (in millions of people)
F2.5. Intellectual Property Use Fees, Payments per Researcher, US \$ / person	$F2.5 = \frac{x_7}{x_3 \cdot x_4}$	where $x_7$ – is the Charges for the use of intellectual property, payments (BoP, current US\$), $x_3$ – is the Researchers in R&D (per million people), $x_4$ – is the Population (in millions of people)
F2.6. Ratio of Intellectual Property Use to Payments, unit	$F2.6 = \frac{x_6}{x_7}$	where $x_6$ – is the Charges for the use of intellectual property, receipts (BoP, current US\$), $x_7$ – is the Charges for the use of intellectual property, payments (BoP, current US\$)
F2.7. Patent applications from residents for one researcher, unit / person	$F2.7 = \frac{x_8}{x_3 \cdot x_4}$	where $x_8$ – is the Patent applications, residents), $x_3$ – is the Researchers in R&D (per million people), $x_4$ – is the Population (in millions of people)
F2.8. Non-resident patent applications for one researcher, per person	$F2.8 = \frac{x_9}{x_3 \cdot x_4}$	where $x_9$ – is the Patent applications, non-residents, $x_3$ – is the Researchers in R&D (per million people), $x_4$ – is the Population (in millions of people)
F2.9. Scientific and technical journal articles per researcher, unit / person	$F2.9 = \frac{x_{10}}{x_3 \cdot x_4}$	where $x_{10}$ – is the Scientific and technical journal articles, $x_3$ – is the Researchers in R&D (per million people), $x_4$ – is the Population (in millions of people)
F2.10. Trademark applications for one researcher, unit / person	$F2.10 = \frac{x_{11}}{x_3 \cdot x_4}$	where $x_{11}$ – is the Trademark applications, total $x_3$ – is the Researchers in R&D (per million people), $x_4$ – is the Population (in millions of people)

Source: own compilation

The Science and Technology Growth Sub-index is calculated on the basis of World Bank data from 5 years as the geometric average of growth.

In order to correct the differences in the units of index indicators and ranges of variation, all the 30 variables are normalized in the range [0, 1] with higher scores that represent better results.

Data normalization and scaling is performed with regard to the minimum and maximum values for each variable in the index indicators. For variables in which higher values indicate higher results, the following rationing formula was applied:

$$I_{indicator} = \frac{x_f - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (2)$$

where  $I_{indicator}$  – is the index of the indicator calculated for the individual index indicators,  $x_f$  is the actual value of the individual indicator,  $x_{min}$  is the minimum value of the indicator observed in the countries surveyed,  $x_{max}$  – is the maximum value of the indicator observed in the countries surveyed.

Sub-indices of the potential of scientific and technological development (STP), results of scientific and technological activity (STA) and scientific and technological growth (STG) are calculated as the arithmetic mean of the obtained values of the individual indicators that characterize them.

If it is not possible to calculate individual indicators for some countries, these countries are removed from the ranking, provided that such indicators are more than 3 out of 10 for each sub-index.

The Science and Technology Growth Index (ISTD) is the geometric mean of these three sub-indices:

$$ISTD = \sqrt[3]{STP \times STA \times STG}, \quad (3)$$

where STP is the sub-index of scientific and technological potential; STA – the sub-index of scientific and

technological activities; STG – the sub-index of scientific and technological growth.

On the basis of the proposed method, the index of scientific and technological development for different countries of the world was calculated and their rating established.

### Results of the studies and their discussion

In accordance with the proposed method, the sub-indices of scientific and technological potential, scientific and technological results and scientific and technological growth, as well as the index of the scientific development of the countries of the world were calculated.

First, 217 countries, represented in the World Bank database [20], were considered. As a result of collecting data on the previously identified indicators and their analysis, 72 countries were selected for which the information was most complete. The remaining countries were not included in the ranking because of the lack of practical data that would allow the proposed model to be used to calculate indicators, sub-indices and the overall index. Further, each indicator was normalized, which made it possible to calculate the corresponding sub-indices, according to the formulas above.

The calculation of the Science and Technology Potential Sub-index (STP) allowed ranking 72 countries of the world according to their scientific and technological potential, which was assessed by their educational potential from the point of view of possibilities of training their personnel, including top-level personnel, as well as their scientific potential, which reflects the number of researchers and technicians engaged in the economy of the country and the scale of financing.

The ranking of the countries of the world on the basis of the calculated sub-index of scientific and technological potential is given in table 2.

**Table 2.** Ranking the countries of the world by the sub-index of scientific and technological potential

Position	Country	Evaluation	Position	Country	Evaluation	Position	Country	Evaluation
1	Sweden	0.742	25	Spain	0.383	49	Bulgaria	0.235
2	The USA	0.637	26	The Czech Republic	0.380	50	Serbia	0.233
3	Denmark	0.615	27	Lithuania	0.358	51	Tunisia	0.222
4	Sweden	0.591	28	Italy	0.350	52	Columbia	0.218
5	Singapore	0.572	29	Poland	0.342	53	Uzbekistan	0.212
6	Republic of Korea	0.570	30	Portugal	0.330	54	Chile	0.211
7	Israel	0.567	31	Cyprus	0.323	55	Madagascar	0.208
8	Luxemburg	0.561	32	Georgia	0.319	56	Moldova	0.207
9	Norway	0.557	33	Lithuania	0.318	57	Argentina	0.207
10	Finland	0.550	34	Hong Kong, China	0.302	58	Mexico	0.199
11	Germany	0.543	35	The Republic of Slovenia	0.289	59	Malaysia	0.194
12	The United Arab Emirates	0.538	36	Greece	0.284	60	India	0.187
13	Japan	0.537	37	Hungary	0.283	61	Romania	0.179
14	Australia	0.529	38	Costa-Rica	0.279	62	Montenegro	0.157
15	Belgium	0.523	39	The Russian Federation	0.279	63	Uruguay	0.148

End the **Table 2.**

16	Austria	0.520	40	China	0.279	64	Egypt	0.135
17	Canada	0.510	41	Brazil	0.267	65	Philippines	0.134
18	The Netherlands	0.509	42	Ecuador	0.260	66	Morocco	0.119
19	Slovenia	0.495	43	Malta	0.257	67	Kazakhstan	0.090
20	The UK	0.473	44	Panama	0.254	68	Pakistan	0.087
21	Ireland	0.452	45	Croatia	0.249	69	South Africa	0.084
22	France	0.447	46	Turkey	0.249	70	Salvador	0.067
23	New Zealand	0.407	47	Ukraine	0.238	71	Bosnia and Herzegovina	0.050
24	Estonia	0.388	48	Venezuela	0.236	72	Guatemala	0.043

Source: own compilation

According to the data calculated on the sub-index of the country's scientific and technological potential, the countries were divided into 3 subgroups, namely: leaders (STP > 0,5), potential leaders (STP 0,49-0,2), and "overtaking" countries (STP <0,2).

Leaders are countries with a high scientific and technological potential, they have an advanced system of training of highly qualified personnel, the governments of those countries allocate considerable funds for financing their educational and scientific activities. Those countries have a high scientific and technological potential to develop and implement the results of their own scientific and technological activity.

Potential leaders are countries with a sufficient scientific and technological potential, they realize the importance of training highly qualified personnel, the governments of these countries allocate funding for educational and scientific activities, but not enough to make them leaders in scientific and technological development, for training highly qualified personnel is not a major priority for the country's development. These countries have a sufficient scientific and technological potential to develop and implement their own scientific and technological output, but they need increased funding to build and strengthen their scientific and technological potential.

"Overtaking" countries are countries with a low scientific and technological potential, they have an underdeveloped system of training highly qualified personnel, the governments of these countries do not allocate sufficient funds to finance their educational and

scientific activities, and higher education is not well-developed.

Such countries do not have sufficient scientific and technological capacity to develop and implement the results of their scientific and technological activity and their governments need to pay more attention to financing and training highly qualified personnel.

According to the ranking and grouping of the countries of the world, Ukraine is ranked 47th out of 72 countries. Ukraine has been classified as a country with a sufficient scientific and technological potential for development, whose government is not paying attention to the system of training highly qualified personnel, but does not allocate funding for its development sufficient for the country to become a leader in scientific and technological development.

Calculation of the Sub-Index of Scientific and Technological Activities (STR) allowed to rank 72 countries in accordance with the scientific and technological results obtained, which were evaluated by the results of the scientific and technological activity of their researchers on the basis of calculating the number of applications for patents by residents and non-residents of the country, applications for trademarks, the number of articles in scientific and technical journals, the revenues and payments gained from the use of intellectual property per researcher, as well as the share of high-tech export in the structure of the products trade calculated per one technician. The ranking of the countries of the world on the basis of the calculated sub-index of the results of scientific and technological activities is given in table 3.

**Table 3.** Ranking of countries in the world by the index of the results of scientific and technological activity

Position	Country	Assessment	Position	Country	Assessment	Position	Country	Assessment
1	The USA	0.286	25	Chile	0.102	49	Montenegro	0.061
2	Singapore	0.278	26	Italy	0.098	50	Spain	0.060
3	Luxemburg	0.257	27	Belgium	0.097	51	Greece	0.060
4	Ireland	0.230	28	Hungary	0.094	52	Poland	0.058
5	Switzerland	0.213	29	Bosnia and Herzegovina	0.093	53	India	0.057
6	China	0.190	30	Uruguay	0.089	54	Lithuania	0.056
7	Malta	0.187	31	Australia	0.088	55	Estonia	0.052
8	Panama	0.182	32	Izrael	0.086	56	Venezuela	0.049
9	Finland	0.167	33	New Zealand	0.083	57	Turkey	0.049
10	Japan	0.164	34	Cyprus	0.081	58	Ecuador	0.045
11	Republic of Korea	0.155	35	Costa Rica	0.080	59	The Russian Federation	0.041
12	The Netherlands	0.154	36	Kazakhstan	0.080	60	Portugal	0.040

End the **Table 3.**

13	Columbia	0.153	37	Austria	0.078	61	Argentina	0.038
14	El Salvador	0.143	38	Hong-Kong, China	0.077	62	Madagascar	0.037
15	The Philippines	0.140	39	Canada	0.076	63	Bulgaria	0.036
16	Guatemala	0.140	40	The Czech Republic	0.073	64	Ukraine	0.035
17	Malaysia	0.136	41	Croatia	0.071	65	Serbia	0.035
18	The United Kingdom	0.133	42	Romania	0.070	66	United Arab Emirates	0.031
19	Sweden	0.131	43	Slovenia	0.068	67	Moldova	0.030
20	Germany	0.124	44	Tunisia	0.067	68	Georgia	0.020
21	Mexico	0.113	45	Latvia	0.065	69	Morocco	0.018
22	France	0.113	46	South Africa	0.063	70	Egypt	0.018
23	Denmark	0.107	47	The Slovak Republic	0.062	71	Pakistan	0.016
24	Norway	0.107	48	Brazil	0.061	72	Uzbekistan	0.011

Source: own compilation

According to the data calculated for the sub-index of scientific and technological activity, the countries ranked were divided into 3 subgroups, namely: leaders (STA>0,1), potential leaders (STA 0,09-0,05), and "overtaking" countries (STA<0,05).

Leaders are countries with significant scientific and technological results, are characterized by a high share of high-tech products exports, significant scientific results, active in publication and patent registration activities, and have high revenues from intellectual property.

Potential leaders are countries with a medium-sized scientific and technological output, these countries have a small share of high-tech exports, not very significant scientific results manifested in publication and patent-registration activity, and also have higher payments than benefits from intellectual property.

"Overtaking" countries are those with low scientific and technological results, these countries have a low share of high-tech products exports, insignificant scientific results, manifested in terms of publications and patent registration activity, and also have to pay a lot for intellectual property.

Ukraine has been placed with the countries with low scientific and technological results, a low share of high-

tech products exports, insignificant scientific results per researcher, both in terms of publications and patent activity, and with high intellectual property payments.

The calculation of the Science and Technology Growth Sub-Index (STG) has allowed to rank 72 countries according to the dynamics of their scientific and technological results and growth of their scientific and technological potential.

This sub-index estimates the country's growth rate in the areas such as the results of the scientific and technological activity of researchers based on an estimate of the growth rate of their both residents and non-residents applications for patents and for trademarks, the number of articles published in scientific and technical journals, revenues from the use of intellectual property per researcher, and a growing rate of high-tech exports in food trade. Also included in the assessment, are an increase in the PhD degrees obtained in economics and the funding of higher education, research and development. The ranking of the countries of the world on the basis of the calculated sub-index of scientific and technological growth is shown in table 4.

**Table 4.** Ranking countries by the sub-index of scientific and technological growth

Position	Country	Assessment	Position	Country	Assessment	Position	Country	Assessment
1	China	0.604	25	Georgia	0.460	49	Israel	0.423
2	The United States	0.545	26	The Czech Republic	0.458	50	Canada	0.422
3	Slovakia	0.542	27	Turkey	0.457	51	Austria	0.421
4	Lithuania	0.539	28	The Netherlands	0.452	52	Estonia	0.420
5	Hong Kong, China	0.529	29	France	0.451	53	Columbia	0.414
6	Spain	0.514	30	New Zealand	0.447	54	Republic of Korea	0.413
7	Denmark	0.509	31	Latvia	0.447	55	Greece	0.410
8	Luxembourg	0.505	32	Finland	0.447	56	Philippines	0.409
9	Costa Rica	0.502	33	Morocco	0.446	57	Malaysia	0.403
10	Portugal	0.499	34	Chile	0.445	58	Croatia	0.398
11	Cyprus	0.491	35	Guatemala	0.444	59	Japan	0.395
12	Bulgaria	0.490	36	Malta	0.444	60	Pakistan	0.393

End the **Table 4.**

13	Romania	0.486	37	Bosnia and Herzegovina	0.443	61	Argentina	0.390
14	Slovenia	0.485	38	Uruguay	0.443	62	Panama	0.388
15	El Salvador	0.484	39	Tunisia	0.442	63	Montenegro	0.388
16	Moldova	0.484	40	Italy	0.438	64	Madagascar	0.382
17	Singapore	0.483	41	Hungary	0.436	65	Ireland	0.375
18	Poland	0.481	42	The Russian Federation	0.435	66	Australia	0.373
19	Brazil	0.474	43	Belgium	0.434	67	Serbia	0.363
20	Mexico	0.470	44	Sweden	0.433	68	South Africa	0.362
21	The United Kingdom	0.467	45	Kazakhstan	0.426	69	Uzbekistan	0.348
22	Switzerland	0.465	46	United Arab Emirates	0.425	70	Venezuela, RP	0.342
23	Norway	0.463	47	Ukraine	0.424	71	Egypt	0.336
24	India	0.461	48	Germany	0.423	72	Ecuador	0.324

Source: own compilation

According to the data calculated on the sub-index of scientific and technological growth, the countries were divided into 3 subgroups, namely: leaders (STG > 0,5), potential leaders (STG 0,49-0,4), and "overtaking" countries (STG < 0,4).

Leaders are countries with high growth rates in increasing scientific and technological potential and results of scientific and technological activity. These countries may have a medium or low scientific and technological potential or scientific and technological output, but they are growing at a fairly rapid pace, which is promising for the future.

Potential leaders are countries with average growth rates of scientific and technological potential and scientific and technological activity. These countries may have a high or average scientific and technological potential or scientific and technological output, their average rates of growth, however, may be fraught in the future with slowing down the country's scientific development, as well as the development of the economy as a whole.

These countries may have a high or average scientific and technological potential or the results of

scientific and technological activity, but the low growth is fraught with the risk of losing the status of a scientifically developed and innovative country. These may be "old" economies that use their scientific potential but do not increase it at a high rate; or they may be countries that do not conduct their scientific or technological activities on a regular basis, or such activities may not be among the priorities in the country's development. According to the ranking and grouping of the countries of the world, Ukraine ranked 47th out of 72 countries that were rated. Ukraine was classified as a country with a low growth rate of its scientific and technological potential and low results of scientific and technological activity. This reflects the current situation in the country, in which the number of researchers in recent years has been decreasing, with the results of their scientific activities and the share of high-tech exports of food production decreasing, too.

Also, the general index of scientific and technological development was calculated on the basis of the sub-indices calculated previously. The results of the ranking of the countries of the world in accordance with the calculated index of scientific and technological development are given in table 5.

**Table 5.** Rating countries by the Index of scientific and technological development (ISTD)

Position	Country	ISTD	Position	Country	ISTD	Position	Country	ISTD
1	The USA	0.463	25	New Zealand	0.248	49	Romania	0.183
2	Singapore	0.425	26	Italy	0.246	50	Uruguay	0.180
3	Switzerland	0.419	27	Columbia	0.240	51	Turkey	0.177
4	Luxembourg	0.418	28	Cyprus	0.234	52	The Russian Federation	0.171
5	Finland	0.345	29	The Czech Republic	0.233	53	India	0.170
6	Ireland	0.339	30	Hong Kong, China	0.231	54	Salvador	0.166
7	The republic of Korea	0.332	31	Spain	0.228	55	Bulgaria	0.161
8	The Netherlands	0.329	32	Hungary	0.226	56	Venezuela	0.158
9	Japan	0.327	33	Costa Rica	0.224	57	Ecuador	0.155
10	Denmark	0.322	34	Lithuania	0.221	58	Montenegro	0.154

End the **Table 5.**

11	Sweden	0.322	35	Malaysia	0.220	59	Ukraine	0.153
12	China	0.317	36	Mexico	0.219	60	Argentina	0.146
13	The United Kingdom	0.308	37	Slovak Republic	0.214	61	Kazakhstan	0.145
14	Germany	0.305	38	Poland	0.212	62	Moldova	0.145
15	Norway	0.302	39	Chile	0.212	63	Georgia	0.144
16	France	0.283	40	Latvia	0.210	64	Serbia	0.144
17	Belgium	0.281	41	Estonia	0.204	65	Madagascar	0.143
18	Malta	0.277	42	Brazil	0.198	66	Guatemala	0.138
19	Israel	0.275	43	The Philippines	0.197	67	Bosnia and Herzegovina	0.127
20	Panama	0.262	44	United Arab Emirates	0.191	68	South Africa	0.124
21	Australia	0.259	45	Croatia	0.191	69	Morocco	0.099
22	Austria	0.258	46	Greece	0.191	70	Egypt, Arab Republic	0.094
23	Canada	0.254	47	Tunisia	0.188	71	Uzbekistan	0.093
24	Slovenia	0.253	48	Portugal	0.187	72	Pakistan	0.081

Source: own compilation

According to the data calculated on the R&D index, the countries were divided into 3 subgroups, namely: leaders (ISTD > 0.25), potential leaders (ISTD 0.249-0.2), and "overtaking" countries (ISTD < 0.2).

Leaders in the scientific and technological development are countries that are at the forefront of independent research and implementation of technological innovations, demonstrate significant achievements in the formation and development of the country's scientific and technological potential, have significant scientific and technological achievements and provide for high growth rates of the scientific and technological potential and its results.

Potential leaders of scientific and technological development are countries that invest in the development of their scientific and technological potential, use new technologies, achieve significant scientific and technological results, but their growth rate is lower than that of the leaders.

The countries that are overtaking the others in terms of scientific and technological development are countries that do not sufficiently invest in the development of their scientific and technological potential, show modest results of their scientific and technological activity, have low rates of growth of their scientific and technological potential and insignificant results of their scientific and technological activity.

According to the general index of scientific and technological development, Ukraine ranks 59th out of 72 countries of the world.

The advantages of the proposed index consist in a possibility of evaluating the prospects of scientific and technological development for each of the countries of the world on the basis of a unified source of data provided by the World Bank, in an even distribution of indicators (each sub-index includes 10 indicators), and in dividing the countries into groups in accordance with the values obtained for each sub-index, which makes it possible to

suggest recommendations to each country included in the rating for developing its scientific and technological potential.

### **Conclusions and prospects for further development**

The current stage of the world's technological development creates new opportunities for the countries of the world to ensure their sustainable growth. Therefore, the creating and maintaining the potential of scientific and technological development, coupled with an adequate government policy of economic development, opens up tremendous opportunities for the countries of the world to ensure global competitiveness.

In accordance with the purpose of the research, the article proposes a methodology for calculating an index that evaluates the scientific and technological potential, the results of scientific and technical activities and the rate of change in scientific and technological development of different countries around the world. In order to achieve this goal, a model for rating the scientific and technological development of the world's countries was developed, which, unlike the existing models, takes into account only quantitative indicators taken from a reliable source (the World Bank), takes into account the scale of the economies of the countries being evaluated in accordance with their scientific potential (all the resulting indicators are given to the number of performers of the relevant scientific and technical works), takes into account the rate of change in scientific and technological development of the world's countries (it makes it possible to estimate the rate of change in scientific and technological development of the countries).

The presented method has made it possible not only to determine the place of the countries under assessment in the world scientific and technological development, but also to give recommendations on the development of scientific and technological potential of the countries of

the world depending on their belonging to groups of countries.

Potential leaders of scientific and technological development should work on developing their own scientific potential, attract additional financial resources to fund the training of highly qualified specialists in the promising sectors of the economy, finance scientific and technological research projects, promote the development of the national innovation system, reduce dependence on technologies borrowed from the developed countries of the world, promote the scientific and technological development of industries that are capable of expanding the export of high-tech products.

"Overtaking" countries should increase funding for training specialists and improving their educational

systems, develop ways of disseminating new technologies, promote their own scientific development, solve concrete problems by introducing innovative technologies, and studying the experience of the developed countries in order to build their own scientific and technological potential.

The study presented in the article provides general recommendations for individual countries to improve the processes of managing scientific and technological potential of individual groups of countries. The obtained results can become the basis for the concept and strategy development of scientific and technological development of different countries of the world.

## References

1. Astakhova, E., Reshetnyak, E., Ilchenko, V. (2019), "The Analysis of Trends and the Assessment of the Worldwide High-Tech Production. Development", *IOP Publishing Ltd IOP, Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 272, Issue 3, Section 2. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032218>.
2. Anholt, S.; Govers, R. (2016), "The Good Country Index", available at: <https://www.goodcountry.org/acknowledgements>
3. Gani, A. (2009), "Technological Achievement, High Technology Exports and Growth", *Journal of Comparative International Management*, No. 12 (2), P. 8–36.
4. Desai, M., Fukuda-Parr, S., Johansson, C., & Sagasti, F. (2002), "Measuring the technology achievement of nations and the capacity to participate in the network age", *Journal of Human Development*, No. 3 (1), P. 95–122.
5. Porter, A., Rossini, F. (1985), "Peer review of interdisciplinary research", *Science, Technology and Human Values*, No. 10, P. 33–38.
6. Shahab, M. (2015), "Technology Achievement Index 2015: Mapping the Global Patterns of Technological Capacity in the Network Age", *Elsevier Editorial System for Technology Forecasting & Social Change*, P. 2–35.
7. Jones, C. (2016), "The Facts of Economic Growth Handbook of Macroeconomics", *Handbook of Macroeconomics*, Elsevier, Vol. 2, P. 3–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.hesmac.2016.03.002>
8. Broughel, J. & Thierer, A. (2019), "Technological Innovation and Economic Growth: A Brief Report on the Evidence", *Mercatus Research, Mercatus Center at George Mason University, Arlington, VA*, available at: <https://www.mercatus.org/system/files/broughel-technological-innovation-mercatus-research-v1.pdf>.
9. Komkov, N. (2017), "Scientific and technological development: Limitations and opportunities", *Studies on Russian Economic Development*, Vol. 28, P. 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1075700717050094>
10. Uzunidis, D. & Boutillier, S. (2012), "Globalization of R&D and network innovation: what do we learn from the evolutionist theory?", *Journal of Innovation Economics & Management*, No. 10 (2), P. 23–52. DOI: <https://doi.org/10.3917/jie.010.0023>
11. Cozzens, S., Bobb, K., Bortagaray, I. (2002), "Evaluating the distributional consequences of science and technology policies and programs", *Research Evaluation*, No. 11, P. 101–107.
12. Wang, L. and Li, Z. (2018), "Knowledge Transfer from Science to Technology – The Case of Nano Medical Device Technologies", *Front. Res. Metr. Anal.*, No. 3:11. DOI: <https://doi.org/10.3389/frma.2018.00011>
13. Diebolt, C. & Hippe, R. (2019), "The long-run impact of human capital on innovation and economic development in the regions of Europe", *Applied Economics*, No. 51:5, P. 542–563. DOI: <https://doi.org/10.1080/00036846.2018.1495820>
14. Kyzym, M., Khaustova, V., Reshetnyak, O., Timohova, G., Sakhnenko, O. (2019), "Research Study of the Problems of Human Resourcing of the Scientific and Innovation Entrepreneurship", *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Vol. 8, Issue 3C, P. 213–218. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.C1036.1183C19>
15. Checchi, D., Malgarini, M., Sarlo, S. (2019), "Do performance-based research funding systems affect research production and impact?", *Higher Educ Q*, No. 73, P. 45–69. DOI: <https://doi.org/10.1111/hequ.12185>
16. Rosenbloom, J., Ginther, D., Juhl, T., Heppert, J. (2015), "The Effects of Research & Development Funding on Scientific Productivity: Academic Chemistry, 1990–2009", *PLoS ONE*, No. 10 (9): e0138176. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138176>
17. Korzhavykh, E. (2012), "Scientometric Assessment of the Progress of Innovative Pharmacy in Russia", *Russian Journal of General Chemistry*, Vol. 82, No. 3, P. 527–534.
18. Weingart, P. (2005), "Impact of bibliometrics upon the science system: Inadvertent consequences", *Scientometrics*, No. 62, P. 117–131.
19. Siyanbola, W., Adeyeye, A., Olaopa, O. et al. (2016), "Science, technology and innovation indicators in policy-making: the Nigerian experience", *Palgrave Commun*, Vol. 2, No. 16015. DOI: <https://doi.org/10.1057/palcomm.2016.15>
20. World Bank, W. D. I. (2019), "World Development Indicators", Retrieved 2018, from *The World Bank HYPERLINK*, available at: <http://ddp-ext.worldbank.org/>

Received 15.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Решетняк Олена Іванівна** – кандидат економічних наук, доцент, Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку НАН України, докторант, Харків, Україна; email: [olena.reshetnyak@karazin.ua](mailto:olena.reshetnyak@karazin.ua); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1183-302X>.

**Решетняк Елена Ивановна** – кандидат економічних наук, доцент, Научно-исследовательский центр промышленных проблем развития НАН Украины, докторант, Харьков, Украина.

**Reshetnyak Olena** – PhD (Economics Sciences), Associate Professor, Research Centre for Industrial Problems of Development of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctoral Student, Kharkiv, Ukraine.

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЙТИНГУ НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО РОЗВИТКУ КРАЇН

**Предметом** статті є рейтингова оцінка та розробка рекомендацій щодо управління науково-технічним розвитком країн. **Мета** дослідження – розробити методологію обчислення індексу науково-технічного розвитку та ранжувати країни світу. У статті вирішено такі **завдання**: розробити модель рейтингової оцінки науково-технічного розвитку країн світу; класифікувати країни світу залежно від рівня їх науково-технічного розвитку; надати рекомендації щодо розвитку науково-технічного потенціалу країн залежно від вибраних груп. Застосовуються такі **методи**: індексний метод, ранжирування та групування. Отримані наступні **результати**: наведені розрахунки дозволили визначити три групи країн відповідно до рівня їх науково-технічного розвитку: лідери, потенційні лідери та країни, що «наздоганяючі». Основним результатом проекту є сприяння розвитку науково-технічного потенціалу, демонстрація результатів науково-технічної діяльності та покращення рівня розвитку нових технологій. Для кожної з перерахованих груп країн були зроблені рекомендації щодо розвитку науки та технологій. **Висновки**: сучасний етап світового технологічного розвитку створює нові можливості для країн світу щодо забезпечення їх сталого зростання. Тому створення та підтримка потенціалу науково-технічного рівня в поєднанні з адекватною державною політикою економічного розвитку відкриває перед країнами величезні можливості для забезпечення глобальної конкурентоспроможності. Представлене дослідження дає загальні рекомендації для окремих країн щодо вдосконалення процесів управління науково-технічним потенціалом груп країн. Отримані результати можуть стати основою для розробки концепції та стратегії науково-технічного розвитку різних країн світу.

**Ключові слова**: наука; науково-технічний розвиток; країни світового рейтингу; моделювання.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЙТИНГА НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СТРАН

**Предметом** статьи является рейтинговая оценка и разработка рекомендаций по управлению научно-техническим развитием стран. **Цель** исследования – разработать методологию расчета индекса научно-технического развития и ранжировать страны мира. В статье решены следующие **задачи**: разработана модель рейтинговой оценки научно-технического развития стран мира; классифицированы страны мира в зависимости от уровня их научно-технического развития; даны рекомендации по развитию научно-технического потенциала стран в зависимости от выбранных групп. Применяются следующие **методы**: индексный метод, ранжирование и группировка. Получены следующие **результаты**: приведенные расчеты позволили определить три группы стран в соответствии с уровнем их научно-технического развития: лидеры, потенциальные лидеры и страны "догоняющие". Основным результатом проекта является содействие развитию научно-технического потенциала, демонстрация результатов научно-технической деятельности и улучшение уровня развития новых технологий. Для каждой из перечисленных групп стран были даны рекомендации по развитию науки и технологий. **Выводы**: современный этап мирового технологического развития создает новые возможности для стран по обеспечению их устойчивого роста. Поэтому создание и поддержка потенциала научно-технического уровня в сочетании с адекватной государственной политики экономического развития открывает перед странами огромные возможности для обеспечения глобальной конкурентоспособности. В представленном исследовании даны общие рекомендации для отдельных стран по совершенствованию процессов управления научно-техническим потенциалом групп стран. Полученные результаты могут стать основой для разработки концепции и стратегии научно-технического развития стран мира.

**Ключевые слова**: наука; научно-техническое развитие; страны мирового рейтинга; моделирование.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Решетняк О. І. Моделювання рейтингу науково-технологічного розвитку країн. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.080>.

Reshetnyak, O. (2020), "Modeling rating of scientific and technological development of the countries", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.080>.

О. Є. ФЕДОРОВИЧ, В. В. КОСЕНКО, Ю. Л. ПРОНЧАКОВ

## УПРАВЛІННЯ МОДЕРНІЗАЦІЄЮ ПІДПРИЄМСТВА, ЩО РОЗВИВАЄТЬСЯ В УМОВАХ КОРОТКОСТРОКОВОЇ ПЕРСПЕКТИВИ

**Предметом** дослідження у статті є процес модернізації виробництва в умовах короткострокової перспективи. **Мета** роботи – розробка методів і моделей, які направлені на формування реалістичних цілей реформування підприємства в умовах обмежених можливостей підприємства. В статті вирішуються наступні **завдання**: аналізується довгостроковий процес розвитку підприємства та робиться висновок про невизначеність та великі ризики, що пов'язані з довгостроковим плануванням. Тому сучасні методології реформування пов'язані з проведенням заходів з модернізації виробництва на короткостроковому періоді, на якому спостерігається відносна стабільність зовнішньої конкурентної середовища та є можливість для проведення модернізації. Сформовані основні показники для оцінки конкурентоспроможності підприємства (новизна, якість, обсяг випуску), а також допоміжні показники (затрати, терміни, ризики), які використовуються для оцінки ходу реформування підприємства. У залежності від рівня невизначеності оцінки значень показників завдаються у якісній та кількісній шкалах. Для якісної оцінки вводяться лінгвістичні змінні у вигляді латинських букв. Формується "слово", яке являє собою значення усіх показників (основних та допоміжних) конкурентоздатності для випуску інноваційного виробу з нового портфелю заказів підприємства, що розвивається. Шляхом підпорядкування "слів" виконується вибір та обґрунтування найкращого варіанту заходів з модернізації. У випадку великої кількості ймовірних варіантів модернізації, а також можливості оцінити показники конкурентоспроможності у кількісних шкалах (абсолютні та відносні) проводиться цілочисельна (булева) оптимізація для вибору найкращого рішення для проведення модернізації виробництва. Для оцінки важливості локальних показників конкурентоспроможності розроблено метод, який засновано на теорії планування експериментів. У якості факторів у плані віртуального експерименту, який проводиться експертами, використовуються показники конкурентоспроможності, а у якості відгуків оцінки експертів для кожної комбінації факторів. Використовуються наступні методи: системний аналіз для формування ближчих цілей реформування підприємства у короткостроковій перспективі; метод оцінювання, який засновано на якісному уявленні факторів конкурентоспроможності; метод планування експерименту для оцінки важливості локальних показників конкурентоспроможності; метод цілочисельної оптимізації для вибору заходів з реформування підприємства. Отримано наступні **результати**: обґрунтовано використання реалістичних найближчих цілей у короткостроковій перспективі реформування для мінімізації ризиків підприємства в умовах обмежених можливостей; запропоновані показники конкурентоспроможності підприємства (новизна, якість, обсяг випуску), а також допоміжні (терміни, витрати, ризики); запропонований метод вибору заходів реформування, який засновано на якісних та кількісних оцінках; запропонований метод для оцінки важливості показників конкурентоспроможності за допомогою планів віртуального експерименту; запропонована оптимізаційна модель вибору заходів для реалізації найближчої цілі реформування. **Висновки**. Практичне використання запропонованих методів та моделей: запропонований підхід доцільно використовувати у короткостроковій перспективі реформування підприємства, коли є найбільш реалістичні прогнози з оцінки конкурентної середовища та враховуються обмежені можливості підприємства, що розвивається.

**Ключові слова**: короткострокова перспектива розвитку підприємства; показники конкурентоспроможності підприємства; оптимізація за допомогою лексикографічного упорядкування; вибір варіанту модернізації на основі цілочисельного програмування.

### Вступ

Динаміка змін конкурентної середовища в умовах глобалізації та невизначеності поведінки ринку збуту високотехнологічної продукції приводить до необхідності формування цілей розвитку підприємства у короткостроковій перспективі [1, 2, 3]. Довгострокові прогнози у таких умовах мають великі ризики, які можуть призвести до великих невинуватих затрат, що пов'язані з некоректно обґрунтованими та недосяжними цілями реформування [4, 5, 6]. Тому актуальним є формування реалістичних цілей реформування підприємства з урахуванням короткострокових прогнозів в умовах динамічних змін конкурентної середовища [7, 8, 9].

### Постановка завдання дослідження

Найбільш реалістичні прогнози можна отримати за допомогою методів короткострокового прогнозування, у основі яких лежить комбінована, у

залежності від умов застосування відомих та нових методів прогнозування [10, 11, 12]. Цілі підприємства, що розвивається, в основному, спрямовані на успішне просування продукції в умовах динамічної зміни конкурентної середовища [13, 14, 15]. За результатами прогнозування поведінки ринку можна визначити наступні основні вимоги для забезпечення конкурентоспроможності високотехнологічної продукції, що випускається:

- ступінь новизни (інноваційність) виробу ( $N$ );
- вимоги до якості продукції, що випускається ( $Q$ );
- обсяг випуску продукції ( $V$ );
- терміни випуску з урахуванням затрат часу на модернізацію ( $T$ );
- затрати на реформування підприємства для переходу до випуску нової продукції ( $W$ );
- ризики, що пов'язані з випуском нової продукції ( $R$ ).

Перші три показники ( $N$ ,  $Q$ ,  $V$ ) будемо вважати основними для підвищення конкурентоздатності, а інші ( $T$ ,  $W$ ,  $R$ ) – допоміжними, такими, що

забезпечують виконання перших. Формування нового портфелю замовлень пов'язано із забезпеченням високої конкурентоздатності майбутньої продукції. Але при цьому необхідно оптимізувати витрати, терміни та ризики з урахуванням обмежених можливостей реформованого підприємства. Тому для формування раціонального портфелю замовлень необхідно враховувати як основні ( $N$ ,  $Q$ ,  $V$ ), так і допоміжні показники ( $T$ ,  $W$ ,  $R$ ).

### Рішення завдання дослідження

Будемо вважати, що в світовій практиці існує множина можливих готових рішень для забезпечення виходу на ринок конкурентоспроможної продукції. Ці рішення можуть бути надані у вигляді набору заходів, які необхідно провести при реформуванні підприємства для забезпечення випуску  $j$ -ї конкурентоспроможної спроможної продукції із передбачуваного портфелю замовлень. Проведення кожного  $i$ -го заходу пов'язаного з отриманням значень:  $N_{ji}$ ,  $Q_{ji}$ ,  $V_{ji}$  для виробництва конкурентоздатної продукції, а також виникаючих при цьому витрат, які відображаються у значеннях допоміжних (ті, що забезпечують) показників  $T_{ji}$ ,  $W_{ji}$ ,  $R_{ji}$ , де  $j = \overline{1, m}$ ,  $i = \overline{1, m_j}$ ,  $m$  – кількість нових інноваційних виробів у портфелі замовлень підприємства, що розвивається,  $m_j$  – кількість можливих альтернативних заходів, які необхідно провести для модернізації підприємства, щоб забезпечити випуск  $j$ -ї продукції. В залежності від рівня невизначеності в оцінках показників конкурентоздатності та витрат для виконання нового портфелю замовлень підприємства, що модернізується, можна використати два підходу заснованих на:

- якісних представлень показників,
- кількісних оцінок.

Перший підхід пропонує використання думки експертів у вигляді якісних значень змінних. Скористаємось лінгвістичними змінними, які достатньо просто задаються та дозволяють використати простіший метод, заснований на послідовній оптимізації. В цьому випадку значення лінгвістичної змінної  $x_{ji}$ , пов'язаної з вибором заходів щодо реформування, можна навести у вигляді літери латинського алфавіту. Наприклад, для новизни  $j$ -го виробу, значення лінгвістичних змінних можна представити у наступному вигляді:

- $A$  – високий рівень новизни;
- $B$  – достатній рівень новизни;
- $C$  – задовільна новизна;
- $D$  – низький рівень новизни.

З урахуванням проведених обмежень, які спрямовані на забезпечення конкурентоздатності, експерти можуть зазначити конкретні якісні значення для  $N_{ji}$ ,  $Q_{ji}$ ,  $V_{ji}$ ,  $T_{ji}$ ,  $W_{ji}$ ,  $R_{ji}$ . Враховуючи множину можливих заходів, спрямованих на підвищення конкурентоздатності  $j$ -го виробу з нового портфелю замовлень підприємства, що модернізується, можна

отримати множину можливих варіантів модернізації, наданих за допомогою списку "слів" в кожному з яких знаходиться значення як основних, так і допоміжних показників конкурентоздатності. Бажано, щоб кожне "слово" було впорядковане за значенням показників. Наприклад, будемо вважати, що найбільш важливим показником для забезпечення конкурентоздатності є якість ( $Q_{ji}$ ), далі йде новизна ( $N_{ji}$ ), обсяг випуску ( $V_{ji}$ ), витрати ( $W_{ji}$ ), терміни випуску ( $T_{ji}$ ), ризики ( $R_{ji}$ ). Хай множина альтернативних варіантів заходів для забезпечення конкурентоздатності  $j$ -го виробу складається з п'яти варіантів, які можна навести у вигляді наступного списку "слів":

1.  $B A B C D B$
2.  $A B D B C A$
3.  $B C A B A B$
4.  $A C B D A B$
5.  $B A A B C A$

Впорядкуємо "слова" (алфавітне впорядкування) з урахуванням значень показників конкурентоздатності. Отримаємо:

2.  $A B D B C A$
4.  $A C B D A B$
5.  $B A A B C A$
1.  $B A B C D B$
3.  $B C A B A B$

Звідси видно, що при проведенні заходів щодо модернізації для забезпечення конкурентоздатності  $j$ -го виробу доцільно використовувати 2-й варіант. Найгіршим варіантом є 3-й варіант. При великій кількості альтернативних заходів та можливим завданням кількісних оцінок, доцільно скористатися методом цілочисельної (булевої) оптимізації. В цьому випадку змінна  $x_{ji}$  може приймати два значення:  $x_{ji} = 1$  у випадку використання  $i$ -го варіанту модернізації виробництва для випуску  $j$ -го нового виробу та  $x_{ji} = 0$  – у іншому випадку. Тоді, кожний із показників конкурентоспроможності, можна уявити наступним чином:

$$N = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_j} N_{ji} \cdot X_{ji}; \quad (1)$$

$$Q = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_j} Q_{ji} \cdot X_{ji}; \quad (2)$$

$$V = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_j} V_{ji} \cdot X_{ji}; \quad (3)$$

$$T = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_j} T_{ji} \cdot X_{ji}; \quad (4)$$

$$W = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_j} W_{ji} \cdot X_{ji}; \quad (5)$$

$$R = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_j} R_{ji} \cdot X_{ji}, \quad (6)$$

де  $\sum_{i=1}^{m_j} X_{ji} = 1$ , що означає обов'язковий вибір заходу

для проведення робіт пов'язаних з реформуванням підприємства для випуску  $j$ -го виробу. У цьому випадку, для оцінки важливості показників конкурентоспроможності експерти повинні призначити "ваги" значимості показників:

$$0 \leq \alpha_K \leq 1, \sum_{K=1}^6 \alpha_K = 1. \quad (7)$$

Запропонуємо метод оцінки важливості показників, заснованих на теорії планування експериментів. Як відома, в планах експерименту, кожна строчка являє собою комбінацію факторів. Вихідний стовбець використовується для оцінки відклику, отриманого в результаті експерименту. В якості відклику для нашого випадку використовується оцінка важливості показників  $N, Q, V, T, W, R$ , які будемо використовувати у вигляді факторів експерименту. В плані експерименту значення відкликів будуть задаватися експертами (віртуальний експеримент). Для кожного експерту відокремлений стовбець відклику, в результаті чого отримаємо

стовбці з набором значень відкликів. У факторному експерименті враховуються значення факторів у відносних одиницях (-1; +1), де -1 – відповідає мініимальному (нижня границя) представленню фактору, а верхній +1 - відповідає максимальному значенню (верхня границя) представленню факторів. В якості прикладу розглянемо повний факторний експеримент (ПФЕ), який використаємо для розрахунку "ваг" показників  $N, Q, V$ . Нехай у віртуальному експерименті приймають участь два експерти. В цьому випадку кількість експериментів дорівнює  $M=2^n=8$ , де  $n$  – число факторів (три). ПФЕ припускає повний перебір всіляких комбінацій факторів. Тому його побудова достатньо проста й відповідає генеруванню значень двійкових лічильників, де "0" відповідає "-1" в плані експерименту, а "1" відповідає "+1". Значення трьохпозиційного двійкового лічильника виглядає наступним чином:

1. 0 0 0  
2. 0 0 1  
3. 0 1 0  
4. 0 1 1  
5. 1 0 0  
6. 1 0 1  
7. 1 1 0  
8. 1 1 1.

Тому ПФЕ для трьох факторів буде виглядати наступним чином (рис. 1).

№	$X_1(N)$	$X_2(Q)$	$X_3(V)$	$S_1$	$S_2$	$\bar{S}$
1	-1	-1	-1	1	2	1,5
2	-1	-1	+1	3	2	2,5
3	-1	+1	-1	4	4	4
4	-1	+1	+1	5	5	5
5	+1	-1	-1	5	4	4,5
6	+1	-1	+1	6	5	5,5
7	+1	+1	-1	7	8	7,5
8	+1	+1	+1	9	8	8,5

Рис. 1. Повний факторний експеримент для оцінки "ваг" показників конкурентоздатності

Тут  $S_1$  – значення оцінок відклику першого експерта,  $S_2$  – другого експерта,  $\bar{S}$  – усереднені значення для двох експертів.

Нехай значення відкликів експерти задали у шкалі (0÷10). За результатами оцінювання комбінацій факторів  $X_1, X_2, X_3$  у вигляді показників  $N, Q, V$  можна побудувати регресійну неповноквадратичну залежність у вигляді:

$$S = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3, \quad (8)$$

в якій коефіцієнти  $b_1, b_2, b_3$  у лінійній частині будуть використовуватись для розрахунку "ваг" показників  $N, Q, V$ . Тому нас цікавить тільки оцінки цих показників:

$$b_1 = \frac{\sum_{n=1}^8 \bar{S}_n X_{1n}}{8} \approx 1,6, \quad (9)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{n=1}^8 \bar{S}_n X_{2n}}{8} \approx 1,4, \quad (10)$$

$$b_3 = \frac{\sum_{n=1}^8 \bar{S}_n X_{3n}}{8} \approx 0,5, \quad (11)$$

$$S = 4,9 + 1,6X_1 + 1,4X_2 + 0,5X_3. \quad (12)$$

Пронормуємо значення коефіцієнтів  $b_1, b_2, b_3$ , щоб отримати значення  $0 \leq \alpha_k \leq 1$ :

$$\alpha_1 = \frac{b_1}{\sum_{k=1}^3 b_k} \approx 0,5, \quad \alpha_2 = \frac{b_2}{\sum_{k=1}^3 b_k} \approx 0,4, \quad \alpha_3 = \frac{b_3}{\sum_{k=1}^3 b_k} \approx 0,1, \quad (13)$$

при цьому  $\sum_{k=1}^3 \alpha_k = 1$ .

Звідси видно, що найбільш значим, за думкою експертів, є фактор, пов'язаний з новизною виробу  $\alpha_N = 0,5$ . Середнім за значенням є показник якості  $\alpha_Q = 0,4$ , а найменш важливий показник пов'язаний з забезпеченням випуску продукції,  $\alpha_V = 0,1$ .

Відмітимо, що експерименти, які проводились носять віртуальний характер та засновані на суб'єктивних оцінках експертів. У якості експертів використовують спеціалістів з реформування виробництва. Суб'єктивні оцінки усереднюються шляхом усереднення значень відкликів, що відповідає отриманню колективної оцінки експертів.

Далі, необхідно провести локальну оптимізацію окремих показників. Наприклад, для оптимізації якості продукції необхідно:

$$\max Q, \quad Q = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_i} Q_{ji} \cdot X_{ji}, \quad (14)$$

при виконанні умов:

$$\begin{aligned} N &\geq N', \\ V &\geq V', \\ T &\leq T', \\ W &\leq W', \\ R &\leq R', \end{aligned} \quad (15)$$

де  $N', V', T', W', R'$  – допустимі значення показників  $N, V, T, W, R$ .

Через можливу суперечливість показників  $Q, N, V, T, W, R$  пошук необхідних заходів для проведення робіт зі забезпечення конкурентоспроможності підприємства, що реформується зводиться до необхідності пошуку компромісних рішень. Введемо комплексний показник:

$$F = \alpha_N \cdot N + \alpha_Q \cdot Q + \alpha_V \cdot V + \alpha_T \cdot T + \alpha_W \cdot W + \alpha_R \cdot R. \quad (16)$$

#### Список літератури

1. Клыкков Ю. Н. Ситуационное управление большими системами. М.: Энергия, 1974. 136 р.

Тут  $Q, N, V, T, W, R$  нормовані значення показників, отримані після проведення оптимізації за окремими локальними показниками:

$$N = \frac{N^* - N}{N^* - N'}, \quad (17)$$

$$Q = \frac{Q^* - Q}{Q^* - Q'}, \quad (18)$$

$$V = \frac{V^* - V}{V^* - V'}, \quad (19)$$

$$T = \frac{T - T^*}{T' - T^*}, \quad (20)$$

$$W = \frac{W - W^*}{W' - W^*}, \quad (21)$$

$$R = \frac{R - R^*}{R' - R^*}, \quad (22)$$

$$0 \leq N \leq 1, \quad 0 \leq Q \leq 1, \quad 0 \leq V \leq 1, \quad 0 \leq T \leq 1, \quad 0 \leq W \leq 1,$$

$$0 \leq R \leq 1;$$

$N^*, Q^*, V^*, T^*, W^*, R^*$  – екстремальні значення показників, які отримані у результаті локальної оптимізації.

Для оптимізації  $F$  необхідно знайти:

$$\min F,$$

$$F = \alpha_N \cdot \frac{N^* - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_i} N_{ji} \cdot X_{ji}}{N^* - N'} + \alpha_Q \cdot \frac{Q^* - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_i} Q_{ji} \cdot X_{ji}}{Q^* - Q'} +$$

$$+ \alpha_V \cdot \frac{V^* - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_i} V_{ji} \cdot X_{ji}}{V^* - V'} + \alpha_T \cdot \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_i} T_{ji} \cdot X_{ji} - T^*}{T' - T^*} + \quad (23)$$

$$+ \alpha_W \cdot \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_i} W_{ji} \cdot X_{ji} - W^*}{W' - W^*} + \alpha_R \cdot \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{m_i} R_{ji} \cdot X_{ji} - R^*}{R' - R^*}.$$

#### Висновки

Запропонований підхід направлений на реалізацію короткострокової перспективи модернізації виробництва та дозволяє обґрунтувати і вибрати заходи для реалізації нового портфелю замовлень, для забезпечення випуску конкурентоспроможної продукції підприємства, що реформується.

2. Lindgren M. Bandhold H. Scenario Planning The link between future and strategy. Palgrave Macmillan UK, 2002. 180 p. DOI: 10.1057/9780230511620.
3. Мелёхин В. Б., Шихалиева Н. Ш. Теоретические аспекты эффективного управления поведением социально-экономических объектов в нестабильной окружающей среде. *Интернет журнал "Науковедение"*. 2014. Вып. 4 (23). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/116EVN414.pdf> (дата обращения 11.02.2020).
4. Ямпольский С. М., Костенко А. Н. Ситуационный подход к управлению организационно-техническими системами при планировании операции. *Научные технологии в космических исследованиях Земли*. 2016. Том. 8. № 2. С. 62–69.
5. Uskenbayeva R. K., Kurmangaliyeva B. K., Yedilkhan D. Situational Management for Process Implementation of Working Operations of the Business Process. 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). Hangzhou; China, 2015. P. 292–297. DOI: 10.1109/SICE.2015.7285573.
6. Гуца О. Н., Ельчанинов Д. Б., Порван А. П., Якубовская С. В. Системы поддержки принятия решений в управлении проектами, основанные на качественных методах. *Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Стратегическое управление, управление портфелями, программы и проектами*. 2017. № 3 (1225). С. 82–88. DOI: 10.20998/2413-3000.2017.1225.14.
7. Кравец Р. О. Динамічна координація стратегій мультиагентних систем. Бюлетень Національного університету "Львівська політехніка". 2011. № 699. Р. 134–144.
8. Федорович О. Е., Гайдено О. А., Пуйденко В. А. Использование компонентно-компетентного подхода для формирования кооперации исполнителей инновационного заказа при создании сложной аэрокосмической техники. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 2 (146). С. 54–58. DOI: 10.32620/akt.2018.2.07.
9. Федорович О. Е., Прончаков Ю. Л. Логистика выполнения портфеля заказов высокотехнологической продукции развивающегося виртуального предприятия. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 3 (130). С. 99–102.
10. Roszak M. T. Zarządzanie jakością w praktyce inżynierskiej. *Open Access Library*. 2014. Vol. 1 (31). 150 p.
11. Pawluczuk Ju. K проблеме управления производственными ресурсами предприятия. *Zarządzanie : Teoria i praktyka*. 2011. № 1(3). С. 17–26.
12. Федорович О. Е., Западня К. О., Гайдено О. А. Методы и модели исследования виртуальных производств, ориентированных на выпуск высокотехнологической продукции. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2017. № 1 (136). С. 54–59.
13. Гюльмамедов, Р. Г. Метод построения стратегии в системах ситуационного управления. *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 6. Р. 36–39.
14. Paulsen S., Boens J. Summary of the Workshop on information and communication technologies supply chain risk management. *National Institute of Standards and Technology*. 2012. 21 p.
15. Белл Е. А. Віртуальні підприємства як елемент підвищення інноваційної активності та привабливості малого та середнього бізнесу. *Вісник Хмельницького національного університету: Економічні науки*. 2009. № 1. С. 162–166.

## References

1. Klykov, Yu. I. (1974), *Situational management of large systems [Situacionnoe upravlenie bol'shimi sistemami]*, Moscow, Energy, 136 p.
2. Lindgren, M., Bandhold, H. (2002), *Scenario Planning The link between future and strategy*, Palgrave Macmillan UK, 180 p. DOI: 10.1057/9780230511620.
3. Melekhin, V. B., Shihaliyeva, N. S. (2004), "Theoretical aspects of effective management by behavior of socioeconomic objects in unstable environment" ["Teoreticheskie aspekty effektivnogo upravleniya povedeniem sotsial'no-ekonomicheskikh ob'ektov v nestabil'noy okruzhayushchey srede"], *Internet journal "NAUKOVEDENIE"*, Issue 4 (23), available at : <https://naukovedenie.ru/PDF/116EVN414.pdf> (last accessed 11.02.2020)
4. Yampolsky, S. M., Kostenko, A. N. (2016), "Situational approach to the management of organizational and technical systems during operation planning" ["Situatsionnyi podkhod k upravleniyu organizatsionno-tekhnicheskimi sistemami pri planirovani operatsii"], *High technology in space research of the Earth*, Vol. 8, No. 2, P. 62–69.
5. Uskenbayeva, R. K., Kurmangaliyeva, B. K., Yedilkhan, D. (2015), "Situational Management for Process Implementation of Working Operations of the Business Process", *54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Hangzhou, China*, P. 292–297. DOI: 10.1109/SICE.2015.7285573.
6. Hutsa, O. M., Yelchaninov, D. B., Porvan, A. P., Yakubovskaya, S. V. (2017), "Decision support systems based on qualitative methods for project management" ["Sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v upravlenii proektami, osnovannye na kachestvennykh metodakh"], *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management*, No. 3 (1225), P. 82–88. DOI: 10.20998/2413-3000.2017.1225.14.
7. Kravets, P. O. (2011), "Dynamic coordination of multi-agent systems strategies" ["Dynamichna koordynatsiya stratehii mul'tyagentnykh system"], *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, No. 699, P. 134–144.
8. Fedorovich, O. Ye., Gaydenko, O. A., Puydenko, V. A. (2018), "Use of component-competent approach for cooperation of executors of innovative order during the creation of complex aerospace technique" ["Ispol'zovanie komponentno-kompetentnogo podkhoda dlya formirovaniya kooperatsii ispolnitel'nykh innovatsionnogo zakaza pri sozdani slozhnoi aerokosmicheskoi tekhniki"], *Aerospace technic and technology*, No. 2 (146), P. 54–58.
9. Fedorovich, O. E., Pronchakov, Yu. L. (2016), "Logistics of high-tech product orders stock execution for the growing virtual enterprise" ["Logistika vypolneniya portfelya zakazov vysoko-tekhnologicheskoi produktsii razvivayushchegosya virtual'nogo predpriyatiya"], *Aerospace technic and technology*, No. 3 (130), P. 99–102.
10. Roszak, M. T. (2014), "Zarządzanie jakością w praktyce inżynierskiej", *Open Access Library*, Vol. 1 (31), 150 p.
11. Pawluczuk, Ju. (2011), "Problemy zarządzania zasobami produkcyjnymi przedsiębiorstwa" ["K probleme upravleniya proizvodstvennymi resursami predpriyatiya"], *Zarządzanie : Teoria i praktyka*, No. 1 (3), P. 17–26.
12. Fedorovich, O. E., Zapadnya, K. O., Gaidenko, O. A. (2017), "Methods and models to research the virtual manufactures oriented on the issue of high-tech products" ["Metody i modeli issledovaniya virtual'nykh proizvodstv, orientirovannykh na vypusk vysokotekhnologicheskoi produktsii"], *Aerospace technic and technology*, No. 1 (136), P. 54–59.

13. Gulmamedov, R. G. (2011), "The method of constructing a strategy in situational management systems" ["Metod postroeniya strategii v sistemakh situatsionnogo upravleniya"], *Information and management systems*, No. 6, P. 36–39.

14. Paulsen, S., Boens, J. (2012), "Summary of the Workshop on information and communication technologies supply chain risk management", *National Institute of Standards and Technology*, 21 p.

15. Ball, E. A. (2009), "Virtual enterprises as an element of enhancement of innovation activity and attractiveness of small and medium business" ["Virtual'ni pidpriyemstva yak element pidvyshchennya innovatsiynoi aktyvnosti ta pryvablyvosti maloho ta seredn'oho biznesu"], *Visnyk Khmelnitsky National University : Economic Sciences*, No. 1, P. 162–166.

Надійшла (Received) 15.02.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Федорович Олег Євгенович** – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; email: o.fedorovych@khai.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7883-1144>.

**Федорович Олег Євгеньевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", заведующий кафедрой компьютерных наук и информационных технологий, Харьков, Украина.

**Fedorovich Oleg** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Head of the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

**Косенко Віктор Васильович** – доктор технічних наук, професор, Державне підприємство "Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості", помічник директора з наукової роботи, Харків, Україна; email: kosv.v@ukr.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4905-8508>.

**Косенко Виктор Васильевич** – доктор технических наук, профессор, Государственное предприятие "Южный государственный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт авиационной промышленности", помощник директора по научной работе, Харьков, Украина.

**Kosenko Viktor** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, State Enterprise "National Design & Research Institute of Aerospace Industries", Assistant Director for Research, Kharkiv, Ukraine.

**Прончаків Юрій Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", декан факультету програмної інженерії та бізнесу, Харків, Україна; email: pronchakov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0027-1452>.

**Прончаків Юрий Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", декан факультета программной инженерии и бизнеса, Харьков, Украина.

**Pronchakov Yurii** – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Dean of the Department of Software Engineering and Business Faculty, Kharkiv, Ukraine.

## УПРАВЛЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИЕЙ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ КРАТКОСРОЧНОЙ ПЕРСПЕКТИВЫ

**Предметом** исследования в статье является процесс модернизации предприятия в условиях краткосрочной перспективы. **Цель** работы – разработка методов и моделей, направленных на формирование и реализацию реалистических целей реформирования в условиях ограниченных возможностей предприятия. В статье решаются следующие **задачи**: анализируется долгосрочный процесс развития предприятия и делается вывод о неопределенности и больших рисках, связанных с долгосрочным планированием. Поэтому современные методологии реформирования связаны с проведением мероприятий по модернизации производства на краткосрочном периоде, на котором наблюдается относительная стабильность внешней конкурентной среды и есть условия для проведения модернизации. Сформированы основные показатели для оценки конкурентоспособности предприятия (новизна, качество, объем выпуска), а также вспомогательные показатели (затраты, сроки, риски), которые используются для оценки хода реформирования предприятия. В зависимости от уровня неопределенности оценок, показатели задаются в качественной и количественной шкалах. Для качественной оценки вводятся лингвистические переменные в виде букв латинского алфавита. Формируется "слово", которое представляет собой значение всех показателей (основных и вспомогательных) конкурентоспособности для выпуска инновационного изделия из нового портфеля заказов развивающегося предприятия. Путем упорядочивания "слов" выполняется выбор и обоснование наилучшего варианта мероприятий по модернизации. В случае большого количества возможных вариантов модернизации, а также возможности оценить показатели конкурентоспособности в количественных шкалах (абсолютные и относительные значения) проводится целочисленная (булева) оптимизация для выбора наилучшего решения для проведения модернизации производства. Для оценки важности локальных показателей конкурентоспособности разработан метод, основанный на теории планирования экспериментов. В качестве факторов в плане виртуального эксперимента, который проводится экспертами, используются показатели конкурентоспособности, а в качестве откликов оценки экспертов для каждой комбинации факторов. Используются следующие **методы**: системный анализ для формирования ближайших целей реформирования предприятия в краткосрочной перспективе; метод оценки показателей, основанный на качественном представлении факторов конкурентоспособности; метод планирования эксперимента для оценки важности локальных показателей конкурентоспособности; метод целочисленной оптимизации для выбора мероприятий по реформированию предприятия. Получены следующие **результаты**: обосновано использование реалистических близких целей в краткосрочной перспективе реформирования для минимизации рисков предприятия в условиях ограниченных возможностей; предложены

показатели конкурентоспособности предприятия (новизна, качество, объем выпуска), а также вспомогательные (сроки, затраты, риски); предложен метод выбора мероприятий реформирования, основанный на качественных и количественных оценках; предложен метод для оценки важности показателей конкурентоспособности с помощью планов виртуального эксперимента; предложена оптимизационная модель выбора мероприятий для реализации ближайшей цели реформирования.

**Выводы.** Практическое использование предложенных методов и моделей: предложенный подход целесообразно использовать в краткосрочной перспективе реформирования предприятия, когда наиболее реалистичны прогнозы по оценке конкурентной среды и учитываются ограниченные возможности развивающегося предприятия.

**Ключевые слова:** краткосрочная перспектива развития предприятия; показатели конкурентоспособности предприятия; оптимизация с помощью лексикографического упорядочения; выбор варианта модернизации на основе целочисленного программирования.

## MANAGEMENT OF THE MODERNIZATION OF THE ENTERPRISE DEVELOPING IN THE CONDITIONS OF THE SHORT-TERM PROSPECT

The **subject** of the study in the article is the process of production modernization in the short term. The **purpose** of the work is to develop methods and models that are aimed at the formation of realistic goals of enterprise reformation in the face of limited enterprise capabilities. The following **tasks** are solved in the article: the long-term process of enterprise development is analyzed and the uncertainty and high risks associated with long-term planning are concluded. Therefore, current reform methodologies are linked to short-term production modernization measures, which show the relative stability of the external competitive environment and provide an opportunity for modernization. The main indicators for assessing the competitiveness of the enterprise (novelty, quality, volume of output), as well as ancillary indicators (costs, terms, risks) are used to assess the course of enterprise reforming. Depending on the level of uncertainty, estimates of the values of indicators are given in qualitative and quantitative scales. For qualitative assessment, linguistic variables are introduced in the form of Latin letters. A "word" is formed, it represents the value of all the (core and ancillary) competitiveness indicators for launching an innovative product from a new order portfolio of a developing enterprise. By subordination of "words", the best option of modernization measures is selected and justified. In the case of a large number of probable modernization options, as well as the ability to evaluate the competitiveness indices in quantitative scales (absolute and relative), integer (Boolean) optimization is carried out to select the best solution for production modernization. To assess the importance of local competitiveness, a method has been developed that is based on experiment planning theory. Competitive Expertise is used as a factor in the Expert Experiment Plan, and Expert Evaluation for each combination of factors. The following **methods** are used: system analysis to formulate the immediate goals of enterprise reform in the short term; an assessment method based on a qualitative presentation of competitiveness factors; an experiment planning method for assessing the importance of local competitiveness; integer optimization method for choosing enterprise reform measures. The following **results** were obtained: the use of realistic short-term goals in the short-term reform perspective is minimized to minimize the risks of the enterprise in the conditions of limited opportunities; the proposed indicators of competitiveness of the enterprise (novelty, quality, volume of output), as well as ancillary (terms, costs, risks); a proposed method for selecting reform measures based on qualitative and quantitative assessments; a proposed method for assessing the importance of competitiveness through virtual experiment plans; an optimization model of the choice of measures is proposed to realize the immediate goal of reform. **Conclusions.** Practical application of the proposed methods and models: it is advisable to use the proposed approach in the short term to reform the enterprise, when there are the most realistic forecasts for assessing the competitive environment and taking into account the limited capabilities of the developing company.

**Keywords:** short-term prospect of enterprise development; indicators of enterprise competitiveness; optimization by lexicographic ordering; choice of modernization option based on integer programming.

### Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Федорович О. Є., Косенко В. В., Прончаков Ю. Л. Управління модернізацією підприємства, що розвивається в умовах короткострокової перспективи. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.090>.

Fedorovich, O., Kosenko, V., Pronchakov, Yu. (2020), "Management of the modernization of the enterprise developing in the conditions of the short-term prospect", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 90–96. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.090>.

O. IASTREMSKA

## EDUCATIONAL TOURISM AS A BASIS FOR THE GROWTH OF ECONOMIC ACTIVITY OF THE LABOR MARKET

The **object** of the study is educational tourism as a complex socio-economic phenomenon. The **subject** of the study is the scientific and practical basis, consisting of the theoretical principles of the functioning of educational tourism and methodological support of the impact of educational tourism on the activation of the labor market, taking into account its current situation and legislative support. The **goal** is the improvement of the conceptual and categorical apparatus of educational tourism and the development of scientific and practical proposals for activating the labor market, taking into account existing trends in the development of educational tourism. **Tasks:** to achieve this goal, the article has posed and solved the following main tasks: update the definition of the concept of "educational tourism" taking into account the existing features of its development; propose the main stages of ensuring the activation of the labor market taking into account educational tourism and determine the main directions of its activation. **Methods.** Theoretical and practical analysis of the work of specialists in the field of educational tourism and the functioning of the labor market has proved the need to use such research methods: monographic, analysis and synthesis, structural-logical method, systematic approach, theoretical generalization. **Results.** It is proposed to define the concept of "educational tourism" taking into account various forms of economic activity, length of stay for education, the ability to carry out paid activities, which will increase the validity of employers' proposals for determining the characteristics of jobs in the labor market. Taking into account the refined definition, the main stages and measures of activating the labor market are proposed, which are: activating the economic activity of business entities as a source of foreign exchange earnings from the provision of educational services to foreigners; the growth of the results of inter-industry relations of enterprises that provide additional services; the growth of the results of inter-industry relations of enterprises that provide additional services; the formation of an additional sales market for suppliers of consumer services, expanding the assortment and increasing requirements for the quality of goods and services, which stimulates the creation of new jobs; improving the quality of the workforce through the introduction of the latest training technologies, the flow of funds to expand the infrastructure of the education sector. The main directions of changes in existing negative trends in the economic activity of the labor market are identified: support for regional producers, providing fisheries with the necessary qualifications in accordance with market requirements, the uniform development of regions and the creation of the required educational infrastructure that can provide the labor market with specialists of the required quality and competencies. **Conclusions.** In the definition of the concept of educational tourism, it is advisable to take into account the purpose of the stay, increase the period of visa support and enable educational tourists to engage in economic activities for personal income. In the process of implementing the main stages and measures to activate the labor market, it is advisable to take into account the main market animated effects that arise in the process of obtaining education. As the main directions of intensifying the labor market, economic support should be provided to entrepreneurs, improve the skills of the workforce by improving the quality of education in higher education institutions on the basis of traditional and exclusive training programs.

**Keywords:** educational tourism; labor market; activation; intercultural environment; the latest learning technologies; market animated effects.

### Introduction

According to the Ukraine-2020 Sustainable Development Strategy, approved by the Decree of the President of Ukraine No. 5/201 of 12.01.2015, the draft Sustainable Development Strategy of Ukraine until 2030 "Ukraine - 2030" No. 9015 of 07.08.2018, one of the leading problems that need to be solved are the promotion of increased activity of the population in the implementation of economic relations in general and the labor market in particular, the development of intellectual capital to achieve and enhance the competitiveness of the national economy.

### Formulation of the problem

There are many factors in ensuring the economic activity of the labor market, one of which is tourism and its type – educational tourism, which, through the formation of human resources inflows, can create multiplier market effects on the growth of gross national product and additional regional product, promote job creation, improving the quality of the workforce, increasing the volume of educational services. At the same time, educational tourism has the effect of increasing

competition in the labor market; improving the nature and consistency of the main stages of activation of the functioning of the labor market, taking into account the flows of educational tourism, determining the main directions of development of the labor market in the context of itnoho tourism as a priority area economy.

### Analysis of recent research and publications

There is a significant scientific achievement of domestic and foreign scientists who studied the processes of development of territorial economic systems in the context of the formation of labor supply – this is N.A. Azmuk [1], V.P. Antoniuk [2], G.I. Bashnianin [3], O.Y. Vinskaya [7], V.G. Gerasimenko, V. Dadalko [9], T.B. Tokarskii [19], the results of studies of which were proposals for activation of the labor market to increase economic activity of the population in all sectors of the national economy, including in the field of tourism, the main of which is the growth of investment in creating new jobs, providing preferential loans for creation of small and medium-sized businesses.

N.V. Bibik and G.M. Shapoval studies are devoted to the analysis of international experience in the development of territorial communities and determining

the directions of its implementation in Ukraine, including in the labor market [5]. Since the tourism industry contributes to the globalization of markets, including labor markets, their transnationalization, in the trends of educational tourism, it is advisable to take into account the proposals of A. Shapoval [27], concerning the behavior of transnational corporations regarding the recruitment of qualified workers, their training, regardless of citizenship and the country of education, that is, in the process of implementing educational tourism.

The phenomenon of labor market activation has been investigated in the scientific publications by T. Boeri [23], O.A. Grishnov [8], A. Sapir [26] and others. According to their proposals, it is possible to revise the population grouping for employment and unemployed, which will streamline the calculation of employment and unemployment levels and create an objective basis for the development of programs for activation of the labor market. The emergence of innovative tourism services, which may include educational tourism, was investigated by M.G. Boyko [6], L.N. Larina [24], N.V. Rubtsov [16], and organizational and economic features of providing services in the field of educational tourism, their effective export - A. Alam [21], M.G. Blenhard [22], M.G. Boyko [6], L.N. Larina [24], K.A. Prodan [25].

However, as the research has shown, the vast majority of scientific publications are based on the existing theoretical support for the conceptual-categorical apparatus of educational tourism, which requires updating, retrospective analysis of educational systems, explaining the root causes and consequences, but not proposing measures to stimulate national labor market leading countries.

### **Highlighting previously unresolved parts of a common problem. the goal of the work**

The issues of actualization of the conceptual-categorical apparatus of tourism in general and educational tourism in particular, the state of educational services and their influence on the creation of additional demand for the products of enterprises and the labor force in the host educational tourists of the countries remain insufficiently researched. the labor market, taking into account the flows of educational tourism. The existence of these problems led to the thematic focus of the article, its purpose and objectives.

The purpose of the article is to improve the conceptual and categorical apparatus of educational tourism and to develop scientific and practical recommendations on the activation of the labor market, taking into account existing trends in the development of educational tourism.

In order to achieve this goal, the following main tasks have been formulated and solved in the article:

- update the definition of "educational tourism" taking into account the existing features of its development;
- to propose the main steps of ensuring the activation of the labor market in the light of educational tourism;

- identify the main directions of activation of the labor market in the context of educational tourism.

### **Research materials and methods**

During the research the following basic methods were used: monograph, analysis and synthesis - to actualize the definition of "educational tourism", structural-logical method, systematic approach - to substantiate the main stages and measures of activation of the labor market, taking into account the flows of educational tourism, theoretical generalization - to identify the main directions of activation of the labor market in the context of educational tourism.

### **Results of the studies and their discussion**

In today's digital economy, the main factors in the success of its digital life, which determine the potential of the gross national product, are labor and intellectual capital. It is the intellectualization of the labor market that contributes to its development, activation and positive change. In order to establish these progressive phenomena, it is necessary to take into account current trends prevailing in the labor market and to move the population freely in order to obtain the necessary competitive advantages, which can be obtained through education in the world's leading higher education institutions, which shapes the trends of educational tourism. In the context of the globalization of economic relations that led to the cross-border redistribution of factors of production, it is appropriate to consider the labor market in the light of the migration factor. And the combination of labor migration as an incentive to study and gain additional experience contributes to the strengthening and expansion of this type of tourism as educational. However, defining it as a separate concept is complicated by the existing legal and organizational constraints, which hinders the economic development of the tourism industry and reduces budget revenue at all levels.

The definition of educational tourism as one of the separate types of tourism is complicated by the existence of organizational and legal time constraints. The Law of Ukraine "On Tourism" in this sense uses the recommendations of UNWTO, according to which tourism is considered a temporary departure of a person from the place of residence for health, educational, professional or other purposes without carrying out paid activity in the place where the person goes and the tourist - a person who travels to Ukraine or to another country not prohibited by the law of the host country for the purpose of from 24 hours to one year without carrying out any paid activity and with the obligation to leave the country or place of travel stay in the specified period, as evidenced by the paragraphs of the second and third articles of the first Law. Also, in the Law on Tourism, in accordance with Article 4, educational tourism is not singled out as a separate type of tourism. The above definitions indicate that there are two significant contradictions that make it

impossible to consider educational travel as a type of tourism.

First, it is almost impossible to meet the stay limit of up to one year, because the duration of a full cycle of study of an educational bachelor's degree for most specialties in different countries lasts three to four years. In some EU countries, the duration of a master's degree is one or two years, but this is not a generally accepted rule, especially in countries with real University autonomy. Thus, a bachelor's student who studies for four years can not be counted as a tourist, as well as, in General, a master's student. Also, if a student went to study under the exchange program under the ECTS (European credit transfer system) for one or two semesters, his trip can be considered educational tourism, but if he takes a full course at a foreign University-then not. You could consider a vacation period that is included in the schedule of the educational process at least twice a year, the time when the student returns to the country from which he came (completing a year of travel), and as if again returns to the host country for a new tourist period. But this does not always happen and is not the responsibility of the student. Some countries issue educational visas to students for up to one year, and must be renewed for each subsequent academic year. On the other hand, there are countries where an educational visa provides a legal right to employment and residency, usually one year after graduation. That is, the person is actually no longer a student, but is formally considered a beneficiary of the national education system. In higher education institutions of Ukraine there is a practice of preliminary language training of foreign entrants, when another year is added to the general term of study, during which future students learn the language in which classes will be conducted according to the condition of their contract. The students of the language courses are not students, in fact they are not yet enrolled in the first year of higher education, since language training is not included in the standard curriculum from which the diploma is formed. Not all countries set a limited time limit for completing the education cycle: a student can design an individual curriculum at his / her own discretion, selecting the number of subjects he / she studies during the year and paying for each of them individually, including again if failing exam the first time. In fact, a four-year undergraduate degree can last up to ten years until the student completes the minimum volume of study program and pays for the contract. Sometimes enrolling in a higher education institution is one way to obtain a formal residence permit in countries.

Secondly, a tourist is not allowed to engage in paid activity in the host country. This also applies to travel for business purposes, so if a traveler is to combine leisure and business with legal income, a work visa is required. Legislation in most countries provides for the right of students to formal employment, albeit with restrictions, such as the number of working hours per week. There are countries where student internships within the study period must be paid by the employer for at least a certain rate set in the regions, by industry or in a country, such as in France. In Germany, not only academic but also

vocational education is in high demand, where the provision of temporary jobs at specialized enterprises is a guaranteed condition for demand for their services. In Ukraine, student work during internships is paid for by agreement with the employer. That is, in addition to the analysis of conditions and restrictions on crossing the state border of the country and conditions for granting resident status, it is necessary to take into account the restrictions of labor legislation.

The existing contradictions of higher education legislation and practice confirm the objective need to update the definition of "educational tourism". Thus, the problem of terminology can be partially solved by adding to the definition of educational tourism clarification in which cases the classic definition needs to be clarified, and the accounting of tourist flows should be kept on the principles of satellite accounts in case it is necessary to determine the impact of international cooperation in the field of education on national, regional economy and labor market.

The development of the digital economy is expanding educational tourism by moving it into a virtual space for the provision of international distance education services. Cross-border educational platforms (e.g. Coursera, EdX, Khan Academy, MEP, Udacity, etc.) operate under different conditions – for example, free courses may not require certification and generally evaluate the process of material assimilation and, despite their high prevalence and, as a rule, high level of teaching, even paid diplomas are not recognized as official documents of education confirmation and are of value primarily to employers, or perform the function of preparation for full-time study at partner universities. However, the rapid spread of the concept of lifelong learning (LLL) and the relative ease of implementation of online education platforms have formed a powerful segment of the informal education sector, whose impact on traditional learning traditions is already undeniable, and therefore ignore this segment. the services market would be wrong. There are innovative countries that distinguished between law, distance, distance and distance education at the legislative level, setting clear rules and conditions for obtaining official documents confirming degrees, the procedure for monitoring the completion of tasks, passing exams and identifying trainees, thus equating different forms of training (for example, Spain). The Law of Ukraine "On Higher Education" distinguishes between full-time (day or evening) and distance (distance) education (Article 49). Thus, it is unclear whether distance and distance education are completely identical, or distance is a type of distance education. Employers want to get an employee in the labor market who would have the necessary competencies. The diversity and, in some cases, the contradictions of the current forms and methods of teaching do not allow us to formulate a universal definition of the term "educational tourism", suitable for use in different countries specializing in educational tourism services. Seeking to resolve the existing contradictions in Ukraine, the concept of "educational tourism" is offered to understand the type of activities for obtaining educational services of the appropriate

educational level, which is provided in accordance with the term of study and the chosen form, in accordance with the legislation of the host country, with the possibility, if desired who is pursuing an economic activity that is paid for in accordance with the existing legal rules established by the law of the host country [11].

The proposed definition of the term "educational tourism" takes into account and solves the main identified contradictions and contributes to the activation of the labor market by increasing the economic capacity of the population in the country providing educational and tourist services.

Contemporary scientific publications have suggested that any self-organizing holistic system has its own attractor [23], a state that it, together with the environment, forms and which it could achieve if all the initial conditions of the external and internal environment were absolutely constant throughout the movement of the system to its goal. With regard to the tourism industry as a whole, it is advisable to understand the attraction of historical and cultural heritage, resources, social security, educational tourism – higher education institutions whose educational services seek tourists traveling to the country to acquire the necessary competences [17].

In recent years, there has been an objective decrease in demand for tourist services among residents of the country and foreign citizens, ie the strength of the attractor has been weakening. However, higher education institutions continue to train hospitality and tourism professionals to the extent established during the economic growth period. For graduates, this creates problems of employment in the specialty, which indicates the mismatch of supply and demand for regional labor markets and contributes to the emergence of forced labor migration [10, 15]. And with the predominance of the current trend in the tourism industry of buying based on the impressions and globalization of the world market, tourist services companies are limited to knowledge of several geographical directions in educational tourism, doomed to exit the market [14, 18]. the objective of educational tourism should be to ensure the exchange of knowledge and technology between economic entities of different regions and countries in order to improve the efficiency of economic relations and ensure the competitiveness of goods. eye strength.

Educational tourism (broadly referred to as travel organization) for training (primary or inclusive) and experience sharing is one of the main factors for quality assurance in the workforce, stimulating technology and innovation sharing between economic agents domestically and globally and as a driving factor development of socio-economic systems, in particular the human capital component. However, it should be borne in mind that in the field of international educational services there are several sectors of activity that are relatively new to the national sector and therefore have not yet been reflected in the legislation of Ukraine. This is related to the basic models of the national economy, the labor market and resource flows. In order to build the concept of interdependencies between the activities of individual industries and the territorial economic system, it is

necessary to define the key blocks - business institutions and sectors of distribution of resources, factors of production, income [12, 13]. The traditional approach tends to a three-sector structure – both national economy and resource flows within a managed system. All industries and industries are theoretically related to the primary (mining), secondary (industry) and tertiary (services) sectors. This division underlies the theory of economic formations, the task of establishing compliance is the simple operation of counting the total number of enterprises within the country, their unambiguous identification with the direction of activity, the calculation of GDP generated by each sector and the calculation of each sector's share in total GDP. Theoretically, the more developed the state is, the more national income is produced at the higher levels of the hierarchy. In other words, the country that started producing services should no longer have to produce raw materials in its own territory – firstly, it violates environmental standards, pollutes and deteriorates the living standards of the local population, and secondly - is inefficient in terms of the use of quality labor and technology, therefore, guided by the tenets of D. Ricardo's theory, material-intensive factors of production should be imported, leaving the potential of the internal market to solve more complex management and technological problems. Educational tourism is related to the fifth sector, which includes market regulators that do not correspond to the usual way of dealing with typical market situations. This sector is referred to as the "knowledge economy": the production of intellectual labor is what drives, provides technological advancement and has a significant impact on short and long-term economic growth. It is this knowledge that is prevalent in the labor market and influences its development as much as possible.

An important issue of activation of the labor market in the light of educational tourism is to determine the conditions for the provision of educational services, which requires the acquisition of appropriate competencies by employees. Methods of supplying services should be determined on the basis of the location of the supplier and the consumer at the time of the provision of the service, taking into account their nationality or country of origin.:

- cross-border provisioning (method 1) – both the supplier and the consumer remain in the territory of their respective countries (which is similar to the traditional notion of trade and covers, for example, the provision of services by telephone or via the Internet);

- consumption abroad (method 2) - the consumer consumes a particular service outside his home country (for example, in the case of international tourist activity and visiting monuments abroad);

- commercial presence (method 3) – service providers establish (or acquire) a branch, branch or commercial representation in another country through which they provide their services (for example, a foreign bank investing in the host country's economy creates a subsidiary) for banking services);

- physical presence (method 4), when an individual (or the service provider himself, if he / she is a self-employed worker or his / her hired employee) is present

abroad for the provision of the service (eg, an independent architect supervises the implementation of the construction a project abroad or a computer specialist is sent abroad by his employer to provide information technology services).

According to the following methods, the list of educational tourism education services is as follows:

1) international online education and distance learning platforms;

2) arrival of foreigners for full-time study;

3) opening branches of foreign higher education institutions in the country or their separate departments, which do not offer a full cycle of education, but conduct classes in specific disciplines (for example, language courses);

4) invitation of foreign teachers to national HEIs (note that in Ukraine such paid activity is possible only on condition of temporary employment of a foreigner for a period of not less than 6 months.).

The list below reflects options for higher education institutions by traditional plans and programs, while in the non-formal and inclusive education sector this list may be expanded.

The more variants of education services that emerge, the more flexible the data collection methodology must be. As is the case with individual visitors (when tourists make their own travel without resorting to the services of intermediary companies), which cannot be distinguished from all non-residents crossing the border of the country and whose number can be determined at a destination by indirect indicators (e.g. the sharp rise in demand for popular foods and consumer goods) and specific education services can sometimes be measured by analyzing the economic activity of the university population. cities and executive bodies by type of activity - printing services, renting services, purchasing office supplies, translation, receiving state apostille services, permits to stay in the country, requests for migration services, etc. Therefore, to describe the state of the labor markets of the national economic system should not use structural but flow models based on them, reflecting the flow of resources, the movement of workers on the supply of labor and the population as a whole, funds, information from one market entity to another. In view of this, the key components of the activation of the labor market in the applied aspect of the synergy of education and educational tourism are the following:

1) activation of foreign economic activity: primary – as a source of foreign exchange earnings from the provision of educational services to foreigners; derivative - a) as a result of interbranch links of enterprises producing related and additional services (accommodation, food, domestic services for foreign students of HEI and participants of international seminars, conferences, trainings and other events. Terminologically possible crossing of branches of scientific, business and educational tourism , but sometimes it is difficult to classify a particular event clearly); b) the long-term effect of intensifying international cooperation as a result of the establishment of cultural and business ties between

foreigners – former alumni of the host country and local business circles;

2) an additional market for suppliers of products and household services to the population, expanding the range and raising the requirements for the quality of goods and services, which stimulates the creation of new jobs;

3) improving the quality of the workforce through the introduction of the latest learning technologies, the exchange of experience in the intercultural environment, and the flow of funds into the infrastructure of the education sector - in Ukraine, at the legislative level, a system of coefficients of promotion for basic services provided by higher education institutions to foreign citizens..

The main steps in the activation of the labor market are as follows.

Stage 1: Assessment of the current state of the socio-economic system, taking into account the demographic situation to identify the most vulnerable subsystem, which is subject to urgent adjustment (human capital, labor market based on matching demand and supply, development of educational tourism.

Stage 2: Formation of a set of independent variables - initial parameters of the socio-economic system, which involves the identification of a subsystem whose improvement is a priority in a justified direction of adjustment: production area, labor skills, smoothing of regional and sectoral imbalances, development and expansion of infrastructure.

Stage 3: determination of the vector of adjustment by the criterion of the existence of the possibility of self-regulation of the market; in case of impossibility of using the specified criterion, it is advisable to consider the possibility of institutional impact on the labor market; where possible, on the basis of taking into account the maximum possible number of factors of influence for activation of the labor market.

Stage 4: Modeling the behavior of influence agents based on changes in the studied socio-economic system, taking into account the complex components and prioritizing the leveling or increasing the influence of factors on the activation of the labor market in the context of educational tourism.

Stage 5: Choosing a strategy for the life of the socio-economic system to activate the labor market, taking into account the flows of educational tourism and taking into account their impact on the state of the labor market.

The steps presented will calculate the mutual influence of parameters of economic agents and consumers, in the broad sense – economic agents in different conditions already existing in the labor market or created artificially, within the simulation model of forecasting the states of the system or behavior of individual agents, taking into account their personal characteristics.

Given the peculiarities of managing spatially closed socio-economic systems – relatively independent participants in the global market, which should become the future focus of educational tourism, it is advisable to use a simulation method to determine the relationship between the parameters that separately affect the

relationship "labor supply - human capital - labor migration" as a set of factors for the development of socio-economic system in synergy with the potential of educational tourism.

The basis for constructing a model of mutual influence of the parameters of the socio-economic system is the cause and effect diagram, which provides the development of a strategy for growth of economic activity of the labor market.

M.G. Boyko argues that the effect of tourism is created in different parts of the production chain: from the development to the sale of an inter-sectoral integrated tourism product, given that tourism services can be provided by entities of any institutional units [6].

Based on the above proposals, the main directions in which it is advisable to adjust the negative tendencies of economic activity of the labor market are as follows [11, 14, 17, 18]:

- 1) support from local producers;
- 2) ensuring the skills of the workforce in accordance with market requirements;
- 3) uniform development of regions;
- 4) creation of an adequate education infrastructure that is capable of providing the labor market to in-demand professionals.

The impact of educational tourism as a driving factor for change in each direction is as follows:

Support for local producers Inclusion in the regional programs of enterprises providing services to tourists arriving in the country/region for the purpose of study and focusing on a specific territory, while temporarily increasing the number of local people. Due to inconsistencies in the methodology of accounting for tourist flows, these data are not taken into account when forecasting the need for recreational infrastructure and the load on the local household service system. There is also increasing demand for consumer goods, food and specific products needed for training (such as office supplies, office equipment, printing services, telecommunications and telecommunication services, etc.). Usually the most significant increase in the existing population is provided by the students of higher education institutions, and if the proportion of foreigners among them is large enough, consumer demand (the volume of goods and services demanded in this market) outstrips the increase in numbers, as they can usually go to study abroad. to afford at least middle-class representatives, and due to the unfavorable state of the Ukrainian economy in recent years and the devaluation of the national currency, the price level in our country appears to be even lower than in a country of roughly equal status, where foreign students come from. The need for everyday things and everyday services for students is also higher than the needs of the local population, because when they move to a temporary residence (rented or hostel), they cannot take all their personal belongings with them. Sometimes it is simply inconvenient and sometimes not economically feasible, given the cost of transporting luggage on international flights. Thus, the additional production and sale of products already available on the market (if it requires modification, then a small, foreign students are

usually quickly adapt to the local cuisine, features of everyday life and leisure - that is, manufacturers do not invest much in improving the quality of the product), stimulates the increase of household incomes by increasing the incomes of hired workers, creating additional jobs and releasing part of the income of economic entities that they can capitalize on the use of long-term investment projects. This is the first obvious effect that can be immediately felt and quantified. Not as obvious are the long-term effects of exporting educational services, which are to establish business links between the supplier country and the host country. The process of intercultural communication has a personal character and is based not only on a rational analysis of the prospects of cooperation with a particular country, but also depends on a sense of closeness, affinity for a foreign culture. On average, higher education graduates spend 4 to 5 years in the host country, study the features of the business environment and establish a series of friendly contacts that can quickly grow into a business. Therefore, countries that purposely engage in the study of foreigners are trying to expand the geography of inbound flows. Even if there are no stable foreign economic ties with any country, this may happen in the future, especially in the current unpredictable global labor market, so it is advisable to provide consumers with loyal loyalty to local entrepreneurs in advance..

The impact on the other three directions should be estimated with a lag of time (time lag) of an average of 3-5 years. Increasing the volume of services of higher education institutions and the consistent implementation of a number of measures to improve their content and structure to meet the needs of potential consumers - students and employers - cannot be accomplished in the short term. It takes at least 2-3 years to develop these areas, of which a minimum of 1 year will require pilot implementation and an objective evaluation of the results, which often results in a significant adjustment to the initial strategy. But as soon as this stage is over, the volume and quality of knowledge in society will be on the trajectory of growth. Graduates of higher education institutions will have a sufficient level of competence to be employed immediately after graduation, thanks to a well-established inclusive education system experienced enterprise specialists will create a quality product (demand for which has already been increased due to the arrival of foreigners to study and exchange experience in the framework of international cooperation) that will enable them to capture new labor markets. It is a process with positive dynamics, but at the same time as the number of highly qualified specialists in the labor market will increase, the opposite negative trends will inevitably be observed: the first instigator of social tension and the most likely one - oversaturation of labor supply in the local labor markets and the country as a whole (taking into account the internal across the country), from a particular popular profession or qualification. Those who have not been able to get a job right away will be forced to retrain or go abroad to work abroad or work remotely in international companies. Also, the excess of qualified young specialists will lead to a conflict with the employment of senior

specialists. Only in a small list of professions does experience really play a decisive role; companies now favor young aspiring employees, whose lack of experience is offset by enthusiasm and innovation. Assuming that all without exception, educational institutions will train specialists who are ready immediately after graduation to work effectively and, most importantly, without fail, the positive effects of improving the quality of the workforce formed in one age category will be offset by a sharp spike in unemployment in another. It should be noted that such a problem persists without the influence of external attractors, however, it is worthwhile to anticipate and minimize the likely consequences when such a situation can be predicted.

Analyzing the social policies of different countries of the world, we can identify a priority trend of activation of the labor market, which will promote its recovery and development. This is a life-long learning (LLL) concept, which provides for periodic continuous retraining and learning of new technologies in every field of activity, which will, firstly, avoid dismissal for the benefit of a junior employee, and second, activate the desire of employers to hire employees with work experience, which will contribute to the accumulation of staff knowledge and will be the driving force for innovation and the launch of new significantly improved services and products.

### Conclusions and prospects for further development

In order to eliminate the contradictions that exist in the legislation and impede the provision of economic activity of the labor market, taking into account the processes of migration, internationalization and globalization, the updated definition of the concept of "educational tourism" as a process of obtaining a resident

of the country of educational services in the form and for a certain period of time is proposed by the national law of the host country providing educational services, with the possibility of paid activity in the place where the person leaves or works for the benefit of economic territory of a State that provides educational services within the limits established by the legislation of the host country education.

The sequence of steps and measures for the activation of the labor market, taking into account the flows of educational tourism, is developed, based on the developed iterative model of determining the main factors influencing the development of the labor market and the growth of the added regional product to ensure economic activity of the population and the related process of job creation. and increasing the quality of the workforce. Practical use of the developed proposal will allow to predict the process of functioning of the labor market and social behavior of its subjects.

The main directions in which it is expedient to correct the negative tendencies of economic activity of the labor market are offered, which are: support of local producers; ensuring the skills of the labor force in accordance with the requirements of the labor market; uniform development of regions; the creation of an adequate education infrastructure capable of supplying the labor market to in-demand professionals with relevant competences.

The areas of further scientific research are to improve the statistical account of educational tourism flows based on the updated definition and development of methodological support for increasing the economic activity of the population in the context of educational tourism.

### References

1. Azmuk, N. (2016), "Unemployment and digital employment opportunities for reducing unemployment", *Economics of Development*, No. 3 (79), P. 12–19.
2. Antonyuk, V. P. (2019), "Contemporary Transformations in the Sphere of Higher and Vocational Education in Response to the Needs of the Labour Market", *Visnik Akademii ekonomichnih nauk Ukraini*, No. 1 (36), P. 3–7.
3. Bashnyanin, G. I., Kulchitsky, B. V., Goncharuk, L. Ya., Tesla, A. I. (2012), "By question about types and subtypes of economic socialization systems", *Scientific Bulletin of UNFU*, Vol. 22.14, P. 204–210.
4. Belousova, S. V. (2015), "Public sector management system in the light of the theories of socio-economic systems", *Voprosy upravleniya*, No. 6 (37), available at : <http://vestnik.uapa.ru/ru/issue/2015/06/16/>
5. Bibik, N., Shapoval, G. (2019), "An analysis of international experience of the development of territorial communities and the determination of the directions of its implementation in Ukraine", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (8), P. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.005>
6. Bosovska, M., Boyko, M., Vedmid, N. and Poltavaska, O. (2019), "Multi-attribute approach to the assessment of the effectiveness of managing the integration processes of tourism enterprises", *Ekonomika ta derzhava*, Vol. 2, P. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2019.2.31>
7. Vinska, O. Y. (2014), "Peculiarities of mediterranean social-economic model: case of Italy", *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences"*, Vol. 7, No. 1, P. 71–74.
8. Grishnova, O. A., Brintseva, O. G. (2015), "Fictitious human capital: essence, characteristics, formation factors", *Demography and Social Economy*, No. 1, P. 90–101.
9. Dadalko, V., Dubkov, S. (2013), "The Role of Export Potential in the Social and Economic System", *Bank Bulletin Magazine*, No. 13 (594), P. 40–43.
10. Miklovdva, V., Kubiniy, N., Moshak, S. (2015), "Ukraine competitiveness ranking by labour efficiency", *Demography and Social Economy*, No. 3, P. 199–208.
11. Yermachenko, V., Mirzoiev, D. (2017), "Problems of the educational tourism terminology and the development of a methodology for educational market evaluation", *Development management*, No. 1-2 (187-188), P. 118–125.
12. "Features of preparation of socio-economic analysis for development of regional development strategy. Analytical Note / European Union Project "Supporting Ukraine's Regional Development Policy" ["Osoblyvosti pidhotovky sotsial'no-ekonomichnoho

- analizu dlya rozrobky stratehiyi rozvytku rehionu. Analitychna zapyska / Proekt Yevropeys'koho Soyuzu "Pidtrymka polityky rehional'noho rozvytku Ukrayiny", available at : [http://www.if.gov.ua/files/2%20МЕТОДОЛОГ\\_Я%20СЕА.pdf](http://www.if.gov.ua/files/2%20МЕТОДОЛОГ_Я%20СЕА.pdf)
13. Pakulina, A., Pakulina, H. (2016), "Streamlining information flow and improving the system of indicators of socio-economic monitoring of regional development", *Traektoriâ nauki*, No. 2 (7), available at : <http://pathofscience.org/index.php/ps/article/view/61>.
14. Polyakov, M. V. (2017), "The Conceptual Foundations of Ukraine's Transition to the Knowledge Economy in the Context of Changes in the World Economy", *Business Inform*, No. 4, P. 28–34.
15. Radaev, V. V. "Tourism potential in the context of social development of the region" ["Turisticheskiy potentsial v kontekste sotsial'nogo razvitiya regiona"], available at : [http://www.comk.ru/project/open\\_map/HTML/radaev\\_doc.htm](http://www.comk.ru/project/open_map/HTML/radaev_doc.htm)
16. Rubtsova, N. V. (2015), *Socio-economic efficiency of tourist activity: theory, methodology, practice* [Sotsial'no-ekonomicheskaya effektivnost' turistskoy deyatelnosti: teoriya, metodologiya, praktika] : monograph, Irkutsk, Publishing House of BSUEP, 212 p.
17. Sardak, S. E. (2016), "The life cycle of social and economic systems", *Marketing and Management of Innovations*, No. 1, P. 157–169.
18. Solokha, D., Bieliakova, O. (2015), "The theoretical basis of the formation of a stable socioeconomic system of the industrial region", *Business and Management Culture*, No. 1, P. 39–49.
19. Tokarskiy, T. B. (2017), "The Project of Forming the "Welfare State", *Business Inform*, No. 4, P. 20–27.
20. Whole, T. N. (2017), "Regional socio-economic system as a system of spatial interaction of consumers of territory resources" ["Regional'naya sotsial'no-ekonomicheskaya sistema kak sistema prostranstvennogo vzaimodeystviya potrebiteley resursov territorii"], *Economic systems management*, No. 2 (96), P. 28, available at : <http://cyberleninka.ru/article/n/regionalnaya-sotsialno-ekonomicheskaya-sistema-kak-sistema-prostranstvennogo-vzaimodeystviya-potrebiteley-resursov-territorii>
21. Alam, F., Chowdhurya, H., Steiner, T. (2013), "Transnational education: benefits, threats and challenges", *Procedia Engineering*, No. 56, P. 870–874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.209>
22. Blanchard, E., Willmann, G. (2016), "Trade, education, and the shrinking middle class", *Journal of International Economics*, No. 99, P. 263–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2015.10.007>
23. Boeri, T. (2002), "Let Social Policy Models Compete and Europe Will Win. Transatlantic Perspectives on US-EU Economic Relations: Convergence Conflict and Cooperation", conference draft, 11-12.04.2002, available at : [https://sites.hks.harvard.edu/mrcbg/Conferences/us-eu\\_relations/boeri\\_us\\_european\\_trends.pdf](https://sites.hks.harvard.edu/mrcbg/Conferences/us-eu_relations/boeri_us_european_trends.pdf)
24. Larina, L. N. (2015), "Practical Application of Total Quality Management System to Education of International Students", *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, No. 215, P. 9–13, available at : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
25. Prodan, A., Maxim, E., Manolescu, I., Arustei, C. C., Guta, A. L. (2015), "Access to higher education: influences and possible implications", *Procedia – Economics and Finance*, No. 20, P. 535–543, available at : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
26. Sapir, A. (2006), "Globalization and the Reform of European Social Models", *Journal of Common Market Studies*, Vol. 44, No. 2, P. 369–390.
27. Shapoval, A. (2019), "The current state of the transnationalization of the economy and aspects of the transnational corporation's growth", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (8), P. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.121>

Received 23.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Ястремська Олеся Олександрівна** – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, доцент кафедри туризму, Харків, Україна; email: [iastremska.o@gmail.com](mailto:iastremska.o@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/000-0003-1865-0282>.

**Ястремская Олеся Александровна** – кандидат экономических наук, доцент, Харьковский национальный экономический университет имени Семена Кузнеця, доцент кафедры туризма, Харьков, Украина.

**Iastremska Olesia** – PhD (Economics Sciences), Associate Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Associate Professor of the Department of Tourism, Kharkiv, Ukraine.

## ОСВІТНІЙ ТУРИЗМ ЯК ПІДґРУНТЯ ЗРОСТАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ РИНКУ ПРАЦІ

**Об'єктом** дослідження є освітній туризм як складне соціально-економічне явище. **Предметом** дослідження є науково-практичні засади, які складаються з теоретичних положень функціонування освітнього туризму та методичного забезпечення впливу освітнього туризму на активізацію ринку праці з урахуванням його сучасного стану та законодавчого забезпечення. **Мета** – удосконалення понятійно-категоріального апарату освітнього туризму та розроблення науково-практичних рекомендацій з активізації ринку праці з урахуванням існуючих тенденцій розвитку освітнього туризму. **Завдання:** Для досягнення поставленої мети у статті сформовано та вирішено такі основні завдання: актуалізувати визначення поняття "освітній туризм" з урахуванням існуючих особливостей його розвитку; запропонувати основні етапи забезпечення активізації ринку праці з урахуванням освітнього туризму та визначити головні напрями його активізації. **Методи.** Теоретико-практичний аналіз робіт фахівців з освітнього туризму та функціонування ринку праці дозволив довести необхідність використанн таких методів дослідження: монографічного, аналізу та синтезу, структурно-логічного методу, системного підходу, теоретичного узагальнення. Отримано такі **результати:** Запропоновано визначити поняття "освітній туризм" з урахуванням різних форм економічної активності, терміну перебування для отримання освіти, можливості здійснення оплачуваної діяльності, що підвищить обґрунтованість пропозицій роботодавців для визначення особливостей робочих місць на ринку праці. З урахуванням уточненого визначення запропоновано основні етапи і заходи активізації ринку праці, що полягають в: активізації економічної діяльності суб'єктів господарювання як джерела валютних надходжень від надання освітніх послуг іноземцям; зростанні результату міжгалузевих зв'язків підприємств, що виробляють супутні та

додаткові послуги; формуванні додаткового ринку збуту для постачальників продукції та побутового обслуговування населення, розширенні асортименту та підвищенні вимог щодо якості товарів і послуг, що стимулює створення нових робочих місць; підвищенні якості робочої сили за рахунок упровадження новітніх технологій навчання, надходженні коштів у інфраструктуру галузі освіти. Виявлено основні напрями коригування існуючих негативних тенденцій щодо економічної активності на ринку праці: підтримка місцевих виробників, забезпечення необхідної кваліфікації робочої сили у відповідності до вимог ринку, рівномірний розвиток регіонів та створення належної інфраструктури освіти, яка здатна забезпечувати ринок праці фахівцями відповідної якості та компетентностей. **Висновки.** У визначення поняття освітнього туризму доцільно враховувати мету перебування, збільшувати термін візової підтримки та надати можливість освітнім туристам займатися економічною діяльністю для отримання особистого доходу. В процесі реалізації основних етапів і заходів з активізації ринку праці доцільно враховувати основні ринкові мультиплікаційні ефекти, які створюються в процесі отримання освіти. В якості головних напрямів активізації ринку праці слід використовувати економічну підтримку підприємців, підвищувати кваліфікацію робочої сили завдяки підвищенню якості набуття освіти у закладах вищої освіти на основі традиційних та ексклюзивних програм навчання.

**Ключові слова:** освітній туризм; ринок праці; активізація; міжкультурне середовище; новітні технології навчання; ринкові мультиплікаційні ефекти.

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ТУРИЗМ КАК ОСНОВА РОСТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РЫНКА ТРУДА

**Объектом** исследования является образовательный туризм как сложное социально-экономическое явление. **Предметом** исследования являются научно-практические основы, состоящие из теоретических положений функционирования образовательного туризма и методического обеспечения влияния образовательного туризма на активизацию рынка труда с учетом его современного положения и законодательного обеспечения. **Цель** – усовершенствование понятийно-категориального аппарата образовательного туризма и разработка научно-практических предложений для активизации рынка труда с учетом существующих тенденций развития образовательного туризма. **Задачи:** для достижения поставленной цели в статье поставлено и решено такие основные задачи: актуализировать определение понятия "образовательный туризм" с учетом существующих особенностей его развития; предложить основные этапы обеспечения активизации рынка труда с учетом образовательного туризма и определить главные направления его активизации. **Методы.** Теоретико-практический анализ работ специалистов в области образовательного туризма и функционирования рынка труда доказал необходимость использования таких методов исследования: монографического, анализа и синтеза, структурно-логического метода, системного подхода, теоретического обобщения. Полученные **результаты.** Предложено определять понятие "образовательный туризм" с учетом различных форм экономической активности, срока пребывания для получения образования, возможности осуществлять оплачиваемую деятельность, что повысит обособанность предложений работодателей для определения особенностей рабочих мест на рынке труда. С учетом уточненного определения предложены основные этапы и мероприятия активизации рынка труда, которые заключаются в: активизации экономической деятельности субъектов хозяйствования как источника валютных поступлений от предоставления образовательных услуг иностранцам; росте результатов межотраслевых связей предприятий, которые оказывают дополнительные услуги; формировании дополнительного рынка сбыта для поставщиков продукции бытового обслуживания населения, расширении ассортимента и увеличении требований к качеству товаров и услуг, что стимулирует создание новых рабочих мест; повышении качества рабочей силы за счет внедрения новейших технологий обучения, поступлении средств на расширение инфраструктуры сферы образования. Вывявлены главные направления изменения существующих негативных тенденций в экономической активности рынка труда: поддержка региональных производителей, обеспечение рабочей силой необходимой квалификации в соответствии с требованиями рынка, равномерное развитие регионов и создание требуемой инфраструктуры образования, способной обеспечить рынок труда специалистами требуемого качества и компетентностей. **Выводы.** В определении понятия образовательного туризма целесообразно учитывать цель пребывания, увеличить срок визовой поддержки и дать возможность образовательным туристам заниматься экономической деятельностью для получения личного дохода. В процессе реализации основных этапов и мероприятий по активизации рынка труда целесообразно учитывать основные рыночные мультипликационные эффекты, которые возникают в процессе получения образования. В качестве главных направлений активизации рынка труда следует осуществлять экономическую поддержку предпринимателей, повышать квалификацию рабочей силы на основе повышения качества образования в высших учебных заведениях на основе традиционных и эксклюзивных программ обучения.

**Ключевые слова:** образовательный туризм; рынок труда; активизация; межкультурная среда; новейшие технологии обучения; рыночные мультипликационные эффекты.

### Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ястремська О. О. Освітній туризм як підґрунтя зростання економічної активності ринку праці. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.097>.

Iastremska, O. (2020), "Educational tourism as a basis for the growth of economic activity of the labor market", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.097>.

L. AVERYANOVA, V. STARENKIY

## ANALYSIS OF RADIATION THERAPY EQUIPMENT STATUS IN UKRAINE

The **subject** matter of the article is review and analysis of existing radiation treatment technologies, availability and efficiency of use of modern radiotherapy equipment in regions Ukraine according to European radiotherapy development trends. The **goal** of the work is to analyze the current status of radiotherapy equipment in Ukraine and to find the ways for extension of its use. The following **tasks** were solved in the article: the analysis of distribution of radiotherapy machines in Ukraine, estimation of current number of radiotherapy machines per million people for all regions and needs of radiotherapy centers of Ukraine in high precision conformal treatment machines. The following **methods** used – documentary data analysis, comparison and summarizing. The following **results** were obtained – estimated that according to requirements of IAEA that necessary number of megavoltage treatment machines in Ukraine should be near 200. Use of 90 machines covers only 45% needs of Ukrainian population in radiation treatment. According to DIRAC data 61 of 65 Co-60 machines in Ukraine are used during more than 20 years, Co-60 sources in 23 these machines now have Dose rate less than 0.4 Gy/min and must be replaced urgently. **Conclusions:** The main actual aspects of technical status of equipment for External-beam radiation therapy in Ukraine were discussed. Existing radiotherapy facilities were analyzed from the point of view of real needs and possibilities of Ukrainian radiation oncology. As a conclusion, the results of this analysis demonstrate a significant heterogeneity in the access to modern radiotherapy equipment in different regions of Ukraine. The qualitative analyses of used radiotherapy equipment demonstrate its significant technical backwardness. The results of this analysis may be used as technical recommendations for improvement of radiotherapy facilities in Ukraine.

**Keywords:** external beam radiation therapy; megavoltage machines; linac.

### Introduction

Radiation therapy is one of the most complex and technologically equipped branches of medicine. The high energy radiation sources are successfully used for destroying or slowing of tumor growth. Approximately half of all patients with cancer worldwide should receive radiotherapy. However, more than 2 million people are unable to access it because of a lack of Radiotherapy megavoltage machines (MVM) [1]. So the necessity of use of MVM is only rises year by year. According to cancer incidence worldwide trends the World Health Organization (WHO) assumed that it may increase by a further 1.2 million new cases per year by 2030, pushing the annual incidence to more than 23 million [1-3]. Such morbidity causes huge pressing on economics and increases social burdens in any country. So improving the effectiveness of therapeutic technologies allow significantly limit the negative effects of cancer incidence. That's why monitoring of state of radiation therapy technological capacities and in-time upgrading of high-energy radiation equipment become very significant challenges for providing effective oncology medical care. They even may be used as index for evaluation the level of economic, social and innovation positions of any country of the world [4]. The direct correspondence exists between availability and efficiency of use of modern radiotherapy equipment and level of scientific and technical development and socioeconomic conditions [5].

### Analysis of last achievements and publications

The situation with the providing of radiation therapy technologies in 206 countries is constantly monitored by the IAEA [6, 7]. The results of annual registering of IAEA are shown in database Directory of Radiotherapy Centres (DIRAC), which includes data not only on teletherapy machines, but also on sources and devices used in brachytherapy, and on equipment for dosimetry, patient

dose calculation and quality assurance etc. DIRAC is a powerful tool that can be used for different types of analyses: to assess existing infrastructure in radiotherapy, plan new radiation oncology centres and extract performance and quality indicators related to radiotherapy services.

A megavoltage teletherapy machine MVM is defined as either a clinical linear accelerator of electrons (photon beam energy ranges from 6 to 18 MeV) or radionuclide Cobalt-60 machine (mean  $\gamma$ -radiation energy is 1.25 MeV). Clinical linear accelerators or LINACs are radiation treatment devices that accelerate electrons using electromagnetic fields to a required energy, transform the energy of electrons to high-energy bremsstrahlung to deliver radiotherapy. Radionuclide treatment machines have internal gamma-ray emitting source for use in radiotherapy. Both machines are used for external beam radiation treatment or teletherapy, where Source-to-Surface Distance may be 0.8 m or 1 m.

According to [7] there are 14 217 teletherapy MVMs in use worldwide now. In some high developed country particle accelerators are also used for external radiation treatment. They accelerate hadrons (heavy particles such as protons and carbon ions) using electromagnetic fields to high energy beams (60 - 250 MeV for protons and 350-400 MeV for carbon ions), useful for medical purposes. Particle accelerators produce the best therapeutic effects but this equipment is huge and very expensive as for general use. Thus now only 116 proton-ion accelerators are used, mostly in USA (56 acc.) and Japan (21 acc.).

Radiation Therapy Equipment market worldwide is projected to grow by US\$3.5 Billion, driven by a compounded growth of 6.2%. External Beam Radiation Therapy displays the potential to grow at over 6.3% [8]. The leading MVMs manufacturers are Varian Medical Systems (USA) and Elekta (Sweden).

According to DIRAC data [7] availability of MVM estimated as Number of Radiotherapy Machines Per Million People, which is significantly varies for groups of

countries with different income (table 1).

**Table 1.** Data on radiation therapy facilities contained in the DIRAC database [7] according to countries income

IncomeGroup	Countries	Countries with RT	RT centers	Equipment per million population.	RT machines	Million population	Linac	Radio-nuclide teletherapy	Circular accelerator	Particle accelerator
<b>Grand Total</b>	<b>206</b>	<b>151</b>	<b>7495</b>	<b>1,921</b>	<b>14449</b>	<b>7521</b>	<b>12302</b>	<b>2018</b>	<b>13</b>	<b>116</b>
High income (H)	71	60	4478	7,740	9111	1177	8696	297	11	107
Upper middle income (UM)	56	45	2270	1,509	4028	2670	2903	1116	1	8
Lower middle income (LM)	46	33	726	0,428	1273	2973	684	588	0	1
Low income (L)	32	12	20	0,049	34	700	16	17	1	0

The Western European average number of MV machines per million inhabitants is 6.875 MVM, for Eastern Europe respectively 2.775 MVM [7]. The survey [9] showed a significant heterogeneity in the access to modern radiotherapy equipment. High income countries especially in Northern-Western Europe are well-served with radiotherapy resources, other countries are facing important shortages of both equipment in general and especially machines capable of delivering high precision conformal treatments Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT) and Image-Guided Radiation Therapy (IGRT) [10]. Information about equipment for IMRT and IGRT was available for 26 countries; 69% MVMs were equipped for IMRT and 49% for IGRT. There was 96 dedicated stereotactic radiotherapy (SRT) or radiosurgery (SRS) units in 13 Western European countries [9].

For countries with Low income (0.049 MVM/mln) and Lower middle income (0.428 MVM/mln) radiation treatment often is unavailable for their inhabitants. So for these countries it's very important to choose optimal conception for step by step growth of their radiation therapy facilities by taking to account evaluation of their real economic conditions [11, 12]. For large-territory countries geographic accessibility to radiotherapy also should be estimated [13].

According to IAEA recommendations the number of radiotherapy megavoltage machines (MVMs) required to meet the global cancer demand was calculated by estimating that 500 courses would be performed on each MVM per year in LMIC. Given the likely higher complexity of treatments in HIC, 400 courses per MVM per year were estimated for these countries [1].

### **Highlight of the earlier unresolved parts of the general problem. Aim of the study**

Despite having general information presented by DIRAC [7] the deep analysis of problem of availability and estimation technological level of Radiotherapy MVM in Ukraine is insufficient [5, 14]. The impACT mission's experts, nominated by the IAEA and WHO to audit Ukraine in 2019, pointed that access to quality diagnostic and therapeutic radiation medicine services in the public sector in Ukraine needs to be improved [15]. The aim of this study is to analyze the current status of radiotherapy equipment in Ukraine and to find the ways for extension of its use. Such analysis can help to equalize access to radiation treatment among regions of Ukraine.

## **Materials and methods**

The current study includes a detailed analysis of radiotherapy equipment based on Data collection of DIRAC, fact-finding the data of country profile, 5-year retrospective analysis of status of radiotherapy equipment in Ukraine. The following methods are used: documentary data analysis, comparison and summarizing.

## **Study results and their discussion**

### **Availability of Radiotherapy equipment.**

Ukraine is classified by DIRAC IAEA as Low Middle Income country with level of availability 2.14 EBRT machines per 1 million of population (fig.1). Is this enough? According to GLOBOCAN 2018 data number of new cancer cases in Ukraine reached 169 817 and among them 60% (near 100 000 cases) need radiotherapy [3]. As IAEA recommended for LMIC [1] the capacity of one MVM should be near 500 treated patients per year. Thus desired number of MVMs in Ukraine should be near 200. In fact 90 MVMs are used in Ukraine now (fig. 2). It means that radiotherapy may be available only for 45% of Ukrainian cancer patients.

The capacity of MVMs in Ukraine is significantly different: between 200 and 1000 treated patients per one linac and between 400 and 2000 per one Co-60 machine. It is evident that some MVMs worked with considerable overload, however, thanks to the efforts of our excellent specialists, 42 312 Ukrainian patients received radiation treatment during 2019. These results confirmed that approximately 45% of the demand in treatment was satisfied, but technical reserves of MVMs have been exhausted. Unfortunately, near 55% of Ukrainian patients did not receive radiation treatments as required by international protocols of cancer treatment.

Next challenge for Ukraine is loss of control of 17% of its radiotherapy equipment in part of territory which is occupied since 2014 due to Russian aggression. As shown on fig.1 real availability of MVMs in Ukraine is worse than DIRAC represented. The lack of lost equipment (17 Co-60 machines and 2 linacs) is compensated by the overload of 71 available Ukrainian MVMs.

The territorial distribution of MVMs is shown on fig. 1. Number of Radiotherapy Machines per Million People in Ukrainian regions was calculated based on the data of State Statistics Service of Ukraine on the population of Ukraine and DIRAC data. The figure shows that at least 5 oblast of Ukraine are equipped with MVMs worse than countries of IAEA North Africa

Region. Average number of MVMs in Ukraine is less than in IAEA Eastern Europe and Northern Asia Region. The results of this analysis demonstrate a significant heterogeneity in the access to modern radiotherapy equipment in different regions of Ukraine.

The drop of MVMs number after 2015 (fig. 2) may be explained by the decommissioning of obsolete Co-60 machines. Therefore, the need for a significant

increase in the number of MVMs is an urgent problem in Ukraine.

### Radiotherapy equipment age

According to DIRAC data 61 of 65 Co-60 machines in Ukraine are used during more than 20 years, at that 27 eldest of them must be replaced immediately (marked by dark red on fig. 3).

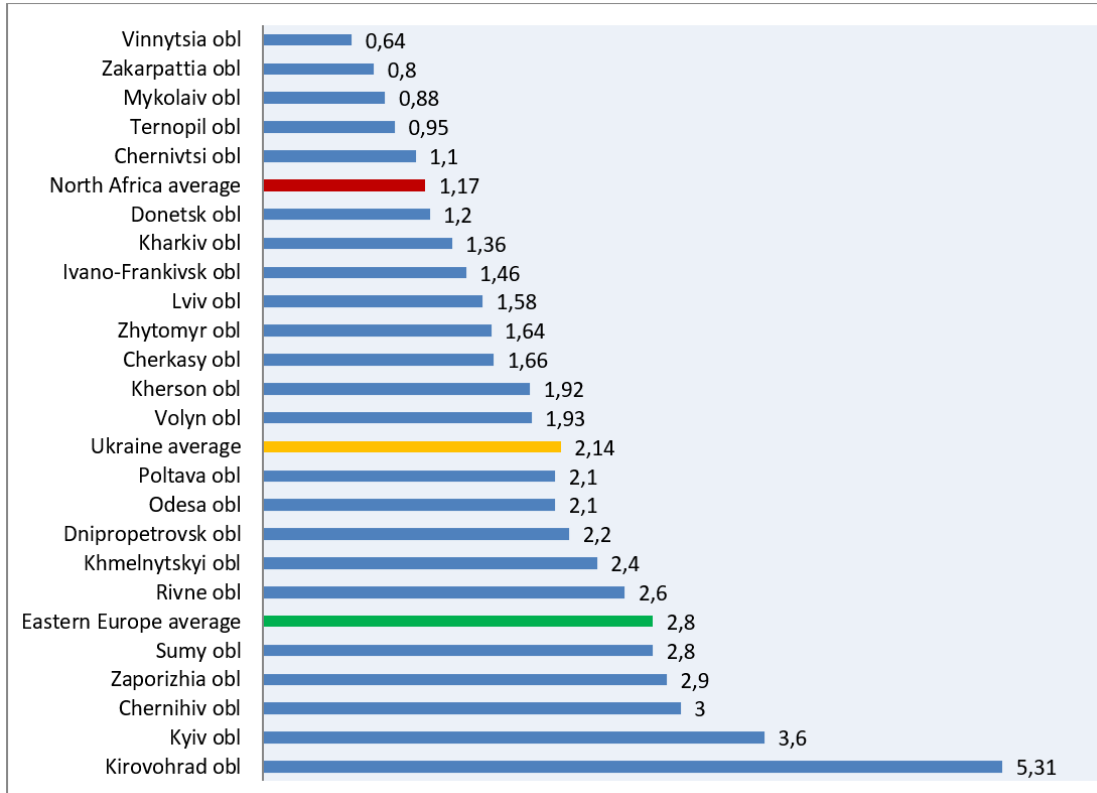


Fig. 1. Number of Radiotherapy Machines per Million People in Ukrainian oblast (DIRAC IAEA, 2018)

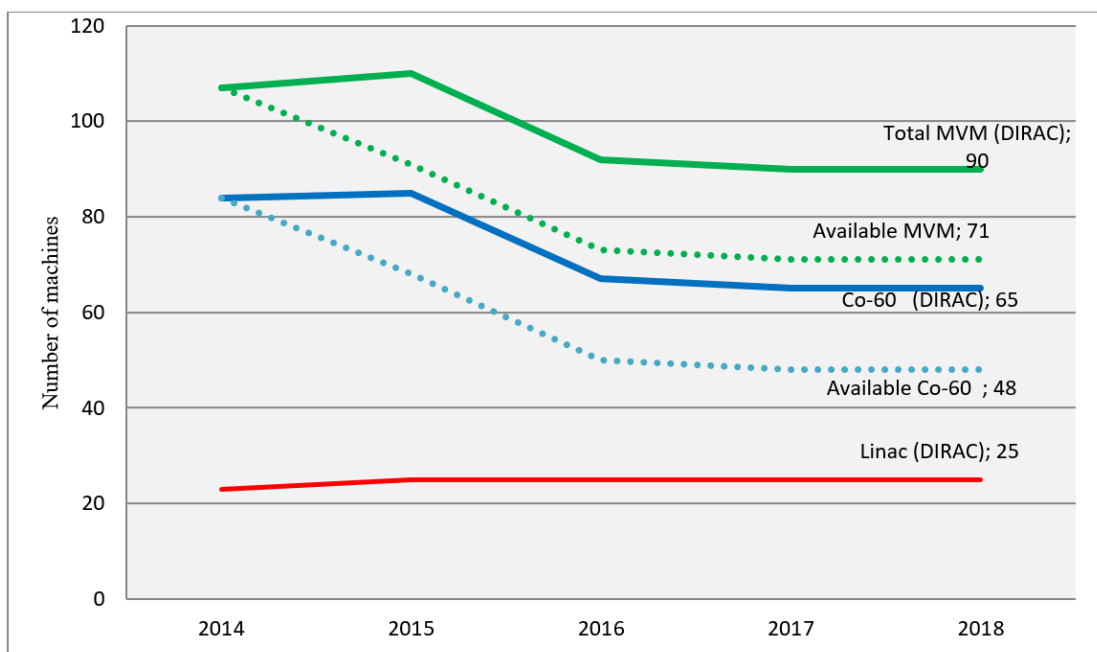
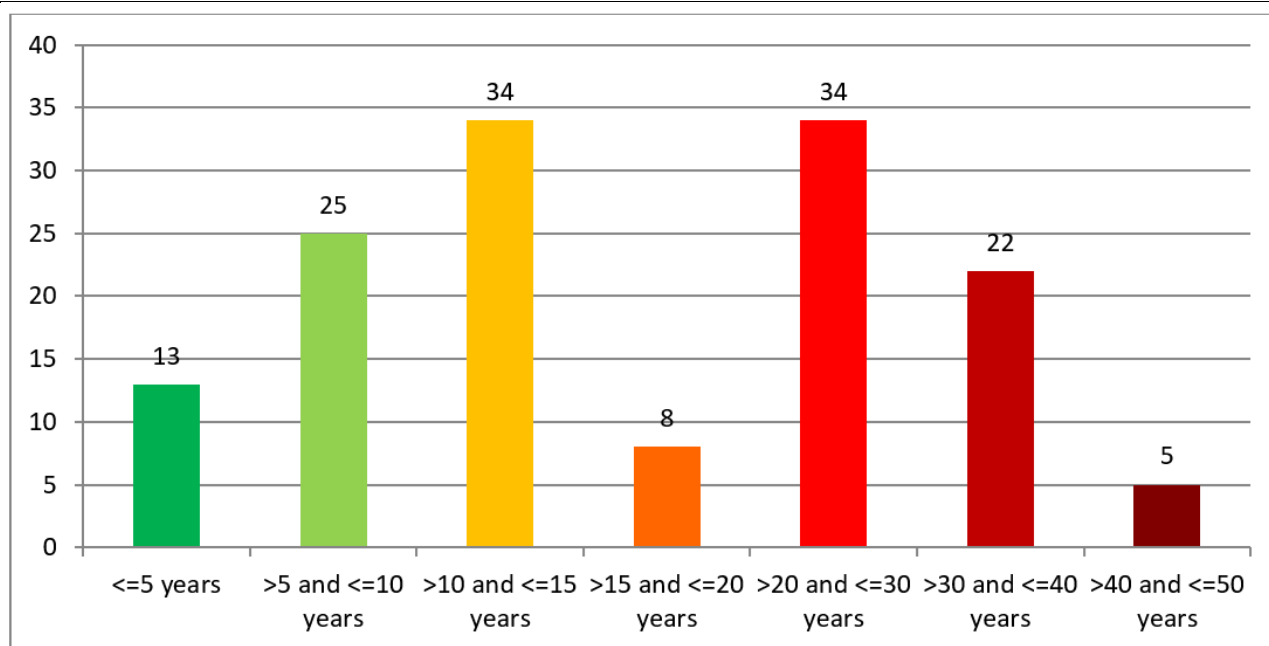


Fig. 2. Changes of number of Radiotherapy Machines in Ukraine during 5 years (DIRAC IAEA, 2018)



**Fig. 3.** Status of Radiation therapy Equipment in Ukraine according to age categories (2019) and appropriate working Radiotherapy megavoltage machines of different age

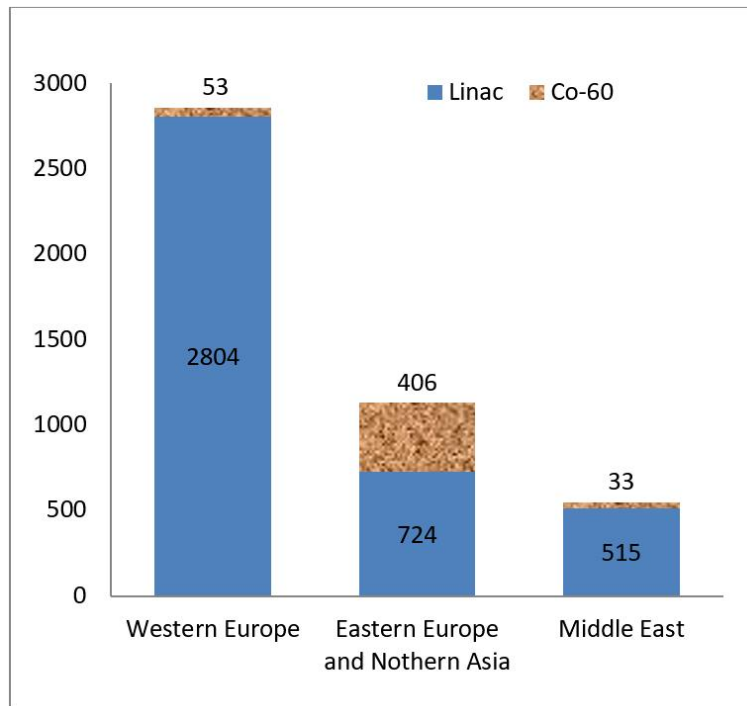
#### Ratio "Linacs to Co-60 machines"

Linac-based and Co-60-base technologies are different in infrastructure and maintenance, dosimetry, shielding requirements, staffing, costs, security, patient throughput and clinical use [16]. In clinical use, more complex treatment techniques are easier to achieve with

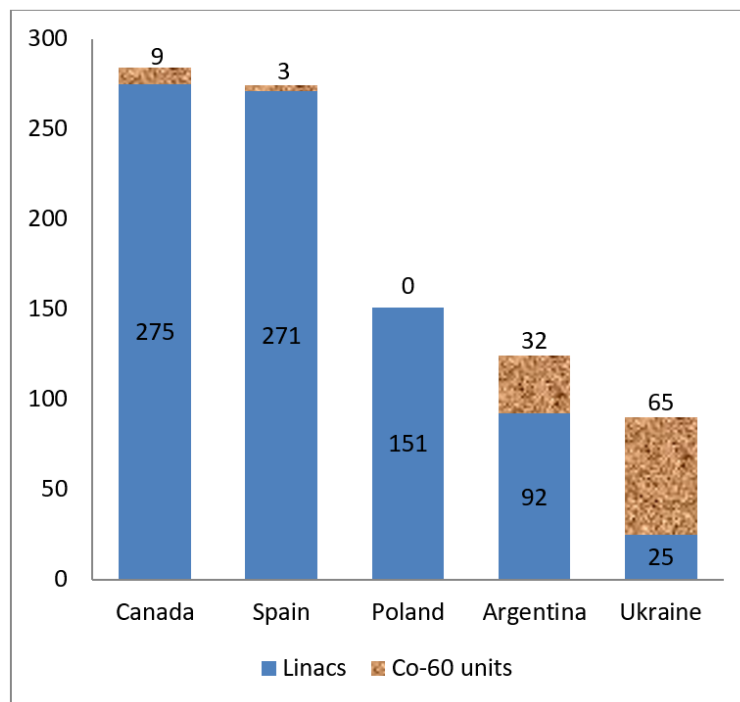
linacs. Linac-based technologies are more flexible, controlled and secure. That's why High income countries seek for total replacement of Co-60 units by linacs (fig. 4, 5).

As for low- and middle-income countries there is no simple answer to the question what is more preferable for radiotherapy – Co-60 machines or linacs? In fact a

combination of both technologies may be proposed for low- and middle-income countries.



**Fig. 4.** Ratio "Linacs to Co-60 units" for Western Europe, Eastern Europe and Northern Asia and Middle East IAEA Regions



**Fig. 5.** Ratio "Linacs to Co-60 units" for countries comparable to Ukraine on population

As shown on fig. 4 qualitative ratio "Linacs to Co-60 units" for IAEA region Eastern Europe and Northern Asia is 36% to 64%. Among 406 Co-60 units used in all this region 237 machines are in Russia (58%), 65 machines in Ukraine (16%), 30 machines in Kazakhstan (7%). This fact proves that the largest post-Soviet countries continue to use many old soviet Co-60 machines and replace them on linacs very slowly. Both Russia and Belarus have 53% of Co-60 units, Kazakhstan – 67% and Ukraine – 72%, so,

unfortunately, here Ukraine shows the greatest backlog. It indicates significant technological problems in Ukrainian radiation medicine.

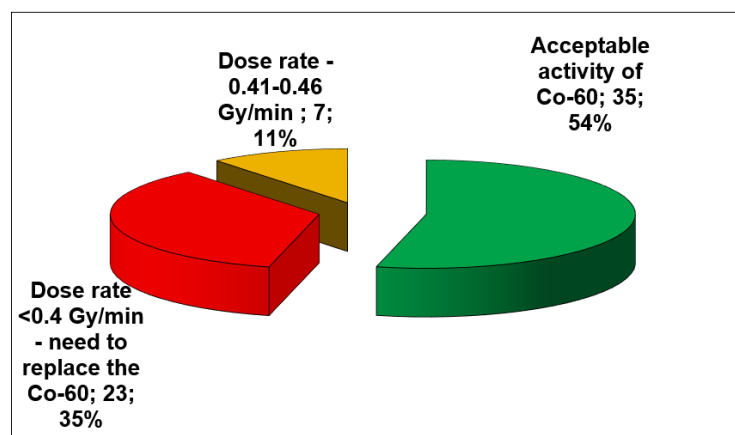
Fig. 5 demonstrates essential differences of ratio "Linacs to Co-60 units" among countries comparable to Ukraine on population (near 40 million inhabitants). Ukraine has almost three times fewer radiotherapy machines than in Canada and Spain. The qualitative ratio "Linacs to Co-60 units" for Ukraine in comparison with

these countries seems catastrophic. But Ukraine is so unique country which continues to keep existing level of radiotherapy technologies with GNI 5 time less than in Poland. It's clear that further progress of Ukraine in area of radiotherapy is impossible without appropriate economic growth.

### Level of Co-60 sources activity

Considering that Co-60 machines are the most prevalent in Ukraine, an important issue is to control the

activity and dose rate of Co-60 sources that have a decay half-life time of 5.27 years. It's known [17] that if Co-60 source Dose rate became less than 0.4 Gy/min, this source need to replace and it can't be used more for radiation treatment. According to information collected by Central Laboratory of Radiation Safety and Medical Dosimetry Equipment, Grigoriev Institute for Medical Radiology NAMS of Ukraine and reported by Head of laboratory Dr .L. Stadnyk, Co-60 sources in 23 Ukrainian treatment machines now have Dose rate <0.4 Gy/min and must be replaced urgently (fig. 6).



**Fig. 6.** Results of estimation Co-60 source Dose rate for Co-60 machines used in Ukraine (2019)

It's 35% of total number of MVMs in Ukraine. So, this fact is the reason for immediate source reloading in modern Co-60 machines, but no sense to reload old machines (fig. 3) because of their unreliability and technical backwardness.

### Conclusion and perspectives of further development

The main actual aspects of technical status of equipment for External-beam radiation therapy in Ukraine were discussed. Existing radiotherapy facilities were

analyzed from the point of view of real needs and possibilities of Ukrainian radiation oncology. As a conclusion, the results of this analysis demonstrate a significant heterogeneity in the access to modern radiotherapy equipment in different regions of Ukraine. Use of 90 MVMs covers only 45% needs of Ukrainian population in radiation treatment. The quantitative analyses of used radiotherapy equipment demonstrate its significant technical backwardness. The results of this analysis may be used as technical recommendations for improvement of radiotherapy facilities in Ukraine.

### References

1. Yap, M. L., Zubizarreta, E., Bray, F., Ferlay, J., Barton, M. (2016), "Global Access to Radiotherapy Services: Have We Made Progress During the Past Decade?", *Journal of Global Oncology*, Vol. 2, No. 4, P. 207–215. DOI: <https://ascopubs.org/doi/10.1200/JGO.2015.001545>
2. Atun, R., Jaffray, D. A., Barton, M. B. et al. (2015), "Expanding global access to radiotherapy", *The Lancet Oncology*, Vol. 16, Issue 10, P. 1153–1186. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(15\)00222-3](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(15)00222-3)
3. World Health Organization International Agency for Research on Cancer. GLOBOCAN 2018: Estimated Cancer Incidence, Mortality and Prevalence in Ukraine, available at : <https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/populations/804-ukraine-fact-sheets.pdf>
4. Grover, S., Xu, M. J., Yeager, A., Rosman, L., Groen, R. S., Chackungal, S., Rodin, D., Mangaali, M., Nurkic, S., Fernandes, A., Lin, L. L., Thomas, G. and Tergas, A. I. (2015), "A systematic review of radiotherapy capacity in low- and middle-income countries", *Frontiers in Oncology*, No. 4:380. DOI: <https://doi.org/10.3389/fonc.2014.00380>
5. Starenkiy, V. P., Petrichenko, O. O., Averyanova, L. O. (2017), "External beam radiotherapy facilities in Ukraine. Trends and challenges", *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 6, P. 126–129, available at : [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2017\\_6/article\\_2017\\_6\\_126.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2017_6/article_2017_6_126.pdf)
6. International Atomic Energy Agency (2011), "Planning National Radiotherapy Services: A Practical Tool, Human Health Series", IAEA, Vienna, No. 14, available at : <https://www.iaea.org/publications/8419/planning-national-radiotherapy-services-a-practical-tool>
7. International Atomic Energy Agency Division of Human Services: Directory of Radiotherapy Centres (DIRAC), available at : <https://dirac.iaea.org/>
8. Radiation Therapy Equipment 2017-2025 - Global Market Analysis, Trends, and Forecasts Report 2019 - Varian and Elekta Rule the Radiotherapy Equipment Market (2019), Research and Markets, available at : [https://www.researchandmarkets.com/reports/338872/radiation\\_therapy\\_equipment\\_market\\_analysis](https://www.researchandmarkets.com/reports/338872/radiation_therapy_equipment_market_analysis)

9. Grau, C., Defourny, N., Malicki, J. et al. (2014), "Radiotherapy equipment and departments in the European countries: Final results from the ESTRO-HERO survey", *Radiotherapy and Oncology*, Vol. 112, Issue 2, P. 155–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2014.08.029>
10. Shirzadfar, H., Khanahmadi, M. (2018), "Current approaches and novel treatment methods for cancer and radiotherapy", *Int J Biosen Bioelectron*, No. 4 (5):224. DOI: <https://doi.org/10.15406/ijbsbe.2018.04.00131>
11. Datta, N. R., Samiei, M., Bodis, S. (2014), "Radiation therapy infrastructure and human resources in low- and middle-income countries: Present status and projections for 2020", *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, Vol. 89, No. 3, P. 448–457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2014.03.002>
12. Gelband, H., Sankaranarayanan, R., Gauvreau, C. L. et al (2016), "Costs, affordability, and feasibility of an essential package of cancer control interventions in low-income and middle-income countries: key messages from Disease Control Priorities, 3rd edition", *The Lancet*, Vol. 387, Issue 10033, P. 2133–2144. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)00755-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)00755-2)
13. Chan, J. et al. (2020), "Examining geographic accessibility to radiotherapy in Canada and Greenland for indigenous populations: Measuring inequities to inform solutions", *Radiotherapy and Oncology*, Vol. 146, P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2020.01.023>
14. Starenkiy, V., Vasyliov, L., Samofalov, I. (2016), "The Problems and Perspectives of Megavoltage Photon Beam Radiotherapy in Ukraine", *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 3 (105), P. 94–97, available at : [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2016\\_5/article\\_2016\\_5\\_94.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2016_5/article_2016_5_94.pdf)
15. IAEA Leads Review of Ukraine's Cancer Control Programme, available at : <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-leads-review-of-ukraines-cancer-control-programme>
16. Healy, B. J. et al. (2017), "Cobalt-60 Machines and Medical Linear Accelerators: Competing Technologies for External Beam Radiotherapy", *Clinical Oncology*, Vol. 29, Issue 2, P. 110–115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clon.2016.11.002>
17. International Atomic Energy Agency (2006), "Radiation protection in the design of radiotherapy facilities", *IAEA*, Vienna, No. 47, available at : [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1223\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1223_web.pdf)

Received 25.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Авер'янова Лілія Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри біомедичної інженерії, Харків, Україна; email: [lilya.averyanova@nure.ua](mailto:lilya.averyanova@nure.ua); ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0803-7222>.

**Аверьянова Лилия Александровна** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры биомедицинской инженерии, Харьков, Украина.

**Averyanova Lilya** – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

**Старенький Віктор Петрович** – доктор медичних наук, професор, Державна установа "Інститут медичної радіології ім. С. П. Григор'єва Національної академії медичних наук України", завідувач відділенням променевої терапії, Харків, Україна; email: [starenkiy.victor@gmail.com](mailto:starenkiy.victor@gmail.com); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6600-3381>.

**Старенький Виктор Петрович** – доктор медицинских наук, профессор, Государственное учреждение "Институт медицинской радиологии им. С. П. Григорьева Национальной академии медицинских наук Украины", заведующий отделением лучевой терапии, Харьков, Украина.

**Starenkiy Victor** – Doctor of Sciences (Medicine), Professor, State Institution "Grigoriev Institute for medical Radiology NAMS of Ukraine", Head of the Department of Radiotherapy, Kharkiv, Ukraine.

**АНАЛІЗ СТАНУ РАДІОТЕРАПЕВТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В УКРАЇНІ**

**Предметом** дослідження в статті є огляд та аналіз існуючих радіотерапевтичних технологій, доступності та ефективності використання сучасного радіотерапевтичного обладнання в регіонах України у відповідності з тенденціями розвитку променевої терапії в Європі. **Мета** роботи – аналіз поточного стану радіотерапевтичного обладнання в Україні, виявлення шляхів розширення його застосування. В статті вирішуються наступні **завдання**: аналіз розподілу радіотерапевтичних апаратів в Україні, визначення кількості радіотерапевтичних апаратів на мільйон населення для всіх областей та потреб радіотерапевтичних центрів України у високочотних апаратах конформного опромінення. Використовуються такі **методи**: аналіз документальних даних, порівняння, узагальнення. Отримано наступні **результати**: розраховано, що відповідно до вимог МАГАТЕ, необхідна кількість мегавольтних радіотерапевтичних апаратів в Україні має бути близько 200. Використання 90 апаратів покриває лише 45% потреб населення України в променевому лікуванні. За даними DIRAC 61 з 65 машин Co-60 в Україні використовуються протягом понад 20 років, джерела Co-60 у 23 цих машинах зараз мають дозу, меншу, ніж 0,4 Гр / хв, і їх необхідно терміново замінити. **Висновки**: обговорено актуальні аспекти технічного стану обладнання для променевої терапії в Україні. Існуючі засоби променевої терапії були проаналізовані з точки зору реальних потреб та можливостей української радіаційної онкології. Як висновок, результати цього аналізу демонструють значну неоднорідність доступу до сучасного радіотерапевтичного обладнання в різних регіонах України. Якісний аналіз використаного радіотерапевтичного обладнання свідчить про його значну технічну відсталість. Результати цього аналізу можуть бути використані як технічні рекомендації щодо вдосконалення радіотерапевтичних установ в Україні.

**Ключові слова**: променеве лікування зовнішнім пучком; мегавольтні апарати; лінійний прискорювач.

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАДИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В УКРАИНЕ

**Предметом** исследования в статье является обзор и анализ существующих радиотерапевтических технологий, доступности и эффективности использования современного радиотерапевтического оборудования в регионах Украины в соответствии с тенденциями развития лучевой терапии в Европе. **Цель** работы – анализ текущего состояния радиотерапевтического оборудования в Украине, выявление путей расширения его применения. В статье решаются следующие **задачи**: анализ распределения радиотерапевтических аппаратов в Украине, определение количества радиотерапевтических аппаратов на миллион населения для всех областей и потребностей радиотерапевтических центров Украины в высокоточных аппаратах конформного облучения. Используются следующие **методы**: анализ документальных данных, сравнение, обобщение. Получены следующие **результаты**: рассчитано, что в соответствии с требованиями МАГАТЭ необходимое количество мегавольтных радиотерапевтических аппаратов в Украине должно быть около 200. Использование 90 аппаратов покрывает лишь 45% потребностей населения Украины в лучевом лечении. По данным DIRAC 61 из 65 машин Co-60 в Украине используются в течение более 20 лет, источники Co-60 в 23 этих машинах сейчас имеют дозу, меньше, чем 0,4 Гр / мин, и их необходимо срочно заменить. **Выводы**: обсуждались актуальные аспекты технического состояния оборудования для лучевой терапии в Украине. Существующие средства лучевой терапии были проанализированы с точки зрения реальных потребностей и возможностей украинской радиационной онкологии. Как вывод, результаты этого анализа демонстрируют значительную неоднородность доступа к современному радиотерапевтическому оборудованию в разных регионах Украины. Качественный анализ используемого радиотерапевтического оборудования свидетельствует о его значительной технической отсталости. Результаты этого анализа могут быть использованы как технические рекомендации по совершенствованию радиотерапевтической учреждений в Украине.

**Ключевые слова:** лучевое лечение внешним пучком; мегавольтные аппараты; линейный ускоритель.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Авер'янова Л. О., Старенький В. П. Аналіз стану радіотерапевтичного обладнання в Україні. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 106–113. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.106>.

Averyanova, L., Starenkiy, V. (2020), "Analysis of radiation therapy equipment status in Ukraine", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 106–113. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.106>.

I. В. ЗАХАРОВА, В. О. РОЯНОВ, О. М. СЕРЕНКО

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРАКТИЧНА РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ З ПУЛЬСУЮЧИМ РОЗПИЛЮВАЛЬНИМ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОКРИТТІВ

**Предметом** дослідження є інтенсивне окислення металу, який розпильється в процесі дугової металізації, за рахунок кисню повітря, що призводить до значного зменшення вмісту легуючих елементів в покритті і відповідно погіршує якість напиляного шару. Цьому питанню приділяли увагу і інші автори наукових публікацій, які пропонували використання гасу, пропано-повітряної суміші, інертних газів в якості транспортуючого газу, але ці рішення приводили до значного подорожчання процесу дугової металізації, і частіше за все не мали кількісних розрахунків впливу на якість покриттів або носили приблизний характер. **Метою** роботи було вибрано обґрунтування підвищення якості покриттів за рахунок зниження негативного впливу кисню повітря при дуговій металізації шляхом застосування пульсуючого розпилювального потоку повітря. З метою зниження окисного впливу повітряно-розпилювального струменя на рідкий метал електродів запропонований метод пульсуючої подачі повітря в зону плавлення електродів шляхом введення додаткового елементу - клапана пульсатора в розпилювальну систему електродугового металізатора. **Завданням** даної статті являється визначення та вибір конструкції пристрою – клапана пульсатора для створення керованого пульсуючого розпилювального потоку з певними імпульсами при дугового металізації. Для виконання поставленого завдання в роботі використовувались **методи** математичного аналізу і практичні розробки – наведені дані по наявності пульсацій повітряного потоку зафіксовані осцилографом. Таким чином, теоретичне обґрунтування застосування клапана пульсатора підтверджено практичними результатами. На основі представленого аналізу отримані **результати**, які дозволили визначити оптимальне конструктивне виконання пристрою для отримання пульсацій, задля максимального зниження впливу потоку, який транспортує частинки (саме кисню повітря) матеріалу електродів, які розпильються. **Висновки** щодо роботи: використання пульсуючого розпилювального струменя повітря при нанесенні покриттів методом дугової металізації, дозволить зменшити вигорання легуючих елементів, таких як марганець, кремній, збільшити вміст вуглецю в нанесеному покритті, що відповідно покращить якість відновлених деталей.

**Ключові слова:** легуючі елементи; кисень; дугова металізація; пульсуючий потік повітря; електроди; клапан-пульсатор; покриття; математичне моделювання.

### Вступ

В даний час відсутні системні рішення щодо запобігання, при дуговій металізації, інтенсивного вигорання з металу легуючих елементів і насичення шару, що наноситься, газами атмосфери. Зазначені процеси призводять до зміни хімічного складу, зниження концентрації легуючих елементів, надмірного вмісту оксидів в покритті, що значно знижує якість та працездатність відновлених деталей.

Застосування пульсуючого розпилювального струменя, що розглядається в даній роботі, дозволить істотно знизити вигорання вуглецю і легуючих елементів в нанесеному покритті, результати досліджень з даного питання представлені в статті [9].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У схемах процесу дугової металізації в якості транспортуючого газу використовується стиснене повітря або нейтральні і відновні газові суміші. Розпилення стисненим повітрям забезпечує стабільний розпил металу, що плавиться, проте якість покриття не дуже висока через велику кількість пір і оксидів [10]. Використання при металізації для розпилення інертних газів [5, 7] нетехнологічне через їх високу вартість. Перспективною є використання суміші "стиснене повітря вуглеводні".

За такого варіанту пропонується, наприклад, використовувати в суміші з повітрям метан [8, 4]. У ВНІТУВІД "Ремдеталь" запропоновано в якості

вуглеводнів використовувати гас [11]. В. Е. Барановським запропоновано в якості транспортуючого газу використовувати продукти згорання пропаноповітряної суміші [1, 2, 3]. Однак в цих роботах кількісні розрахунки або відсутні взагалі [5, 8] або носять приблизний характер [1, 11]. Це не дозволяє повною мірою реалізувати переваги обраної схеми.

Таким чином, для зниження ефекту вигорання легуючих елементів запропоновані прийоми використання в якості транспортуючого середовища різних сумішей газів, різних видів конструкцій розпилювальних сопел. Однак мета досягається за рахунок підвищення собівартості покриттів і ускладнення апаратури і обладнання.

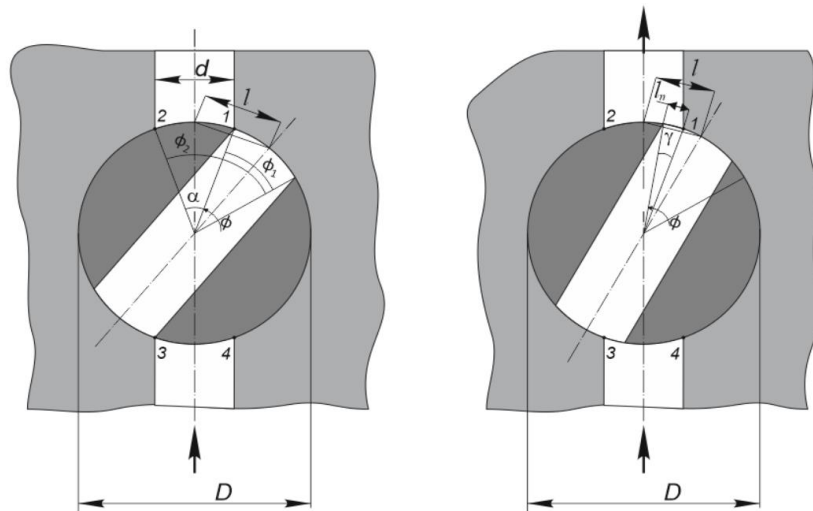
Авторами, задля підвищення якості покриттів та вирішення проблеми вигорання легуючих елементів під час транспортування розплавленого металу електродів потоком повітря, запропоновано пульсуючий розпилювальний потік для відділення і транспортування матеріалу, що розпильється з поверхні торців електродів. Представлено принцип і розроблено обладнання для отримання керованого пульсуючого розпилювального потоку.

Конструктивно пульсуючий пристрій (надалі пульсатор) являє собою циліндричний корпус з вхідним і вихідним патрубком для підведення і виведення стисненого повітря, всередині якого встановлено вал з отвором і можливістю обертання.

У даній роботі було проведено математичний аналіз та моделювання перекриттів клапана

пульсатора і сопла різних форм з використанням програми Mathcad (рис. 1) і дослідження імпульсів,

одержуваних при прямокутному прохідному перерізі (рис. 5).



1, 2, 3, 4 – точки дотику клапана пульсатора

**Рис. 1.** Схема початкового і подальшого положення ротаційного клапана пульсатора

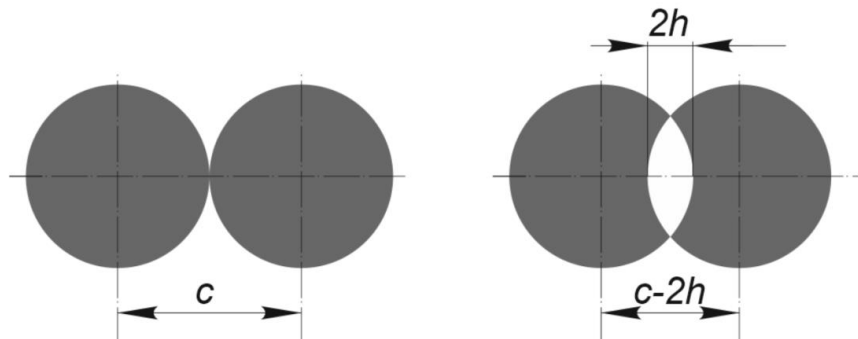
$$\varphi_1 = \frac{\pi - \alpha}{2}; \varphi_2 = \frac{\pi + \alpha}{2}; \varphi_3 = \frac{3\pi - \alpha}{2}; \varphi_4 = \frac{3\pi + \alpha}{2};$$

$\varphi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – кути повороту клапана пульсатора, відповідно ( $\alpha$  – кут сегменту с вершинами у крапках 1, 2;  $l$  – хорда сегменту;  $l_n$  – шаг обертання клапана;  $\gamma$  – кут перекриття каналу;  $d$  – діаметр каналу, рівний

діаметру вхідного та вихідного отворів;  $D$  – діаметр клапана пульсатора, що перекриває вхідний та вихідний отвір.

Змінюючи крок і кут повороту пульсатора, визначаємо кут перекриття площі отворів клапана пульсатора і сопла (вхідний і вихідний отвір).

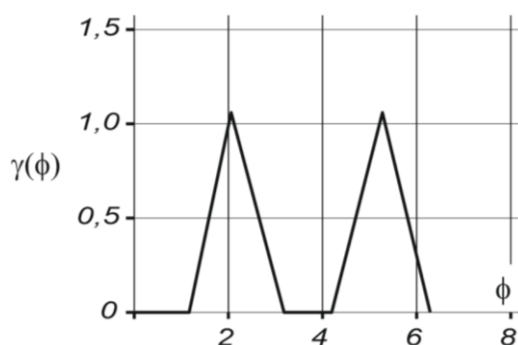
Перший варіант отворів: перетину "коло - коло".



$c$  – відстань між центрами отворів;  $2h$  – величина перекриття отворів

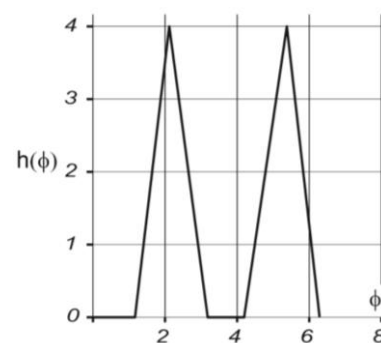
**Рис. 2.** Схема перекриття отворів з перетинами "коло - коло"

На рис. 3 представлений графік зміни площі перекриття при обороті клапана 3600. Наявність паузи між імпульсами обумовлено конструкцією сопла.



**Рис. 3.** Графік зміни площі перекриття

Були побудовані і представлені графіки залежності площі перекриття  $h$  та кута перекриття  $\beta$  при торканні в точці 2, рис. 4, 5.



**Рис. 4.** Графік залежності площі перекриття  $h$  при торканні в точці 2 від кута оберту клапана пульсатора

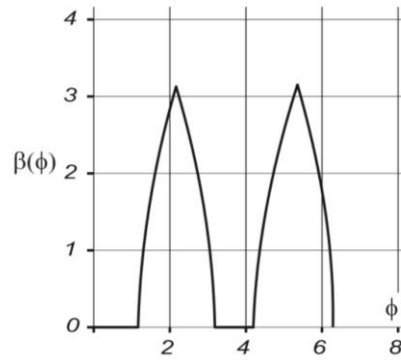
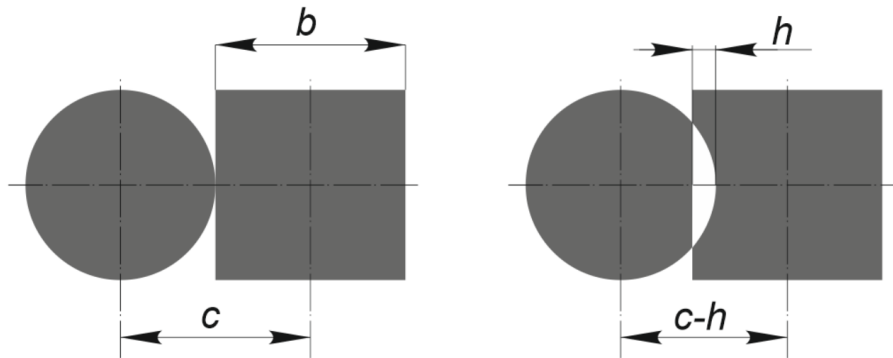


Рис. 5. Графік залежності кута перекриття  $\beta$  при торканні в точці 2 від кута оберту клапана пульсатора

Аналогічні розрахунки проведені для інших форм отвори клапана пульсатора і отвору сопла.

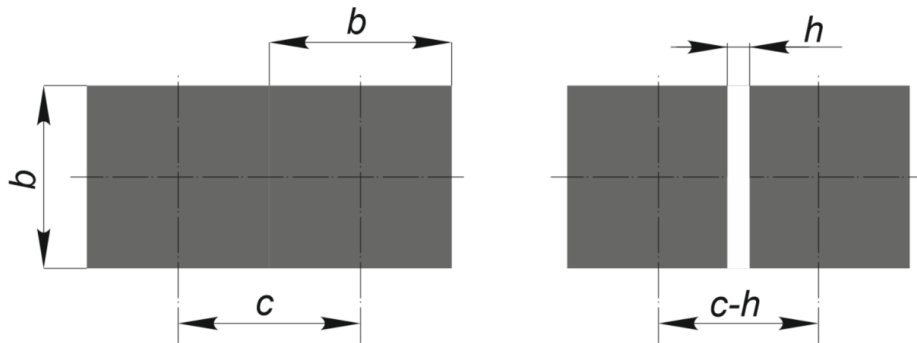
Другий варіант отворів: перетину "коло - квадрат", рис. 6.



$b$  – розміри сторін квадрату;  $c$  – міжосьова відстань;  $h$  – площа перекриття

Рис. 6. Схема перекриття отворів з перетинами "коло - квадрат"

Третій варіант отверстий: сечення "квадрат– квадрат", рис. 7.



$b$  – розміри сторін квадрату;  $c$  – міжосьова відстань;  $h$  – площа перекриття

Рис. 7. Схема перекриття отворів з перетинами "квадрат– квадрат"

Площі перекриття для перетинів різної форми представлені на графіках, рис 8, 9, 10.

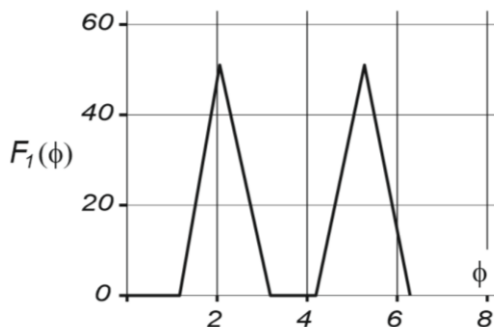


Рис. 8. Площа перекриття для перетину "коло – коло"

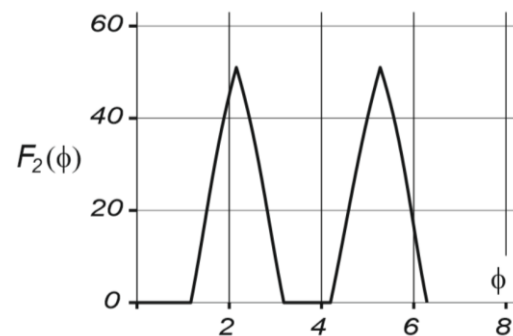


Рис. 9. Площа перекриття для перетину "коло – квадрат"

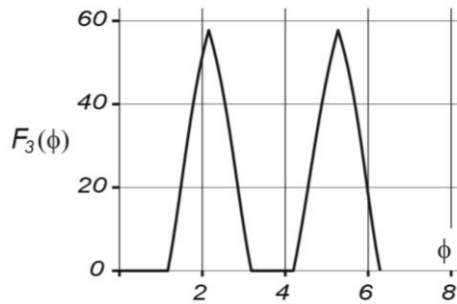


Рис. 10. Площа перекриття для перетину "квадрат-квадрат"

Для цих варіантів величина площі складала: перетин "коло-коло"  $P_1 = 92,04 \text{ мм}^2$ ; перетин "коло-квадрат"  $P_2 = 46,02 \text{ мм}^2$ ; перетин "квадрат-квадрат"  $P_3 = 121,6 \text{ мм}^2$ .

Провівши аналіз, можна зробити висновок, що максимальна площа перекриття характерна для випадку квадрат-квадрат, але при цьому даний варіант має складності конструктивного виконання.

В роботі також наведено експериментальні дослідження залежності витрати повітря через

прохідний перетин клапана пульсатора. Дослідження проводилися за допомогою пластини і тензодатчика.

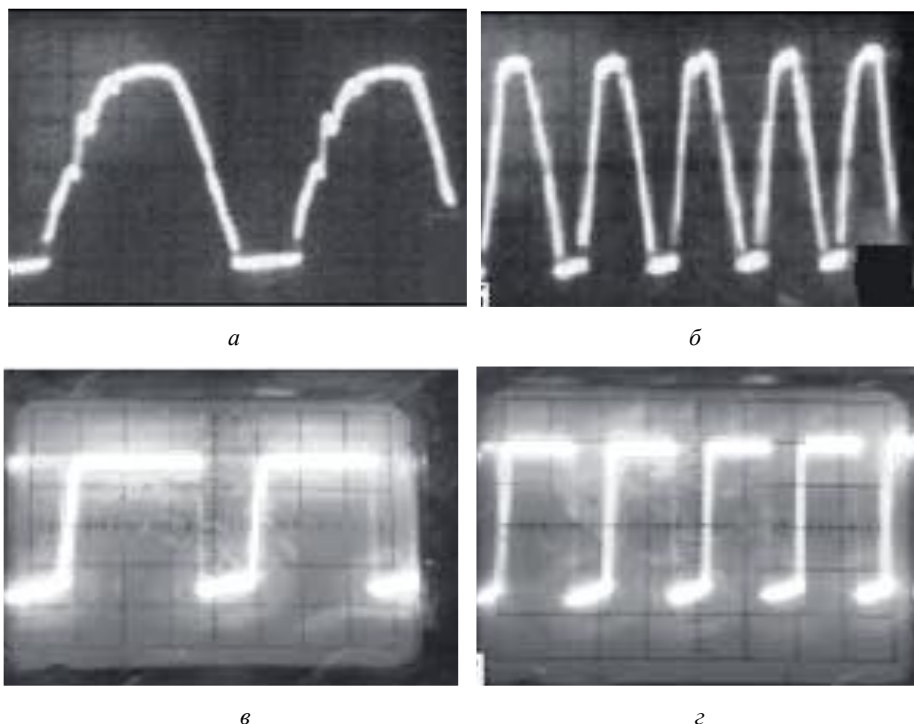
Характер зміни імпульсів витрати повітря наведено на рис. 11 для двох випадків форми перетину прохідного каналу пульсатора.

Характер графічних ліній контурів імпульсу витрати повітря відрізняється від контурів (характеру) імпульсу теоретичних досліджень виду конструктивних особливостей досвіду, однак носить імпульсний характер відповідної форми [12, 13, 14].

При розробці пристрою досліджували ефективність динамічного напору струменя і форму імпульсів в залежності від прохідного перетину каналу сопла металізатора.

Експериментальні (практичні) виміри форми імпульсів і динамічного напору в залежності від частоти здійснювали методом впливу розпилювального струменя на металеву пластинку, на якій встановлювали тензодатчик.

Сигнали з тензодатчика реєстрували за допомогою осцилографа, рис. 11.



30 Гц. (а), 65 Гц. (б) – круглий перетин, 40 (в), 75 (г) Гц. – прямокутний перетин

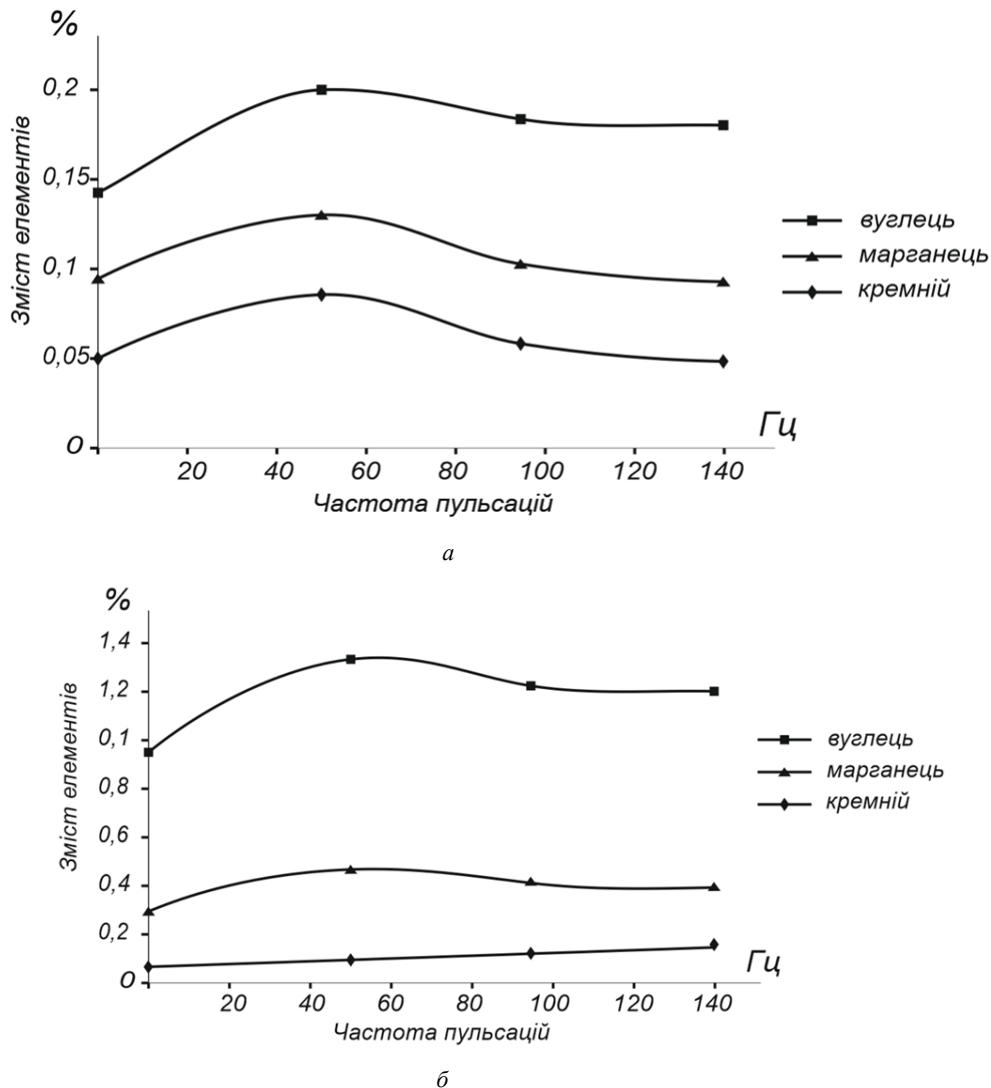
Рис. 11. Зміни динамічного напору струменя в залежності від застосовуваного прохідного перетину сопла з частотою пульсацій

Таким чином, з наведених осцилограм видно, що розпилювальний струмінь носить пульсуючий характер з часовими проміжками, рис. 11.

Як показали дослідження, застосування різного прохідного перетину каналу сопла дозволяє змінювати і характер наростання самого імпульсу. При використанні прямокутного перетину прохідного каналу має місце зростання і падіння напору струменя, синусоїдальність відсутня. Загальним для синусоподібної і прямокутної форм перекриття

(рис. 11 в, г) є наявність паузи в розпиленні, що необхідна для утворення рідкого металу на торці електродів.

Також авторами проведено аналіз хімічного складу покриттів, отриманих методом дугової металізації з використанням різної частоти пульсацій при подачі повітря. Вплив частоти пульсацій розпилювального повітряного струменя на хімічний склад покриттів представлено на графиках [14, 15, 16].



**Рис. 12.** Вплив частоти пульсацій розпилюючого повітряного струменя на хімічний склад покриттів для різних дротів: а – дріт Св-08А; б – дріт 12Х18Н10Т

Авторами було застосовано практичне використання клапана пульсатора (з регулюванням частоти пульсацій у діапазоні 0 – 120 Гц.) при дуговому напиленні матеріалів Св-08А, 12Х18Н10Т, проведено хімічний аналіз складу отриманих покриттів і на основі результатів збудовано графіки.

Представлені графіки (рис. 12) показують, що при використанні пульсуючого повітряно-розпилювального струменя має місце збільшення вмісту легуючих елементів в покритті. Так, при частоті пульсацій 43 Гц, вміст вуглецю зростає на 38%, марганцю на 46%, кремнію на 42% для дроту Св-08А (рис. 12, а) у порівнянні з напиленням покриттям без пульсацій. Аналогічне збільшення вмісту елементів спостерігається і в напилених покриттях при використанні дроту 12Х18Н10Т (рис. 12, б). Оптимальною частотою пульсацій є діапазон  $\approx 60$  Гц., спостерігається мінімальне окислення елементів. При збільшенні частоти понад 80 Гц, спостерігається деяке збільшення втрат, тому що збільшується час взаємодії рідкого металу з киснем повітряно-розпилювального

струменя.

## Висновки

Проведено математичний аналіз та моделювання процесу руху повітряного потоку з використанням принципу положень ротаційного клапана.

Ефект пульсуючої подачі досягається за рахунок обертання валу з отвором, що періодично з'єднує вхідний і вихідний патрубков циліндра пульсатора.

При використанні пульсуючого повітряно-розпилювального струменя має місце збільшення вмісту легуючих елементів в покритті: вміст вуглецю зростає на 38%, марганцю на 46%, кремнію на 42% для дроту Св-08А у порівнянні з напиленням покриттям без пульсацій. Аналогічне збільшення вмісту елементів спостерігається і в напилених покриттях при використанні дроту 12Х18Н10Т.

Таким чином метод пульсуючої подачі повітря при дуговій металізації дозволяє підвищити якість отриманих покриттів, знизити витрату розпилювального повітря.

### Список літератури

1. Барановский В. Э. Разработка технологии процесса нанесения антифрикционных покрытий активированной дуговой металлизацией : автореф. диссер. канд. техн. наук. Минск, 1986. С. 16.
2. Xiaoou H, Yufen L. The current situation and future of thermal industry in China. *Thermal Spray Solutions. Advance in Technology and Application Proc. Of ITSC-2004*. Osaka, Japan, 2009.
3. Sundararajan G., Mahajan Y. R, Joshi S. V. Thermal spraying in Indian: status and prospects. Expanding thermal spray performance to new markets and application. *Proc. of ITSC-2009*. Las-Vegas, USA, 2009. P. 511–516.
4. Вахалин В. А., Масленков С. Б., Кудинов В. В. Процесс плавления и распыления материала электродов при электродуговой металлизации. *Физика и химия обработки материалов*. 1981. № 3. С. 58–63.
5. Коробов Ю. С., ИЗОИТКО В. М., ПРЯДКО А. С. Восстановление деталей методом активированной дуговой металлизации. *Автомобильная промышленность*. 2000. № 1. С. 23–24.
6. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Плохов А. В. Научные основы технологии холодного газодинамического напыления (ХГН) и свойства напыленных материалов. Новосибирск : НГТУ, 2006. 280 с.
7. Коробов Ю. С., Шумяков В. И., ПРЯДКО А. С. Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2013. № 3. С. 17–21.
8. Вахалин В. А., Масленков С. Б., Кудинов В. В. Процесс плавления и распыления материала электродов при электродуговой металлизации. *Физика и химия обработки материалов*. 1981. № 3. С. 58–63.
9. Роянов В. А., Бобиков В. И. Устройство для электродуговой металлизации с пульсирующим режимом истечения воздушно-распыляющей струи. *Сварочное производство*. 2015. № 4. С. 12–15.
10. Катц Н. В., Антошин Е. В., Вадивасов Д. Г. Металлизация распылением. М. : Машиностроение, 1966. 200 с.
11. Лялякин В. П., Саблуков А. С., Литовченко Н. Н. Исследование процесса динамического диспергирования металла при электродуговой металлизации. *Сварочное производство*. 2000. № 1. С. 16–24.
12. Роянов В. А., Захарова И. В., Крючков Н. С. Снижение воздействия кислорода на жидкий металл при электродуговом напылении пульсирующей струей воздуха. *World Science*. № 5 (45). DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/31052019/6508](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31052019/6508)
13. Royanov V., Zakharova I., Lavrova E. Developmen to fproperties of spray flowand nature of pressure distributionin electric arc metalization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 6/5 (90). С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118252>
14. Роянов В. А., Захарова И. В. Энерго и ресурсосбережение при электродуговом напылении покрытий : Монография. ГВУЗ "ПГТУ", ПРАТ газета "Приазовский рабочий". Мариуполь, 2018. 143 с.
15. Роянов В. А., Захарова И. В., Крючков Н. Изучение влияния конструкций распыляющего устройства на качество напыленного слоя. Университетская наука – 2017: Междун. науч.-техн. конф. Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, 18-19 мая 2017. Мариуполь : ГВУЗ "ПГТУ", 2017. Т. 2. С. 86–87.
16. Захарова І. В., Роянов В. О., Крючков М. С. Вплив пульсуючого розпилювального потоку на ефективність використання електродів, при утворенні покриттів. Матеріали 4 міжнародної науково-практичної конференції "Topical is sues of the developmen to fmodern science". Софія, Болгарія, 11-13 грудня, 2019. С. 88–94.

### References

1. Baranovskii, V. E. (1986), Development of technology for the application of antifricion coatings by activated arc metallization [Razrabotka tekhnologii protsessna naneseniia antifrikcionnykh pokrytii aktivirovannoi dugovoi metallizatsiei] : avtoref. disser. kand. tekhn. nauk., Minsk, P. 16.
2. Xiaoou, H, Yufen, L. (2009), "The current situation and future of thermal industry in China", *Thermal Spray Solutions, Advance in Technology and Application Proc. Of ITSC-2004*, Osaka, Japan.
3. Sundararajan, G., Mahajan, Y. R, Joshi, S. V. (2009), "Thermal spraying in Indian: status and prospects", *Expanding thermal spray performance to new markets and application, Proc. of ITSC-2009*, Las-Vegas, USA, P. 511–516.
4. Vakhalin, V. A., Maslenkov, S. B., Kudinov, V. V.(1981), "The process of melting and atomization of the electrode material in electric arc metallization" ["Protcess plavleniia i raspyleniia materiala elektrodov pri elektrodugovoi metallizatsii"], *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, No. 3, P. 58–63.
5. Korobov, Iu. S., Izoitko, V. M., Priadko, A. S. (2000), "Restoration of parts by activated arc metallization method" ["Vosstanovlenie detalei metodom aktivirovannoi dugovoi metallizatsii"], *Avtomobilnaia promyshlennost*, No. 1, P. 23–24.
6. Alkhimov, A. P., Kosarev, V. F., Plokhov, A. V. (2006), *Scientific basis of cold gas-dynamic spraying (CGN) technology and properties of sprayed materials* [Nauchnye osnovy tekhnologii kholodnogo gazodinamicheskogo napyleniia (KhGN) i svoistva napylenykh materialov], Novosibirsk, NGTU, 280 p.
7. Korobov, Iu. S., Shumiakov, V. I., Priadko, A. S. (2013), "A rational approach to the restoration of parts of equipment by thermal spraying" ["Ratsionalnyi podkhod k vosstanovleniiu detalei oborudovaniia gazotermicheskim napyleniem"], *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiia*, No. 3, P. 17–21.
8. Vakhalin, V. A., Maslenkov, S. B., Kudinov, V. V. (1981), "The process of melting and atomization of the electrode material in electric arc metallization" ["Protcess plavleniia i raspyleniia materiala elektrodov pri elektrodugovoi metallizatsii"], *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, No. 3, P. 58–63.
9. Roianov, V. A., Bobikov, V. I. (2015), "A device for electric arc metallization with a pulsating regime of the expiration of the air-spray jet" ["Ustroistvo dlia elektrodugovoi metallizatsii s pulsiruiushchim rezhimom istecheniia vozduшно-raspyliaiushchei strui"], *Svarochnoe proizvodstvo*, No. 4, P. 12–15.
10. Kattc, N. V., Antoshin, E. V. Vadivasov, D. G (1966), *Spray metallization [Metallizatsiia raspyleniem]*, Moscow, Mashinostroenie, 200 p.
11. Lialiakin, V. P., Sablukov, A. S., Litovchenko, N. N. (2000), "Investigation of the process of dynamic dispersion of a metal during electric arc metallization" ["Issledovanie protsessna dinamicheskogo dispergirovaniia metalla pri elektrodugovoi metallizatsii"], *Svarochnoe proizvodstvo*, No. 1, P. 16–24.

12. Roianov, V. A., Zakharova, I. V., Kriuchkov, N. S. (2019), "Reducing the effect of oxygen on liquid metal during electric arc spraying with a pulsating air stream" ["Snizhenie vozdeistviia kisloroda na zhidkii metall pri elektrodugovom napylenii pulsiruiushchei struei vozdukha"], *WorldScience*, No. 5 (45). DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/31052019/6508](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31052019/6508)
13. Royanov, V., Zakharova, I., Lavrova, E. (2017), "Development to properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metalization", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6/5 (90), P. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118252>
14. Roianov, V. A., Zakharova, I. V. (2018), Energy and Resource Saving in Electric Arc Coating [Energia i resursoberezhenie pri elektrodugovom napylenii pokrytii]: Monograph, GVUZ "PGTU", PRAT gazeta "Priazovskii rabochii", Mariupol, 143 p.
15. Roianov, V. A., Zakharova, I. V., Kriuchkov, N. (2017), "Study of the effect of spray device designs on the quality of the sprayed layer" ["Izuchenie vliianiia konstrukcii raspyliaiushchego ustroistva na kachestvo napylenogo sloia"], *Universitetskaia nauka – 2017: Mezhdun. nauch.-tekhn. konf., Priazovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, Mariupol, 18-19 May 2017*, Mariupol, GVUZ "PGTU", Vol. 2, P. 86–87.
16. Zakharova, I. V., Roianov, V. O., Kriuchkov, M. S. (2019), "Influence of a pulsating spray stream on the efficiency of the use of electrodes in the formation of coatings" ["Vpliv pulsuuiuchogo raspiliivalnogo potoku na effektivnost vikoristannia elektrodov, pri utvorenii pokrytiev"], *Materiali 4 mizhnarodnoi naukovopraktichnoi konferencii "Topical issues of the development to modern science" Sofiia, Bolgariia, 11-13 December 2019*, P. 88–94.

Надійшла (Received) 28.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Захарова Ірина Вячеславівна** – кандидат технічних наук, доцент, Приазовський державний технічний університет, доцент кафедри автоматизації та механізації зварювального виробництва, Маріуполь, Україна; email: Zsv-73@i.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3492-0134>.

**Захарова Ирина Вячеславовна** – кандидат технических наук, доцент, Приазовский государственный технический университет, доцент кафедры автоматизации и механизации сварочного производства, Мариуполь, Украина.

**Zakharova Irina** – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Priazovskiy State Technical University, Associate Professor of the Department of Automation and Mechanization of Welding Production, Mariupol, Ukraine.

**Роянов Вячеслав Александрович** – доктор технічних наук, професор, Приазовський державний технічний університет, професор кафедри автоматизації та механізації зварювального виробництва, Маріуполь, Україна; email: rva-41@i.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5379-9096>.

**Роянов Вячеслав Александрович** – доктор технических наук, профессор, Приазовский государственный технический университет, профессор кафедры автоматизации и механизации сварочного производства, Мариуполь, Украина.

**Royanov Vyacheslav** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Priazovskiy State Technical University, Professor of the Department of Automation and Mechanization of Welding Production, Mariupol, Ukraine.

**Серенко Олександр Микитович** – кандидат технічних наук, професор, Приазовський державний технічний університет, професор кафедри автоматизації та механізації зварювального виробництва, Маріуполь, Україна; email: Zsv-73@i.ua.

**Серенко Александр Никитич** – кандидат технических наук, профессор, Приазовский государственный технический университет, профессор кафедры автоматизации и механизации сварочного производства, Мариуполь, Украина.

**Serenko Alexandr** – PhD (Engineering Sciences), Professor, Priazovskiy State Technical University, Professor of the Department of Automation and Mechanization of Welding Production, Mariupol, Ukraine.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ С ПУЛЬСИРУЮЩИМ РАСПЫЛЯЮЩИМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЙ

**Предметом** исследования является интенсивное окисление металла, который распывается в процессе дуговой металлизации, за счет кислорода воздуха, что приводит к значительному уменьшению содержания легирующих элементов в покрытии и соответственно ухудшает качество напыленного слоя. Этому вопросу уделяли внимание и другие авторы научных публикаций, предлагали использование керосина, пропано-воздушной смеси, инертных газов в качестве транспортирующего газа, но эти решения приводили к значительному удорожанию процесса дуговой металлизации, и чаще всего не имели количественных расчетов влияния на качество покрытий или носили приблизительный характер. **Целью** работы было выбрано научное обоснование концепции повышения качества покрытий за счет снижения негативного воздействия кислорода воздуха при дуговой металлизации путем применения пульсирующего распывающего потока воздуха. С целью снижения окислительного воздействия воздушно-распылительной струи на жидкий металл электродов предложен метод пульсирующей подачи воздуха в зону плавления электродов путем введения дополнительного элемента - клапана пульсатора в распывающую систему электродугового металлизатора. **Задачей** данной статьи является определение и выбор конструкции устройства - клапана пульсатора для создания управляемого пульсирующего распывающего потока с определенными импульсами при дуговой металлизации. Для выполнения поставленной задачи в работе использовались **методы** теоретического подхода, а именно математический анализ, а также практические результаты - приведены данные по наличию пульсаций воздушного потока зафиксированы осциллографом. Таким образом, теоретическое обоснование применения клапана пульсатора подтверждено практическими результатами. На основе представленного анализа получены **результаты**, позволили определить оптимальное конструктивное исполнение, что позволяет максимально снизить влияние

потока, транспортирующего частицы (именно кислорода воздуха) материала электродов, которые распыляются. **Выводы** по работе: использование пульсирующей распыляющей струи воздуха при нанесении покрытий методом дуговой металлизации, позволит уменьшить выгорание легирующих элементов, таких как марганец, кремний, увеличить содержание углерода в нанесенном покрытии, соответственно улучшит качество восстановленных деталей.

**Ключевые слова:** легирующие элементы; кислород; дуговая металлизация; пульсирующий поток воздуха; электроды; клапан-пульсатор; покрытие; математическое моделирование.

## THEORETICAL RESEARCH AND PRACTICAL DEVELOPMENT OF THE ARC SPRAYING PROCESS WITH A PULSATING SPRAY AIR STREAM TO IMPROVE THE QUALITY OF COATINGS

The **subject** of the study is intensive oxidation of metal, sprayed in the process of arc metallization, due to the oxygen in the air, which leads to a significant reduction in the content of alloying elements in the coating and, accordingly, deteriorates the quality of the sprayed layer. Other authors of scientific publications also paid attention to this issue, proposed the use of kerosene, propane and air mixture, inert gases as a transport gas, but these solutions led to a significant increase in the cost of the arc metallization process, and most often had no quantitative calculations of the impact on the quality of coatings or were approximate. The **aim** of the work was to scientifically substantiate the concept of quality of coatings by reducing the negative impact of air oxygen during arc metallization through the use of a pulsating spray airflow. In order to reduce the oxidative effect of air-spraying jet on the liquid metal of electrodes the method of pulsating air supply to the electrode melting zone by introducing an additional element - pulsator valve in the spray system of electroarc metallizer was proposed. The **task** of this article is to define and select the design of the device - pulsator valve for creating a controlled pulsating spray flow with certain impulses during arc metallization. The methods of theoretical approach, namely, mathematical analysis, were used to accomplish the task in this paper, as well as practical results – data on the presence of airflow pulsations recorded by an oscilloscope. Thus, the theoretical justification of the pulsator valve application is confirmed by practical results. Based on the presented analysis the **results** were obtained, which allowed to determine the optimal design, and allows minimizing the impact of the particles (namely oxygen in the air) transporting flow on the material of the electrodes that are sprayed. **Conclusions:** the use of a pulsating spray airflow during the application of coatings by arc metallization method will reduce the burnout of alloying elements such as manganese, silicon, increase the carbon content in the applied coating, therefore improving the quality of the restored parts.

**Keywords:** alloying elements; oxygen; arc metallization; pulsating airflow; electrodes; pulsator valve; coating; mathematic modeling.

### Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Захарова І. В., Роянов В. О, Серенко О. М. Теоретичні дослідження та практична розробка процесу дугового напилення з пульсуючим розпилювальним потоком повітря з метою підвищення якості покриттів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 114–121. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.114>.

Zakharova, I., Royanov, V., Serenko, A. (2020), "Theoretical research and practical development of the arc spraying process with a pulsating spray air stream to improve the quality of coatings", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 114–121. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.114>.

І. Ш. НЕВЛЮДОВ, Н. П. ДЕМСЬКА, В. А. ПАЛАГІН, І. В. БОЦМАН

## МАТРИЧНО-СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГНУЧКИХ МІЖЗ'ЄДНАНЬ І КОМПОНЕНТІВ МЕМС

Конструкції сучасної електронної техніки є складними механічними системами з безліччю жорстких зв'язків, а їх мікромініатюризція у багатьох випадках дійшла до фізичної межі розмірного, зарядового та енергетичного квантування компонентів. Для таких механічних систем, з неklasичними для механіки способами кріплення окремих конструктивних елементів, складно побудувати розрахункову модель, досить просту і в той же час таку, що добре відображає фізичні і динамічні властивості. Для забезпечення механічної міцності міжз'єднань та зверхтонких електронних компонентів необхідною є можливість визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій. Ці причини зумовлюють необхідність застосування чисельних методів для розрахунку динамічних параметрів конструкцій міжз'єднань електронної техніки, що дозволить підвищити показники надійності розроблених засобів, що відповідають вимогам нормативно-технічної документації по механічним характеристикам, скоротити терміни і вартість їх створення. **Предметом** даної роботи є дослідження деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осьових сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі. **Метою** даної роботи є визначення деформації елементів конструкції пристроїв з використанням матриці жорсткості при відомому векторі зовнішніх сил. Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних завдань: розглянути існуючі методи опису та аналізу, які враховують специфіку використовуваних конструкцій і технологічних процесів виготовлення конкретних структур МЕМС; дослідити сутність цих методів; провести розрахунок переміщень і деформацій, використовуючи метод скінченних елементів; використовуючи матрицю жорсткості, визначити деформації елементів конструкції пристроїв; провести розрахунок деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осьових сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі. **Висновки:** матриця жорсткості, побудована з використанням матричного функціонального аналізу, дозволяє забезпечити розрахунок деформації елементів МЕМС і гнучких електронних міжз'єднань.

**Ключові слова:** мікроелектромеханічні системи; міжз'єднання; метод скінченних елементів; напружено-деформований стан; деформація; зсув.

### Вступ

На даний момент тенденції виробництва ґрунтуються на впровадженні нових рішень і технологій Industry 4.0, IoT, хмарних сервісів і т.п [1, 2], найважливішу роль в працездатності яких грають сучасні технічні засоби автоматизації (сенсори, виконавчі пристрої, регулятори, тощо), які мали б забезпечити необхідний рівень точності, параметри швидкодії, малі габаритно-масові характеристики, високу функціональність, низьке енергоспоживання і вартість [1].

Основною проблемою інтеграції сучасних технічних засобів для впровадження технології Industry 4.0 залишається те, що нині, всі готові деталі базуються на традиційних електронних компонентах жорстких (гнучко-жорстких) друкованих плат, які мають значну товщину і обмежені в гнучкості, а також не можуть мати повністю адаптоване апаратне рішення для кожного конкретного розміру і форми об'єкта автоматизації [3]. Тому сучасні технології йдуть від традиційного дизайну жорсткої електроніки в майбутнє гнучких форм-факторів, які можуть запропонувати нові функціональні можливості, які раніше не були можливі, особливо на ринках, таких як медицина, IoT, сенсори і смарт-текстиль [4, 5].

Сфера застосування гнучкої електроніки досить широка і охоплює як побутову техніку, так і компоненти військової, авіаційної, космічної, медичної та промислової апаратури. Їх широке застосування в даних сферах обумовлено рядом переваг: компактність, навіть при великій кількості контактів; проста і швидка заміна пошкодженого

кабелю; організація провідників, яка виключає заплутування; з'єднання модулів і виконавчих пристроїв, віддалених один від одного, в рамках одного блоку або виробу; "рухливість" з'єднання [6].

Більшість гнучких схем – всього лише пасивні з'єднувальні елементи, які використовуються для з'єднання таких електронних компонентів, як інтегральні схеми, резистори, конденсатори, однак, деякі з них можуть застосовуватися і для створення взаємного зв'язку між іншими електронними блоками як безпосередньо чи через з'єднувачі.

Для їх створення характерно широке використання нових матеріалів, конструктивно-технологічних рішень, мікромініатюризція, автоматизація та інтелектуалізація всіх етапів створення виробів. Необхідність враховувати принципи функціонування приладів і систем, зростаючі вимоги до точності, надійності, швидкодії, обсяги інформації, що опрацьовується [7], визначає необхідність використання і розвитку різних напрямків функціональної електроніки, мікросистемної техніки (МСТ) і нанотехнологій, інтелектуальних і 4D технологій.

МСТ, як сполучна ланка між мікроелектронікою, мікромеханікою і нанотехнологіями сприяє їх взаємному розвитку та збереженню темпів розвитку електронних пристроїв згідно емпіричному закону Мура [8]. Мікроелектромеханічні системи (МЕМС), як одним з напрямків МСТ, забезпечує створення мікромініатюрних міжз'єднань, основною проблемою яких є зменшення жорсткості, як окремих елементів, так і всієї конструкції в цілому. Проблеми, що виникають у зв'язку з цим вирішуються різними способами. Одним з універсальних принципів

забезпечення міцності конструкцій є використання властивості пружності елементів і пристроїв конструкції, які засновані на аналізі напружено-деформованого стану (НДС) під дією системи зовнішніх сил, розподілів температури, фізичних властивостей матеріалів і особливостей структури [8].

### Постановка задачі та мета досліджень

Різноманітні види міжз'єднань, балки і мембрани є багатофункціональними компонентами МСТ. Вони використовуються в якості плоских пружин (підвісів), в тому числі багатовиткових чутливих елементів сили, тиску, швидкості, потоку, частоти, температури, вмісту газів, консолей, міліліпеди, кутів нахилу, прискорення та ін. [9, 10].

Проектування міжз'єднань апаратури, мікромеханічних сенсорів і актюаторів базується на їх ієрархічному поданні як сукупності елементів загального призначення і оцінці параметрів на основі узагальнених механічних і електричних величин.

Елементами загального призначення є шлейфи, балки, мембрани, електростатичні зазори, вузли елементів корпусу. В цілому механічні елементи представляються у вигляді мас, елементів пружності (жорсткості), демпфування і втрат. Електричними параметрами служать напруги і струми.

Механічні узагальнені сили визначають НДС елементів структури, електричні струми та напруги – теплову, електричну та магнітну взаємодію елементів. І ті й інші проявляються у вигляді узагальнених сил (сил, моментів сил, напружень, електричних напруг) та переміщень (деформацій), швидкостей, прискорень, струмів.

Узагальнені сили визначають напружено-деформований стан елементів структури. Використання узагальнених сил, мас, координат базується на принципах фізичних аналогій. Для МЕМС – це електромеханічні аналогії: "сила-напруга" і "сила-струм" [10].

У більшості випадків аналітичні методи аналізу зважаючи на складність геометрії пристроїв, різні властивості окремих мікрообластей розглянутих структур не представляється можливим. Методи опису та аналізу повинні в необхідній мірі враховувати специфіку використовуваних конструкцій і технологічних процесів виготовлення конкретних структур.

Аналітична механіка для опису динамічних процесів руху і деформацій використовує принципи фізичних аналогій, які в термінах узагальнених координат, сил, мас і похідних понять одноманітно представляють залежність параметрів руху і деформацій від діючих сил різної природи, властивостей матеріалів, структури [11, 12]. Методами вирішення подібних задач є метод матричного структурного аналізу [13] та метод скінчених елементів (МСЕ) [14]. Ці методи на даний час є найбільш простими числовими методами для вирішення завдань механіки деформованого твердого тіла; вони успішно застосовуються для розрахунку

конструкцій практично будь-якої складності, систем, що мають складну геометричну конфігурацію та нерегулярну фізичну структуру завдяки властивій їм універсальності й алгоритмічності [15, 16].

Сутність методів полягає в розбивці структури на малі (кінцеві) елементи, які взаємодіють між собою в вузлових точках, в яких визначаються фіктивні сили, еквівалентні поверхневим напруженням, розподіленим по межах елементів. Для кожного елемента складається рівняння руху [17].

### Розрахунок елементів матриці жорсткості елемента структури за методом скінчених елементів

Розробка складних МЕМС пристроїв виконується з використанням систем автоматизованого проектування, (Sugar, Coventor, Tanner Pro, MemCad) об'єднання взаємодіючих простих мікромеханічних балок, мембран, електростатичних проміжків, вузлів, кріплень до корпусу та ін., на основі аналізу напружено-деформованого стану під дією системи зовнішніх сил, розподілів температури, фізичних властивостей матеріалів і особливостей структури. МЕМС компоненти, за електромеханічними властивостями дозволяють проектувати різного рівня ієрархії датчики високої швидкодії, чутливості і конструктивно-технологічних параметрів [18]. Перераховані характеристики пов'язані одним загальним для електромеханічних систем рівнянням, що визначає власну резонансну частоту системи  $\omega_0$ , а отже і швидкодію:

$$\omega_0^2 = \frac{K}{M},$$

де  $K$  – жорсткість, пружність кріплення;  $M$  – рухома маса.

З огляду на зв'язок пружності з чутливістю датчика, отримуємо умову інваріантності балкових, мембранних і мембранно-балкових структур:

$$f_0^2 MS = const.$$

де  $S = 1 / K$ .

Ставлячи потрібні значення однієї з трьох величин визначаємо залежність між двома іншими величинами.

У загальному випадку рівняння руху, в тому числі і деформації механічної системи, що містить основні компоненти: маси  $M$ , втрат і демпфірування  $R$ , пружності (жорсткості)  $K$ , під дією зовнішніх, внутрішніх сил структури, які визначаються розподілом напружень, температури в елементах, фізичними властивостями матеріалів і особливостями конструкції, представляється у вигляді [13, 19]:

$$[m]\{q\} + [R]\{q\} + [K]\{q\} = \{F\}, \quad (1)$$

де  $\{q\}$  – вузлові ступені свободи ( $\{q\} = \{x_1, y_1, z_1; \dots; x_n, y_n, z_n\}$  – вектор (матриця) стовпців координат розташування вузлів  $1 \times i$ );  $\{F\}$  – вектор (матриця) узагальнених сил структури.

Індивідуальні матриці збираються в систему матриць  $[K]$ ,  $[R]$  і  $[m]$  – жорсткості, втрат і мас – відповідно. У матрицях всі елементи пов'язані з загальними вузлами, що досягається суперпозицією вузлів. Індекси елементів вказують в системній матриці безпосереднє значення вузлових координат компонентів.

Зовнішні узагальнені сили  $F$  діють на узагальнені основні фізичні елементи: маси, пружності, елементи втрат і демпфування, розподілені в малих обсягах структури  $ij$  (кінцевих елементах). Матриці мас, втрати, жорсткості складаються з підматриць окремих кінцевих елементів структури з координатами, визначеними індексами  $ij$ :  $m_{ij}$ ,  $k_{ij}$ ,  $r_{ij}$ .

За матричним рівнянням (1) може виконуватись аналіз функціонування пристроїв МЕМС в режимах постійного струму, перехідному, сталому режимі при впливі гармонійних коливань різної частоти, динамічному.

Елементом маси структури зовнішні сили надають прискорення, змінюючи їх кінематичну енергію, на елементах жорсткості під дією пружної деформації змінюється потенційна енергія, переміщення (і деформації) викликають втрати частини енергії пропорційно швидкості переміщень [20].

Розподіл діючих сил між окремими складовими частинами рівняння (1) залежить від характеру діючих сил, конструкції і механічних властивостей матеріалів структури, тобто матриць  $[m]$ ,  $[R]$  і  $[K]$ .

При розрахунках переміщень і деформацій кінцевих елементів використовуються класичні теорії пружності, опору матеріалів, матрично-структурного аналізу і різних методи: скінченних елементів, вузлового аналізу, рівняння динаміки.

Жорсткість розраховується, використовуючи теорему Кастільяно;

$$F_i = \frac{\partial S}{\partial \delta_i},$$

де  $F_i$  – узагальнена сила (тобто сила або момент), а  $\delta_i$  – зміщення координат для трьох ступенів рухливості.

Залежно від характеру діючих сил розрізняють об'ємні, площинні і лінійні напружено-деформовані стани твердого тіла [10].

При об'ємному напруженому стані деформації зсуву визначаються нормальними  $\sigma$  і дотичними  $\tau$  напруженнями, а в загальному випадку для анізотропних матеріалів – тензорами четвертого рангу напруг і деформацій. З урахуванням просторової

симетрії властивостей пружності матеріалів з кубічною кристалічною структурою число незалежних змінних зменшується до 36 [9].

При малих значеннях зсувів об'ємні деформації визначаються наступними лінійними залежностями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= s_{11}\sigma_x + s_{12}\sigma_y + s_{13}\sigma_z + s_{14}\tau_{yz} + s_{15}\tau_{yx} + s_{16}\tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= s_{21}\sigma_x + s_{22}\sigma_y + s_{23}\sigma_z + s_{24}\tau_{yz} + s_{25}\tau_{yx} + s_{26}\tau_{xy} \\ \varepsilon_z &= s_{31}\sigma_x + s_{32}\sigma_y + s_{33}\sigma_z + s_{34}\tau_{yz} + s_{35}\tau_{yx} + s_{36}\tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= s_{41}\sigma_x + s_{42}\sigma_y + s_{43}\sigma_z + s_{44}\tau_{yz} + s_{45}\tau_{zx} + s_{46}\tau_{xy} \\ \gamma_{zx} &= s_{51}\sigma_x + s_{52}\sigma_y + s_{53}\sigma_z + s_{54}\tau_{yz} + s_{55}\tau_{zx} + s_{56}\tau_{xy} \\ \gamma_{xy} &= s_{61}\sigma_x + s_{62}\sigma_y + s_{63}\sigma_z + s_{64}\tau_{yz} + s_{65}\tau_{zx} + s_{66}\tau_{xy} \end{aligned} \quad (2)$$

або у векторно-матричній формі, позначивши для економії місця запису векторів-стовпців деформації та напруг:

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\} = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6\};$$

$$\varepsilon_i = s_{ij}\sigma_{ij}; \quad (3)$$

$$\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\} = \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6\}$$

$$\sigma_i = k_{ij}\varepsilon_{ij}, \quad (4)$$

де  $S$  та  $K$  – матриці, розмірність в яких визначається розмірністю вектор-стовпців,  $k_{ij}$  – коефіцієнти пружності;  $s_{ij}$  – коефіцієнти податливості матеріалу в напрямку дії відповідної напруги, слід зазначити що  $s_{ij} \neq 1/k_{ij}$ ;  $\varepsilon_i$  – відносні деформації (розтягування-стиснення) по осях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $\gamma_{ij}$  – кути зсуву в площинах, які визначаються нижніми індексами. Індекси  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для зручності можуть змінюватись на 1, 2, ..., 6, в залежності від системи сил, що діють на структуру.

Описується деформуєча формула пружної структури під дією системи сил (і розподілу температури) трьома розподілами:

$$q_x = q_x(x, y, z); \quad q_y = q_y(x, y, z); \quad q_z = q_z(x, y, z). \quad (5)$$

Відносні (питомі) деформації представляються як часткові похідні розподілів  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$ , і при малих деформаціях залежності напруга-зміщення (деформація) будуть лінійними, а їх компоненти визначаються (6) [19]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial q_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial q_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial q_z}{\partial z}; \\ \varepsilon_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial q_x}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial q_z}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial z}; \quad \varepsilon_{zx} = \gamma_{xz} = \frac{\partial q_x}{\partial z} + \frac{\partial q_z}{\partial x}, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$  – являють собою нормальні зміщення, що викликаються нормальними напруженнями  $\sigma$ , а  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$ ,  $\gamma_{zx}$  – зміщення зсуву.

Таким чином, для опису пружного напруженого стану в тривимірному просторі потрібно шість компонент.

Термічні напруги, викликані тепловими впливами, можуть розраховуватися за формулою

$$\varepsilon_{Tij} = \delta_{ij} \alpha T \text{ для } i, j = x, y, z, \quad (7)$$

де  $\delta = \begin{cases} 1 \text{ для } j = i \\ 0 \text{ для } j \neq i \end{cases}$  – символ Кронекера. (8)

Деформація структури, при спільному навантаженні системою сил і температурних впливів (у вигляді розподілу температур) визначається сумарним впливом сил і температури

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} + \varepsilon_{Tij}, \quad (9)$$

тоді при

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})]; \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})]; \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}; \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz}; \gamma_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx}; \gamma = \frac{2(1+\mu)}{E} = G. \end{aligned} \quad (10)$$

З урахуванням температурних впливів:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T; \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T; \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})] + \alpha T \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{xy}; \gamma_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{yz}; \gamma_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{zx}. \end{aligned} \quad (11)$$

Важливо відзначити, що деформації  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  не залежить від температурних впливів на всю структуру.

З рівнянь (11) виходять такі залежності напружень:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_{xx} + \mu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})] - \frac{E\alpha T}{1-2\mu} \\ \sigma_{yy} &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_{yy} + \mu(\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx})] - \frac{E\alpha T}{1-2\mu}; \\ \sigma_{zz} &= \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_{zz} + \mu(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})] - \frac{E\alpha T}{1-2\mu} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \varepsilon_{xy} \\ \tau_{yx} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \varepsilon_{yz} \\ \tau_{zx} &= \frac{E}{2(1+\mu)} \varepsilon_{zx} \end{aligned} \quad (13)$$

Рівняння (10) і (11) можуть бути записані в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} + \alpha T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} - \frac{E\alpha T}{1-2\mu} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Всі попередні рівняння напружено-деформованого стану були виражені через модуль пружності Юнга  $E$  і коефіцієнт Пуассона  $\mu$ . Модуль зсуву  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ .

Ввівши позначення векторів-стовпців напруг і деформацій у вигляді:

$$\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}; \quad (16)$$

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}; \quad (17)$$

$$\chi_T = \frac{E}{1-2\mu} \{-1, -1, -1, 0, 0, 0\} = \chi_T^T; \quad (18)$$

$$\chi = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & & & \\ \mu & 1-\mu & \mu & & & \\ \mu & \mu & 1-\mu & & & \\ & & & \frac{1-2\mu}{2} & 0 & 0 \\ & & & 0 & \frac{1-2\mu}{2} & 0 \\ & & & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

в матричному записі маємо:

$$\sigma = \chi \varepsilon + \alpha T \chi_T. \quad (20)$$

Помноживши (20) на  $\chi^{-1}$ , отримаємо матричне подання напружено-деформованого стану:

$$\varepsilon = \chi^{-1} \sigma - \alpha T \chi^{-1} \chi_T = \Phi \sigma + \varepsilon_T, \quad (21)$$

де

$$\Phi = \chi^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & \mu & -\mu & & & \\ -\mu & 1 & -\mu & & & \\ -\mu & -\mu & 1 & & & \\ & & & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ & & & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ & & & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \quad (22)$$

та

$$\varepsilon_T = -\alpha T \chi^{-1} \chi_T = \alpha T \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}. \quad (23)$$

Матричне рівняння (1) дозволяє проводити аналіз функціонування пристроїв МЕМС в режимах постійного струму (direct current), встановленого стану (steady state), перехідного процесу (transient), динамічного режиму (dynamic mode).

Для цього необхідно описати властивості пристрою завданням матриць  $k_{ij}$ ,  $m_{ij}$ ,  $r_{ij}$  кінцевих елементів системи, з урахуванням досліджуваного режиму.

Для аналізу структури на постійному струмі рівняння (1) спрощується до рівняння рівноваги

$$[K]\{q\} = \{F\}, \quad (24)$$

тому що похідні координат дорівнюють нулю.

Рівновага визначається рівністю внутрішніх сил напружено-деформованого стану матеріалу структури, викликаного дією зовнішніх сил, і залежить від механічних властивостей матеріалу: модуля пружності Юнга  $E$ , коефіцієнта Пуассона  $\mu$ , коефіцієнта теплового розширення  $\alpha$ . Ці параметри формують для кожної структури індивідуальну матрицю жорсткості  $[K]$ . Жорсткість – це чисельний показник сили протидії матеріалу елемента структури при його деформації зовнішніми силами, розрахована на одиницю довжини елемента [8].

Матриця жорсткості  $[K]$  залежить також від способу впливу на структуру узагальнених зовнішніх сил (трьох-, двох-, одноірного навантаження).

Фізичний сенс елементів матриці жорсткості  $[K]$  для найбільш загального – тривимірного НДС наступний:

-  $K_{ij}$  – визначає силу, яку необхідно прикласти в напрямку  $j$  для отримання одиничного зсуву в напрямку  $i$ ;

- для значень  $i = j = 1, 2, 3$  елемент деформації є стисненням-розтягуванням під дією нормальних напружень та є рівними  $K_{ij} = \frac{EA}{l}$ , де  $A$  – площа поперечного перерізу балки,  $l$  – її довжина.

Вид матриці жорсткості залежить від сукупності безлічі діючих на структуру сил.

Для опису НДС при об'ємному напруженому стані, матриця має розмірність  $6 \times 6$  в кожному вузлі сітки структури, тобто вектор-стовпець напруг:

$$\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}.$$

Для плоского напруженого стану розрізняють два варіанти навантажень:

- стиснення тонких пластин:  $\sigma_{zz}, \sigma_{zx}, \sigma_{zy} = 0$ , модуль пружності тонких пластин  $\frac{E}{1-\mu^2}$  [19], вектор деформацій являє:  $\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}$ ;

- розтягування подовжених тіл з постійним поперечним перерізом:  $\varepsilon_{zz} = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ ,  $\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}$ .

Випадок стиснення тонкої пластини, передбачає, що вісь  $Z$  перпендикулярна площині пластини.  $\sigma_{zz} = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$ , тобто вектори напружень і деформацій мають вигляд:

$$\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}\}; \quad (25)$$

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}. \quad (26)$$

Закон Гука для плоского напружено-деформованого стану представляється у вигляді матриці  $3 \times 3$ .

Вектор-стовпець напруг, згідно закону Гука:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} - \frac{E\alpha T}{1-\mu} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Який в матричному вигляді може бути представлений

$$\sigma = \chi \varepsilon + \alpha T \chi_T, \quad (28)$$

де

$$\chi_T = \frac{E}{1-\mu} \{-1, -1, 0\}; \quad (29)$$

$$\chi = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Для визначення деформацій отримуємо

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + \alpha T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Крім того, виникає ненульова компонента:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\mu}{E}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \alpha T = -\frac{\mu}{1-\mu}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \frac{1+\mu}{1-\mu}\alpha T. \quad (32)$$

При деформації подовженого кінцевого елемента постійного перетину з рівномірним навантаженням впродовж осі. Слід підкреслити, що вісь  $Z$  змінила напрям у порівнянні з випадком стиснення тонкої пластини. Як і в попередньому випадку:

$$\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}\}, \quad (33)$$

$$\varepsilon = \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}, \quad (34)$$

$$\sigma = \chi \varepsilon + \alpha T \chi_T. \quad (35)$$

Вона не включається в вектор деформацій, тому що є лінійною комбінацією  $\varepsilon_{xx}$  і  $\varepsilon_{yy}$ .

### Розрахунок компонентів матриці жорсткості

Розглянемо приклад розрахунку деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осевих сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі (рис. 1). Позначення компонентів жорсткості відповідає номерам сил (рис. 1).

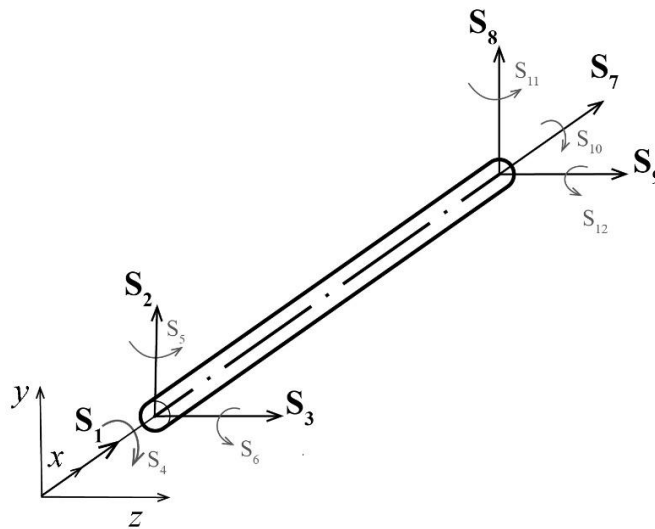


Рис. 1. Деформації балки постійного поперечного перерізу під дією осевих сил, згинальних моментів і крутного моменту щодо поздовжньої осі

Диференціальне рівняння для осевих зсувів  $u$  під дією сили  $S_1$  і теплових напружень:

$$S_1 = -\left(\frac{du}{dx} - \alpha T_m\right)EA,$$

$$T_m = \frac{1}{A} \int T dA,$$

$$S_1 x = -uEA + \alpha T_m EA + C_1 \begin{cases} x=0 & u=u_1 \\ x=l & u=0 \end{cases}.$$

Після інтегрування і врахування граничних умов (див. рис. 2) знаходимо  $C_1 = -S_1 l - \alpha T_m EA l$ .

Маємо

$$S_1 = \frac{EA}{l} u_1 + EA \alpha T_m,$$

$$S_1 = -S_2.$$

Алгебраїчна залежність сила-зміщення виражається залежністю  $S = Ku + Q$  і може використовуватися для визначення коефіцієнтів  $K_{ij}$  і термічних сил  $Q$ . Так  $K_{ij}$ , представляє силу  $S_i$ , необхідну для отримання одиничного переміщення  $u_j$ , коли всі інші сили (включаючи вплив температури) дорівнюють нулю.

$$K_{11} = \left( \frac{S_1}{U_1} \right)_{T=0} = \frac{EA}{l} \text{ та } K_{71} = \left( \frac{S_7}{U_1} \right)_{T=0} = \frac{-EA}{l}.$$

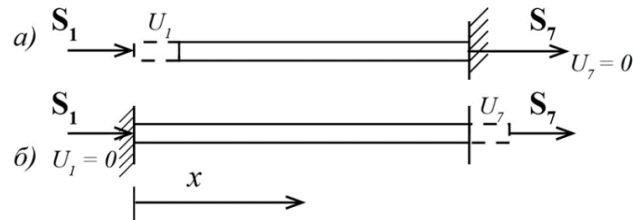


Рис. 2. Осьові зсуви

Обертальні моменти ( $S_4$  і  $S_{10}$ ).

Диференціальне рівняння для крутного моменту балки має вигляд:

$$S_4 = -GI \frac{d\theta}{dx}, \quad (36)$$

де  $GI$  – торсіонна жорсткість поперечного перерізу балки [10, 13].

$$S_4 X = -GI\theta + C_1. \quad (37)$$

Використовуючи граничні умови (див. рис. 3)  $\theta = 0$  при  $x = l$ , отримуємо

$$C_1 = S_4 l. \quad (38)$$

Так як  $\theta = u_4$  при  $x = 0$

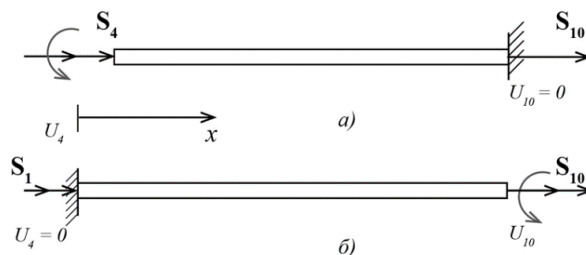


Рис. 3. Обертальні моменти

За рис. 3 виходить  $K_{10,10} = \frac{GI}{l}$ .

Згинальні сили ( $S_2$  і  $S_8$ ), пов'язані з моментами

$$v = v_b + v_s, \quad (42)$$

де  $v_b$  – бічне відхилення, викликане згинальною силою, і  $v_s$  додаткове відхилення, викликане зсувними напругами, так що

Всі інші коефіцієнти в першій колонці  $K$  дорівнюють нулю.

Аналогічно, вважаючи  $u_1 = 0$ , а  $u_7 \neq 0$  (рис. 2, б) можна отримати (або виходячи з симетрії, або рішенням для  $u$ )  $K_{77} = \frac{EA}{l}$ .

Так як температурні впливи на всю балку не викликають зміни її форми (11), то  $K_{ij}$  при крученні і температурних змінах залишаються незмінними.

$$S_4 = \frac{GI}{l}. \quad (39)$$

Використовуючи умову рівноваги для обертальних моментів, маємо

$$S_{10} = -S_4. \quad (40)$$

Отже

$$K_{4,4} = \left( \frac{S_4}{u_4} \right)_{T=0} = \frac{GI}{l}; \quad K_{10,4} = \left( \frac{S_{10}}{u_4} \right)_{T=0} = \frac{-GI}{l}. \quad (41)$$

Всі інші коефіцієнти в четвертій колонці дорівнюють 0. Сили  $Q_4 = Q_{10} = 0$ .

$$\frac{dv_s}{dx} = \frac{-S_2}{GA_s}, \quad (43)$$

де  $A_s$  – ефективна площа поперечного перерізу балки, що не піддається вигину (визначається диференціальним рівнянням Boley and Weiner);

$$EI_z \frac{d^2 v_b}{dx^2} = S_2 x - S_6 - M_{Tz}, \quad (44)$$

де

$$M_{Tz} = \int_A \alpha E T y dA. \quad (45)$$

Інтегруючи (44) і (45), отримаємо

$$EI_z v = \frac{S_2 x^3}{6} - \frac{S_6 x^2}{2} - \frac{M_{Tz} x^2}{2} + \left( C_1 - \frac{S_2 EI_z}{GA_s} \right) x + C_2, \quad (46)$$

де  $M_{Tz} = \int_A \alpha E T y dA$ .

Використовуючи граничні умови

$$\frac{dv}{dx} = \frac{dv_s}{dx} = \frac{S_2}{GA_s} \quad \text{при } x=0, x=l, \quad (47)$$

$$v=0 \quad \text{при } x=l$$

$$EI_z v = \frac{S_2 x^3}{6} - \frac{S_6 x^2}{2} - \frac{M_{Tz} x^2}{2} - \frac{S_2 \Phi x l^2}{12} + (1+\Phi) \frac{l^3 S_2}{12}, \quad (48)$$

де

$$S_6 = \frac{S_2 l}{2} M_{Tz} \quad (49)$$

і

$$\Phi = \frac{12 EI_z}{GA_s l^2}. \quad (50)$$

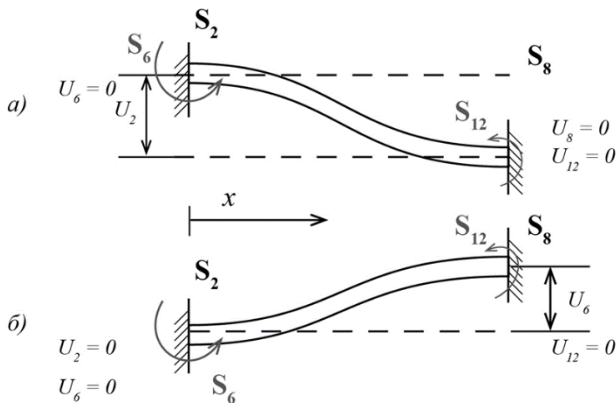


Рис. 4. Згин пластини

З умови рівноваги сил і моментів:

$$S_8 = -S_2,$$

$$S_{12} = -S_2 + S_2 l,$$

при

$$x=0, v=u_4, \quad (51)$$

$$u_2 = (1+\Phi) \frac{l_3 S_2}{12 EI_z}.$$

Використовуючи рівняння (49 – 51) отримуємо

$$K_{2,2} = \left( \frac{S_2}{u_2} \right)_{T=0} = \frac{12 EI_z}{(1+\Phi) l^3}; \quad (52)$$

$$K_{6,2} = \left( \frac{S_6}{u_2} \right)_{T=0} = \left( \frac{S_2 l}{2 u_2} \right)_{T=0} = \frac{6 EI_z}{(1+\Phi) l^2}. \quad (53)$$

При деформації вигину жорсткість дорівнює добутку  $EI_y$ , де  $I_y$  – осьовий момент інерції перерізу відносно осі  $y$ . Для елементів з прямокутним поперечним перерізом  $I_y = \frac{bh^3}{12}$ ,  $b$  – ширина,  $h$  – товщина елемента. Узагальнені сили, що викликають вигин, дають внесок у вигляді відповідного компонента розтягування-стиснення.

Розраховується вигин від дії і сил і моментів (рис. 5).

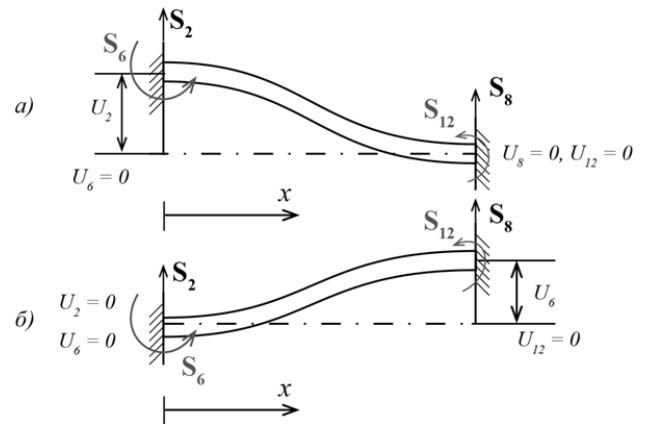


Рис. 5. Вигин пластини

$$K_{8,2} = \left( \frac{S_8}{u_2} \right)_{T=0} = \frac{12 EI_z}{(1+\Phi) l^3}, \quad (54)$$

$$K_{12,2} = \left( \frac{S_{12}}{u_2} \right)_{T=0} = \left( \frac{-S_6 + S_2 l}{u_2} \right)_{T=0} = \frac{6 EI_z}{(1+\Phi) l^2}. \quad (55)$$

Подібним чином (або за принципом умовної симетрії), виходить

$$K_{8,8} = K_{2,2} = \frac{12 EI_z}{(1+\Phi) l^3}, \quad (56)$$

$$K_{12,8} = K_{6,2} = \frac{6 EI_z}{(1+\Phi) l^2}. \quad (57)$$

## Висновки

Для компонентів МЕМС між'єднань найбільш важливим є статичний аналіз, який характеризує стан рівноваги, умовою якої є рівність нулю суми сил та суми моментів сили, що діють на пристрій (механічні, електричні, теплові).

Використовуючи матрицю жорсткості при відомому векторі зовнішніх сил, визначаються деформації елементів конструкції пристроїв.

Вид і розмірність матриці жорсткості кінцевих елементів визначається напруженим станом. Для об'ємного напруженого стану її розмірності  $6 \times 6$ . Для плоского напруженого стану  $3 \times 3$ .

Часткові коефіцієнти  $K_{ij}$  матриці жорсткості пропорційні відповідним коефіцієнтам  $\chi_{ij}$ , а коефіцієнти пропорційності визначається видом деформації. Для деформації розтягування-стиснення жорсткість дорівнює  $\frac{EA}{l}$ , а для деформації зсуву  $\frac{GI_y}{l}$ .

Важливо відзначити, що деформації  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  не залежить від температурних впливів на всю конструкцію.

### Список літератури

1. Невлюдов І. Ш., Пономарьова Г. В., Бортнікова В. О. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів. *Вчені записки ТНУ імені ВІ Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. Т. 29 (68), Ч. 1. № 1. С. 204–210.
2. Пупена О. М., Ельперін І. В., Міркевич Р. М. Сучасні стандарти інтегрованого керування і шляхи їх впровадження в Україні. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2017. Т. 23. № 1. С. 25–41.
3. Gong N. W. Design and applications of inkjet-printed flexible sensate surfaces : дис. Massachusetts Institute of Technology, 2013. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/91434>
4. Wong W. S., Salleo A. (ed.). Flexible electronics: materials and applications. Springer Science & Business Media, 2009. Т. 11. 461 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74363-9>
5. Timoshenkov, S., Kalugin, V., Korobova, N., Shalimov, A., Kalmikov, D., Golovinsky, M., Aung, K.M., Zhora, V., Plis, N. (2017), "Providing of MEMS inclinometer operation under external influencing factors", *Paper presented at the 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2017*, Proceedings, P. 88–91. DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939721 Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com)
6. Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Є. А., Демська Н. П., Гуріна Д. В. Аналіз впливу механічних напружень на можливість мініатюризації гнучких структур електронної техніки на прикладі ZIF з'єднувача. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. № 3 (76). С. 74–80. DOI: 10.18372/0370-2197.3(76).11953
7. Davydovskiy, Y., Reva, O., Artiukh, O., Kosenko, V. (2019) "Simulation of computer network load parameters over a given period of time", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (9), P. 72–80. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.072>
8. Palagin, V., Razumov-Fryziuk, I., Botsman, I., & Nevliudova, V. (2018), "Development of multi-probe connecting devices on flexible polyimide base for MEMS components testing", *Paper presented at the 2018 14th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2018*, Proceedings, P. 232–235. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365740
9. Nevliudov, I. S., Borshchov, V. M., Palagin, V. A., Razumov-Fryziuk, I. A., Tymchuk, I. T., Nevliudova, V. V., & Petrova, A. Y. (2019), "Mathematical model of bending two-layer film aluminium-polyimide structure due to temperature changes", *Functional Materials*, No. 26 (2), P. 342–346. DOI: 10.15407/fm26.02.342
10. Невлюдов І. Ш., Палагін В. А. Мікросистемна техніка та нанотехнології : Монографія. К. : НАУ, 2017. 528 с.
11. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике. М. : Физматлит, 2001. 264 с
12. Павловский М. А., Путята Т. В. Теоретическая механика. Киев : Вища школа, 1985. 478 с.
13. Przemieniecki, J., Przemieniecki, S. (1968), *Theory of matrix structural analysis*, Vol. 1, New York : McGraw-Hill, 501 p.
14. Бобало Ю. Я., Волочий Б. Ю., Лозинський О. Ю., Мандзій Б. А., Озірковський Л. Д., Федасюк Д. В., Щербовських С. В., Яковина В. С. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 300 с.
15. Hancock, D. A., Walters, A. J., Beuth, J. L. (2000), "Development of an object-oriented fatigue tool", *Engineering with computers*, Vol. 16, No. 2, P. 131–144. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003660070016>
16. Nevlyudov, I., Palagin, V., & Botsman, I. (2017), "The general principles of electromagnetic compatibility improving with microsystem technology using", *Paper presented at the 2016 3rd International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2016*, Proceedings, P. 237-238. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905393
17. Балан Н. Н. Определение упругих свойств подвижных элементов MEMS-структур. Нано-и микросистемная техника. 2004. № 2. С. 14–19.
18. Теслюк В. М. Автоматизація проектування МЕМС на компонентному рівні: монографія. Львів : Видавництво "Львівська політехніка", 2011. 192 с.
19. Woinowsky-Krieger, S. (1956), "Über die verwendung von bipolarkoordinaten zur lösung einiger probleme der plattenbiegung", *Ingenieur-Archiv*, No. 24 (1), P. 47–52. DOI: 10.1007/BF00536955

20. Nevliudov, I., Razumov-Fryziuk, Ie., Palagin, V. (2017), "Improved reliability of interconnects of electronics components", *Paper presented at the 2nd International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2017*, Proceedings, P. 1–5. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095396.

## References

1. Nevliudov, I. Sh., Ponomarova, H. V., Bortnikova, V. O. (2018), "MEM accelerometers production technological process simulation" ["Imitatsiina model tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennia mikroelektromekhanichnykh akselerometriv"], *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series : Technical Sciences*, Vol. 29 (68), Part 1, No. 1, P. 204–210.
2. Pupena, O. M., Elperin, I. V., Mirkevych, R. M. (2017), "Modern standards of integrated management and ways of their implementation in Ukraine" ["Suchasni standarty intehrovanoho keruvannia i shliakhy yikh vprovadzhennia v Ukraini"], *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii*, Vol. 23, No. 1, P. 25–41.
3. Gong, N. W. (2013) "Design and applications of inkjet-printed flexible sensate surfaces", *Massachusetts Institute of Technology*, <http://hdl.handle.net/1721.1/91434>
4. Wong, W. S., Salleo, A. (ed.) (2009), *Flexible electronics: materials and applications*, Springer Science & Business Media, Vol. 11, 461 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74363-9>
5. Timoshenkov, S., Kalugin, V., Korobova, N., Shalimov, A., Kalmikov, D., Golovinsky, M., Aung, K.M., Zhora, V., Plis, N. (2017), "Providing of MEMS inclinometer operation under external influencing factors ", *Paper presented at the 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2017*, Proceedings, P. 88–91. DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939721
6. Nevliudov, I. Sh., Razumov-Fryziuk, Ye. A., Demska, N. P., Hurina D. V. (2017), "Influence of mechanical stresses on the possibility of miniaturization of flexible structures of electronic equipment on the example of ZIF connector" ["Analiz vplyvu mekhanichnykh napruzhen na mozhyvist miniaturyzatsii hnuchkykh struktur elektronnoi tekhniki na prykladi ZIF z'iednuvacha"], *Problemy tertia ta znoshuvannia*, No. 3 (76), P. 74–80. DOI: 10.18372/0370-2197.3(76).11953
7. Davydovskiy, Y., Reva, O., Artiukh, O., Kosenko, V. (2019) "Simulation of computer network load parameters over a given period of time", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (9), P. 72–80. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.072>
8. Palagin, V., Razumov-Fryziuk, I., Botsman, I., & Nevliudova, V. (2018), "Development of multi-probe connecting devices on flexible polyimide base for MEMS components testing ", *Paper presented at the 2018 14th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, MEMSTECH 2018*, Proceedings, P. 232–235. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365740
9. Nevliudov, I. S., Borshchov, V. M., Palagin, V. A., Razumov-Fryziuk, I. A., Tymchuk, I. T., Nevliudova, V. V., & Petrova, A. Y. (2019), "Mathematical model of bending two-layer film aluminium-polyimide structure due to temperature changes", *Functional Materials*, No. 26 (2), P. 342–346. DOI: 10.15407/fm26.02.342
10. Nevliudov, I. Sh., Palahin, V. A. (2017), *Microsystem technology and nanotechnology [Mikrosystemna tekhnika ta nanotekhnolohii]*, Kyiv, NAU, 528 p.
11. Hantmakher, F. R. (2001), *Lectures on analytical mechanics [Lektsyy po analytycheskoi mekhanike]*, Moscow, Fyzmatlyt, 264 p.
12. Pavlovskiy, M. A., Putiata, T. V. (1985), *Theoretical mechanics [Teoretycheskaia mekhanika]*, Kyiv, Vyshcha shkola, 478 p.
13. Przemieniecki, J., Przemieniecki, S. (1968), *Theory of matrix structural analysis*, Vol. 1, New York : McGraw-Hill, 501 p.
14. Bobalo, Yu. Ya Volochii., B. Yu., Lozynskiy, O. Yu., Mandzii, B. A., Ozirkovskiy, L. D., Fedasiuk, D. V., Shcherbovskiy, S. V., Yakovyna, V. S. (2013), *Mathematical models and methods of reliability analysis of radio-electronic, electrotechnical and software systems [Matematychni modeli ta metody analizu nadiinosti radioelektronnykh, elektrotekhnichnykh ta prohramnykh system]* : monograph, Lviv, Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 300 p.
15. Hancq, D. A., Walters, A. J., Beuth, J. L. (2000), "Development of an object-oriented fatigue tool", *Engineering with computers*, Vol. 16, No. 2, P. 131–144. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003660070016>
16. Nevliudov, I., Palagin, V., & Botsman, I. (2017), "The general principles of electromagnetic compatibility improving with microsystem technology using", *Paper presented at the 2016 3rd International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2016*, Proceedings, P. 237–238. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905393.
17. Balan, N. N. (2004), "Determination of the elastic properties of movable elements of MEMS structures" ["Opredelenye upruhykh svoystv podvyzhnykh elementov MEMS-struktur"], *Nano-y mikrosystemnaia tekhnika*, No. 2, P. 14–19.
18. Tesliuk, V M. (2011) *Automation of MEMS design at the component level [Avtomatyzatsiia proektuvannia MEMS na komponentnomu rivni]*, Lviv, Vydavnytstvo "Lvivska politekhnika", 192 p.
19. Woinowsky-Krieger, S. (1956), "Über die verwendung von bipolarkoordinaten zur lösung einiger probleme der plattenbiegung", *Ingenieur-Archiv*, No. 24 (1), P. 47–52. DOI: 10.1007/BF00536955.
20. Nevliudov, I., Razumov-Fryziuk, Ie., Palagin, V. (2017), "Improved reliability of interconnects of electronics components", *Paper presented at the 2nd International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2017*, Proceedings, P. 1–5. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095396.

Received 28.02.2020

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Невлюдов Ігор Шакирович** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>.

**Невлюдов Игорь Шакирович** – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

**Nevliudov Igor** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

**Демська Наталія Павлівна** – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: demska.nataliia@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9931-9964>.

**Демская Наталия Павловна** – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

**Demaska Nataliia** – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

**Палагін Віктор Андрійович** – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: victor.palagin@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9837-2309>.

**Палагин Виктор Андреевич** – доктор технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

**Palagin Victor** – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

**Боцман Ірина Володимирівна** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: irina.botsman@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1110-9602>.

**Боцман Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

**Botsman Irina** – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

## МАТРИЧНО-СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИБКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ И КОМПОНЕНТОВ МЭМС

Конструкции современной электронной техники являются сложными механическими системами с множеством жестких связей, а их микроминиатюризация во многих случаях дошла до физического предела размерного, зарядового и энергетического квантования компонентов. Для таких механических систем, с неклассическими для механики способами крепления отдельных конструктивных элементов, сложно построить расчетную модель, достаточно простую и в то же время такую, которая хорошо отражает физические и динамические свойства. Для обеспечения механической прочности межсоединений и сверхтонких электронных компонентов необходима возможность определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций. Эти причины обуславливают необходимость применения численных методов для расчета динамических параметров конструкций межсоединений электронной техники, которая позволит повысить показатели надежности разрабатываемых средств, соответствующих требованиям нормативно-технической документации по механическим характеристикам, сократить сроки и стоимость их создания. **Предметом** данной работы является исследование деформации балки постоянного поперечного сечения под действием осевых сил, изгибающих моментов и крутящего момента относительно продольной оси. **Целью** данной работы является определение деформации элементов конструкции устройств с использованием матрицы жесткости при известном векторе внешних сил. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**: рассмотреть существующие методы описания и анализа, учитывающих специфику используемых конструкций и технологических процессов изготовления конкретных структур МЭМС; исследовать сущность этих методов; провести расчет перемещений и деформаций, используя метод конечных элементов; используя матрицу жесткости, определить деформации элементов конструкции устройств; провести расчет деформации балки постоянного поперечного сечения под действием осевых сил, изгибающих моментов и крутящего момента относительно продольной оси. **Выводы**: матрица жесткости, построенная с использованием матричного функционального анализа, позволяет обеспечить расчет деформации элементов МЭМС и гибких электронных межсоединений.

**Ключевые слова**: микроэлектромеханические системы; межсоединения; метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние; деформация; смещение.

## MATRIX-STRUCTURAL ANALYSIS OF THE STRESS-DEFORMED STATUS OF THE FLEXIBLE INTERFACES AND MEMS COMPONENTS

The designs of modern electronic technology are complex mechanical systems with many rigid bonds, and their microminiature in many cases has reached the physical limit of the dimensional, charge and energy quantization of components. For such mechanical systems, with non-classical methods for mechanics of fastening of separate structural elements, it is difficult to build a design model, simple enough and at the same time one that well reflects physical and dynamic properties. To ensure mechanical strength of interconnects and ultra-thin electronic components, it is necessary to determine the stress-strain state of structural elements. These reasons necessitate the use of numerical methods to calculate the dynamic parameters of the design of electronic equipment interconnections, which will improve the reliability of the developed tools that meet the requirements of regulatory technical

documentation on mechanical characteristics, shorten the time and cost of their creation. **Subject** matter of this work is the study of beam deformation of constant cross section under the action of axial forces, bending moments and torque relative to the longitudinal axis. **Goal** this work is to determine the deformation of the elements of the structure of the devices using the stiffness matrix with a known vector of external forces. To achieve this goal, it is necessary to solve the following **tasks**: to consider the existing methods of description and analysis, which take into account the specificity of the structures and technological processes used to manufacture specific structures MEMS; explore the nature of these methods; calculate displacements and deformations using the finite element method; using the stiffness matrix to determine the deformation of the structural elements of the devices; to calculate the deformation of the beam of constant cross-section under the action of axial forces, bending moments and torque relative to the longitudinal axis. **Conclusions**: stiffness matrix, constructed using functional analysis, allows for the calculation of deformation of MEMS elements and electronic interconnect flexible.

**Keywords**: microelectromechanical systems; interconnections; finite element method; stress-strain state; deformation; displacement.

*Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Невлюдов І. Ш., Демська Н. П., Палагін В. А., Боцман І. В. Матрично-структурний аналіз напружено-деформованого стану гнучких між'єднань і компонентів МЕМС. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 122–133. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.122>.

Nevliudov, I., Demska, N., Palagin, V., Botsman I. (2020), "Matrix-structural analysis of the stress-deformed status of the flexible interfaces and MEMS components", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 122–133. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.122>.

V. ROMENSKIY, V. NEVLIUDOVA, E. PERSIYANOVA

## STUDY OF THE OPERATING TIME OF THE PROTECTIVE COATING OF SURFACES OF ASSEMBLY AND WELDING EQUIPMENT

The **subject** of the study is the issues related to determining the service life of protective coatings protecting the surfaces of assembly and welding fixtures from the effects of welding spatter and mechanical wear when performing certain assembly and welding operations of welded metal structures. The development in Ukraine of various industries, especially the precision engineering industry (instrument making), is characterized by a transition to market management methods, increasing demand for competitive and liquid products. This can be achieved by the systematic and rapid introduction of technically new products, improving their quality, increasing labor productivity, and automating production. Welded metal structures are widely used in the designs of modernized and new types of products, the high-quality production of which is impossible without the use of assembly and welding equipment. The reliability and durability of these devices depends on the protection of their surfaces to the effects of welding spatter and scoring during assembly and welding operations. Analytical and experimental studies of the resistance of protective coatings to an experimental welding drop of metal showed that of the most tested coatings, the most durable is the developed protective coating containing a mixture of molybdenum disulfide powder, graphite powder, epoxy varnish and certain solvents. **Purpose:** determination of the service life of the developed protective coating when exposed to a number of significant factors, including the effects of real welding spatter. **Tasks:** to identify the main - significant technological factors affecting the service life of the protective coating; develop a planning matrix based on a full factorial experiment; to conduct experimental studies of the resistance of the coating to the effect of an experimental metal drop under the influence of significant technological factors, to obtain the equations of regression of resistance; conduct analytical and experimental studies to determine the temperature of the experimental drop of molten metal; conduct analytical studies of the temperature of a real welding spray; conduct a study of the resistance to friction; conduct analytical studies to determine the quantitative characteristics of the reliability and durability of the proposed coating composition. **Results:** the article presents the research data by the authors of the service life of the proposed protective coating that protects the surfaces of assembly and welding fixtures when exposed to welding spatter and coating wear when moving metal structures in the fixture. The quantitative characteristics of the reliability and durability of the coating are obtained. **Conclusions:** A methodology has been developed for determining the service life of protective coatings protecting the surfaces of assembly and welding fixtures from the effects of welding spatter during welding operations and coating wear when moving elements of the welding structure in the fixture during assembly.

**Keywords:** assembly and welding equipment; protective coatings; welding spatter; protective film thickness; types of welding; likelihood of uptime; failure rate; failure intensity; life time.

### Introduction

The solution of the urgent task of technological support of reliable operation and increase of the service life of assembly-welding technological equipment used for the manufacture of welded metal structures of various shapes, sizes, weights and various purposes. The main negative factor affecting the tool life is the effect of welding spatter on the surface of fixtures during assembly and welding operations. Different enterprises solve this problem in different ways: by using protective screens, water emulsions, lubricants, protective coatings, paints and varnishes and other protective equipment, without which assembly and welding equipment, after its first use, may lose accuracy or completely fail. The analysis of literature data and industrial studies showed that the most resistant to welding spatter are coatings (suspensions) based on molybdenum disulfide powders. A number of coatings on this basis have been developed using various film-forming. It was established that the optimal composition, which withstood the maximum number of experimental metal drops on a pilot plant until burnout, is a composition containing two parts, one of which is molybdenum disulfide powder and graphite powder, and the other film-forming component is epoxy varnish. This composition is diluted with a mixture of solvents to obtain the desired molar consistency.

A method of analytical calculation with experimental verification of the developed coating is proposed taking

into account the influence of significant technological factors close to the actual operating conditions of the assembly and welding equipment. A method of analytical calculation based on the matrix of a complete factorial experiment is proposed and experiments are carried out to determine the resistance of the coating to an experimental metal drop depending on certain factors and regression equations are obtained. A methodology has been developed for determining the temperature of an experimental metal drop, and analytical studies have been carried out to determine the temperature of a real welding spray. The conversion factor for the transition from an experimental metal drop to a real welding spray is determined. The service life of the coating when exposed to welding spatter is determined. Investigations of the resistance of the coating to mechanical wear were carried out, and the service life of the coating was determined under the combined action of metal sprays and wear. A methodology has been developed and quantitative characteristics of the reliability and durability of the proposed protective coating have been determined.

### Analysis of recent articles and publications

Recently, the development of industries such as defense, space, radio-electronic, computing and others in Ukraine is characterized by a transition to market management methods, increased demand for competitive and liquid products by the systematic and rapid

introduction of technically new products, modernization of existing ones by improving their quality, increasing labor productivity automation of production. All this leads to an increase in the volume of work and the cost of technological preparation of production. One of the main elements in the designs of modernized and new types of products is welded metal structures, the production of which requires the use of a large number of special assembly and welding equipment. The cost of designing and manufacturing assembly and welding equipment for the complexity of individual products reaches 20 - 25% of the total cost of manufacturing this product [1, 2].

One of the effective ways that can significantly reduce material and labor costs is the use of adaptable technological equipment that allows you to assemble devices for various purposes from the same elements repeatedly. This is especially advisable in enterprises with pilot and small-scale production, as well as in the development of new products and the manufacture of an experimental batch. A gamut of standardized parts and assembly units of universal assembly devices for assembly-welding works (UDAW) with mounting grooves 8 was developed; 12; 16 mm [3, 4]. The design feature of this tooling is that the elements of the tooling kits are interchangeable, this allows you to use them repeatedly for a long time creating devices for various metal structures.

However, taking into account the operating features of assembly and welding equipment, its service life largely depends on the means of protecting its surfaces. Much attention has been and is being paid to the issue of improving the reliability and durability of this equipment, which is confirmed by the analysis of literature data.

The authors of this article conducted studies of the performance of assembly and welding equipment, identified the main factors affecting the tool life, identified failures and investigated experimental data on the creation of coatings based on molybdenum disulfide, graphite, epoxy varnish and a mixture of solvents [5–14].

The values of each component included in the composition of the coating, their ratio and application technology were established.

Molybdenum disulfide is an antifriction filler. Its use reduces the coefficient of friction and wear during friction, which arises as a result of frequent disassembly and assembly of devices and when installing parts of metal structures in devices. In addition, molybdenum disulfide has a positive effect on the resistance of the coating to the destructive effect of drops of molten metal.

Graphite, like molybdenum disulfide, is a filler in the coating. The main purpose of graphite in the coating is to give it the property of electrical conductivity, which provides a reliable current path to the welded nodes through coated elements of technological equipment, increasing the stability of burning of the electric arc and the stability of its excitation. Graphite as well as molybdenum disulfide increases the resistance of the coating to welding spatter.

Epoxy varnish is introduced into the coating composition as a binder at the stage of its preparation and deposition on the surface of the substrate, and then, after

polymerization, it is film-forming, which provides reliable adhesion to the substrate (adhesion) and the required coating strength (cohesion).

Xylene, acetone, ethylcellosol are technologically auxiliary substances that act as solvents of the components of the epoxy varnish (polyester, epoxy resin, etc.). The method of their use ensures the quality of the applied coating, characterized by obtaining a coating of a certain molar consistency, the formation of a protective film of uniform thickness, and the absence of streaks and surges.

The surface substrate is the degreasing and removal of corrosion products, followed by phosphating in a phosphate solution.

It was experimentally stated that the optimum resistance of the developed coating to welding spatter and wear during friction is determined by a ratio of epoxy varnish and filler (MoSg and graphite) close to 1: 2. The best quality of the applied coating is determined by the total amount of solvents up to 50% of the total weight composition.

Preparation of a protective coating and its application require the use of certain equipment and qualified specialists. The coating on the parts is carried out in suspension by spray guns with a nozzle diameter of 0.8 mm - 1.2 mm. The nozzle distance from the part is within 300 mm. Spraying is carried out in a fume hood, coating consumption per 1  $m_2$  of surface is up to 300 g.

Drying (curing) of the coating is carried out in a special cabinet with temperature control, in steps according to the specified mode. The total curing time of the coating is within 3–3.5 hours. After drying, the parts are cooled in indoor air.

The purpose of this work is analytical and experimental studies of the service life of the developed protective coating, depending on the effects of welding spatter and mechanical displacements of the welding elements during the assembly of the welded structure, taking into account the influence of a set of familiar technological factors. Development of methods and quantification of reliability and durability of the developed protective coating.

The service life of the developed coating is defined as the ratio of the resistance of the coating to the influence of real welding sprays, " $m_p$ " to the average number of sprays bombarding the same elementary site during one year of operation of the fixture " $N$ " [5, 7].

Resistance " $m_p$ " was determined from the resistance of the coating obtained experimentally by " $m_e$ " multiplied by the conversion coefficient " $K_m$ ", which allows you to switch from experimental metal droplets (formed on a special installation) to real welding spatter.

The determination of the " $m_e$ " value was carried out on the basis of the method of mathematical planning [16, 17]. The resistance of the coating to metal droplets was determined in an experimental setup.

For specific experimental design conditions, 5 significant technological factors were studied at two levels: type of welding –  $x_1$  (manual arc and semi-

automatic in a carbon dioxide  $CO_2$  environment); grade of the main material of devices –  $x_2$  (steel 20 and cast iron VCh-50-32); spatial arrangement of the surface of the fixture relative to the welding zone –  $x_3$  (vertical and horizontal); distance of the fixture surface

from the welding zone –  $x_4$  (350 and 50 mm); thickness of applied coating film –  $x_5$  (30 and 10 microns).

The intervals of variation of factors at the upper and lower levels are given in table 1.

The planning matrix was built on the basis of the application of a full factorial experiment, including 32 experiments (table 2).

**Table 1.** Significant technological factors

Code	Factors				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
Main level ( $x^{i_0}$ )	–	–	–	200	20
Range of variation ( $\Delta x^i$ )	–	–	–	150	10
Upper level (+)	Manual arc welding	Steel 20	Vertical	350	30
Lower level (-)	Welding in a $CO_2$ environment	Cast iron VCh-50-32	Horizontal	50	10

**Table 2.** Experiment planning matrix

No. experience	Factors						Optimization parameters $y = me$ (number of weld drops)
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
1	+	+	+	+	+	+	480
2	+	-	+	+	+	+	430
3	+	+	-	+	+	+	470
4	+	-	-	+	+	+	410
5	+	+	+	-	+	+	420
6	+	-	+	-	+	+	350
7	+	+	-	-	+	+	400
8	+	-	-	-	+	+	330
9	+	+	+	+	-	+	250
10	+	-	+	+	-	+	200
11	+	+	-	+	-	+	195
12	+	-	-	+	-	+	175
13	+	+	+	-	-	+	185
14	+	-	+	-	-	+	140
15	+	+	-	-	-	+	150
16	+	-	-	-	-	+	115
17	+	+	+	+	+	-	310
18	+	-	+	+	+	-	260
19	+	+	-	+	+	-	270
20	+	-	-	+	+	-	235
21	+	+	+	-	+	-	250
22	+	-	+	-	+	-	200
23	+	+	-	-	+	-	210
24	+	+	-	-	+	-	110
25	+	+	+	+	-	-	80
26	+	-	+	+	-	-	65
27	+	+	-	+	-	-	72
28	+	-	-	+	-	-	50
29	+	+	+	-	-	-	67
30	+	-	+	-	-	-	30
31	+	+	-	-	-	-	35
32	+	-	-	-	-	-	15

The significance of the factors was evaluated by regression coefficients based on the calculation of confidence intervals. By implementing the full factorial experiment, we obtained a linear regression equation:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5.$$

In our case

$$y = m_p = 217,7 + 21,7x_1 + 11,8x_2 + 29,5x_3 + 103,5x_4 + 76,3x_5.$$

$$\Delta b = \pm 3,84.$$

It is established that the average value of the resistance of the proposed coating composition under the influence of technological factors in experimental conditions is in the range of 160–325 drops of metal. Deviations of calculated values of coating resistance from experimental ones did not exceed.

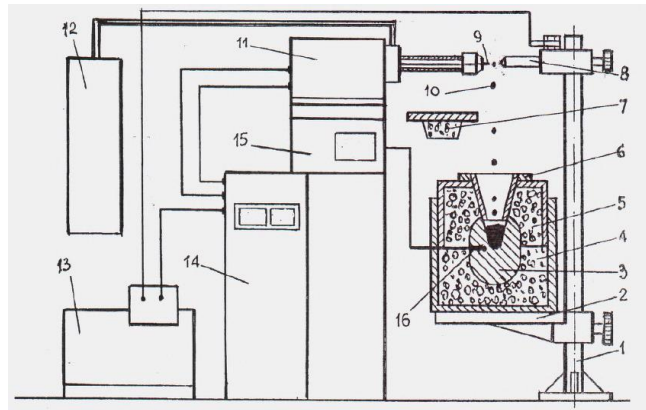
Having determined the resistance of the coating to the action of metal droplets under experimental conditions, to go to real, i.e. determination of the resistance of the coating to the effects of real welding spatter ( $m_p$ ), it is necessary to solve two problems. The first is the determination of the temperature of experimental drops of metal  $T_{e.d}$ ; the second is the

determination of the temperature of real welding spatter  $T_{r.w.s}$ .

The temperature coefficient was determined by the ratio of the temperature of the experimental droplets  $T_{e.d}$  to the temperature  $K_t$  of the actual welding spatter  $T_{r.w.s}$ .

$$K_t = \frac{T_{e.d}}{T_{r.w.s}}.$$

The temperature  $T_{e.d}$  was determined experimentally using the calorimetric method in a special installation of fig. 1, installing the calorimeter block at various distances from 50 to 1000 mm from the welding arc.



1 – tripod; 2 – base table; 3 – calorimeter block; 4 – case; 5 – cover; 6 – funnel; 7 – cork; 8 – non-consumable electrode; 9 – a melting electrode; 10 – drops of molten metal; 11 – wire feed mechanism; 12 –  $CO_2$  cylinder; 13 – welding converter; 14 – control cabinet; 15 – measuring device; 16 – temperature sensor.

**Fig. 1.** Installation diagram for the determination of experimental metal droplets

$T_{e.d}$  was determined from the equation through the amount of heat received by the calorimeter block and the average specific heat content of metal droplets in the block.

$$T_{e.d} = T_m + \left[ \frac{S_{y_h} - (C_{mb}T_m + W_m)}{C_{mb}} \right],$$

Where  $T_m$  is the melting temperature of the metal, °C;  $S_{y_h}$  – average specific heat content of welding droplets for various  $h$ , cal.g;  $C_{mb}$  – the average specific heat of the metal from normal temperature to the melting point, cal/g grad;  $W_m$  – latent heat of melting, cal/g grad.

The calculation data of the experimental drops of molten metal are given in table 3.

**Table 3.** The calculated temperature values of the experimental metal drop

Drop span $h$ , mm	Average specific drop heat $S_{y_h}$ , cal.g	The temperature of the experimental drop, $T_{e.d}$ , °C
50	662,0	3928
120	632,0	3730
240	611,0	3592
360	590,0	3454
480	580,0	3388
600	570,0	3322
1000	560,0	3256

The temperature of real welding spatter  $T_{r.w.s}$  was determined analytically using the dependence of the amount of heat lost by the welding drop in the arc gap due to radiation. It was found that welding sprays, in contrast to metal droplets in the arc gap, in addition to emitting,

give off heat  $Q_{w.s}$  due to convection and thermal conductivity are determined from the expression:

$$Q_{w.s} = F_{w.s} \cdot \alpha_c (T_{w.s} - T_m) + F_{w.s} \cdot C_0 \varepsilon \left( \frac{T_{w.s}^4}{100^4} - \frac{T_m^4}{100^4} \right),$$

where  $F_{w.s}$  – heat transfer surface welding spatter,  $m^2$ ;  $\alpha_c$  – contact coefficient of heat transfer, determined by blowing welding balls of molten metal in the shape of a ball,  $\frac{kcal}{m^2 \cdot grad \cdot g}$ ;  $T_{w.s}$  – the initial temperature of the spray,  $^{\circ}C$ ;  $T_m$  – medium temperature,  $^{\circ}C$ ;  $C_0$  – absolute blackbody emissivity,  $\frac{kcal}{m^2 \cdot grad \cdot g}$ ;  $\varepsilon$  – reduced degree of blackness of the system.

By a known  $Q_{w.s}$  the change in temperature  $T_{w.s}$  in the time interval is determined:

$$T_{w.s} = \frac{4,187R_{w.s}^3 \cdot \gamma C_m \cdot T_{w.s.in} - Q \cdot \Delta t}{4,187R_{w.s}^3 \cdot \gamma C_m},$$

where  $R_{w.s}$  – the average radius of the spray,  $m$ ;  $\gamma$  – specific weight of the material spray  $kg/m^3$ ;  $C_m$  – specific heat capacity spray,  $\frac{kcal}{kg \cdot grad}$ ;  $T_{w.s.in}$  – welding spray temperature at the initial moment of the time interval  $\Delta t$   $^{\circ}C$ ;  $\Delta t$  – the numerical value of the time intervals,  $h$ .

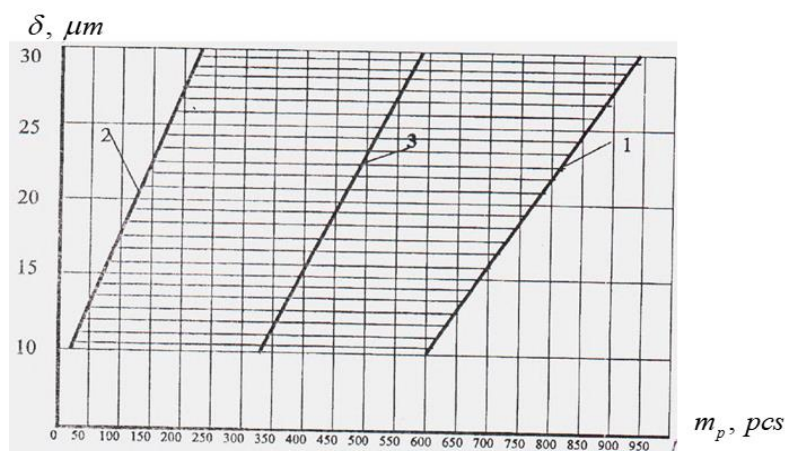
The data for the calculation are given in table 4.

**Table 4.** Data for calculating the temperature of the welding spray

$V$	$Rc$	$Nu$	$\alpha_c$	$\Delta t$	$Q$	$Q \cdot \Delta t$	$T_{s.in}$	$T_{s.fin}$
					9,18	0,0073	2300	2197
					7,81	0,0062	2197	2109
					6,78	0,0054	2109	2033
					5,98	0,0047	2033	1966
1,2	115,3	7,21	106,7	0,0008	5,35	0,0042	1966	1906
					4,82	0,0038	1906	1852
					4,39	0,0035	1852	1803
					4,02	0,0032	1803	1758
					3,70	0,0029	1758	1716
					8,74	0,0131	2300	2104
					6,33	0,0094	2104	1962
					4,92	0,0074	1962	1851
					4,04	0,0060	1851	1760
0,48	46,1	5,1	75,48	0,0015	3,40	0,0051	1760	1683
					2,93	0,0043	1683	1617
					2,58	0,0038	1617	1559
					2,29	0,0034	1559	1507
					2,05	0,0030	1507	1460

As a result of analytical and experimental studies, it was found that the final temperature of the welding spray during manual arc welding and various span distances varies from 2197 to 1716  $^{\circ}C$ , and for semi-automatic welding in  $CO_2$  from 2104 to 1460  $^{\circ}C$ .

The average temperature coefficient  $K_t = 1.95$ , and the average resistance of the developed protective coating "  $m_p$  " is 325 - 600 drops of metal (fig. 2).



1 – welding in a  $CO_2$  environment; 2 – manual arc welding; 3 – average value of accuracy

**Fig. 2.** The resistance of the protective coating me to the effects of welding spatter

Based on analytical and experimental studies, the operating time of the proposed protective coating is obtained: when performing welding or assembly –

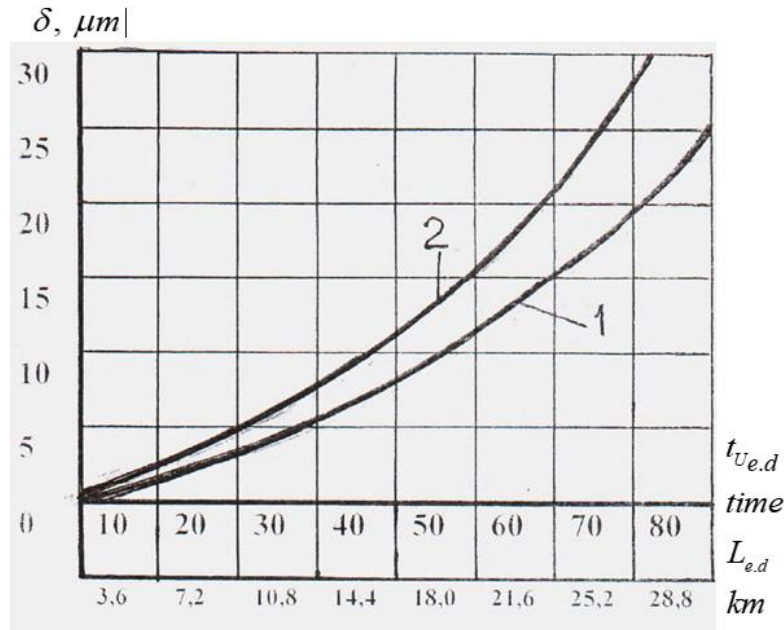
welding operations, which is for various surfaces from 4 to 15 years with a single application.

The wear time of the coating during mechanical friction of metal elements on the surface of fixture tu is determined by the ratio of the length of the path of the surfaces of friction pairs obtained under experimental conditions ( $L_{ex}$ ) to the average path of metal elements in the fixture in real conditions ( $L_p$ ) for one year operation equal for base plates up to 1300 m, base and support-hull tooling elements up to 1800 m.

To determine  $L_{ex}$  the friction pairs were prepared: steel 20X coated and steel ST3 uncoated, cast iron VCh-50-32 coated and steel ST3 uncoated.

The tests were carried out on a MIG - 1 machine [5] at a pressure of 0.5 MPa and a displacement velocity of 0.1 m / s (40 double strokes per min.).

The graph of coating wear during experimental studies is shown in fig. 3.



1 – steel ST3 (uncovered) on steel 20X (coated); 2 – steel ST3 (uncovered) on cast iron VCh-50-32 (coated)

Fig. 3. Schedule changes in the thickness of the protective coating during mechanical friction

Mathematical models of wear curves "  $\delta$  " of the developed coating, depending on the base material of the friction pairs and the operating time ( $t$ ), are determined from the equation

$$y = C_0 + C_1 t_{u1} + C_2 t_{u2} + C_3 t_{u3}.$$

To determine the coefficients  $C_0, C_1, C_2, C_3$ , we applied the method of singular arrangement (SVD), which consists in the following: at given times  $t_{u1} < t_{u2} < t_{u3}$  and obtained experimental results  $y_{u1} \dots y_{un}$ , we can assume:

$$y = c_1 \varphi_1(t_u) + c_2 \varphi_2(t_u) + \dots + c_k \varphi_k(t)(t)_u.$$

Having compiled a plan matrix  $\alpha = \varphi : (t_i), i = \overline{1, \Pi};$

$j = \overline{1, K}$  consider the column vector  $\overline{y_u} = \begin{Bmatrix} y_{u_1} \\ \dots \\ y_{u_n} \end{Bmatrix};$

$\overline{C} = \begin{Bmatrix} C_1 \\ \dots \\ C_k \end{Bmatrix}$  and having made a number of mathematical

transformations, we find the values  $C_1, C_2, C_3$  that are given in table 5.

Table 5. The calculated data of wear factors

No. of experiment	Friction pairs	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$\delta = y_u = f(t_u)$
1	ST3 steel (uncoated) on steel 20X (coated)	0	2,6	-0,3	0,4	$y_{u_1}$
2	Steel ST3 (uncovered) for cast iron VCh-50-32 (coated)	0	3,6	0,4	0,2	$y_{u_2}$

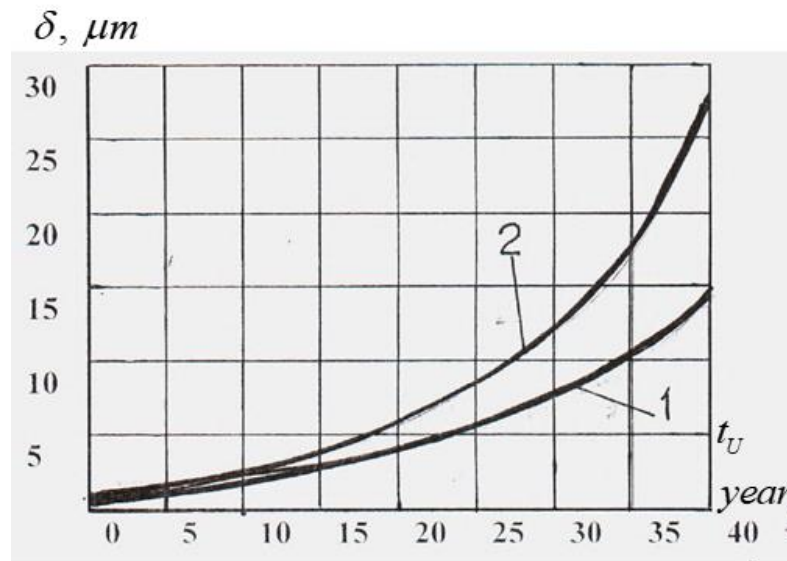
Then the mathematical models of wear curves have the form:

$$\delta_1 = y_{u1} = 2,6 \left( \frac{t_1}{20} \right) - 0,3 \left( \frac{t_1}{20} \right)^2 + 0,4 \left( \frac{t_1}{20} \right)^3;$$

$$\delta_2 = y_{u2} = 3,6 \left( \frac{t_2}{20} \right) - 0,4 \left( \frac{t_2}{20} \right)^2 + 0,2 \left( \frac{t_2}{20} \right)^3.$$

The processing of the results on a computer showed that the operating time of the proposed coating during

mechanical friction and the proper operation of fixtures in groups of tooling elements is 25-30 years or more (fig. 4).  
the assembly of welded metal structures for various



1 – steel ST3 (uncovered) on steel 20X (coated); 2 – steel ST3 (uncovered) on cast iron VCh-50-32 (coated)

**Fig. 4.** The service life of the protective coating during assembly operations

The concept of reliability and durability can be formulated by the main characteristics, with the help of which it is possible to quantitatively evaluate the reliability of the coating composition [16, 17]. These characteristics are: the probability of uptime –  $P(\tau)$ , the failure rate –  $\alpha(\tau)$ , the failure intensity –  $\lambda(\tau)$ , the average uptime –  $T$ , the readiness factor  $K_r$ .

In these studies, the term  $\tau$  is considered in two cases: the time during which the assembly of metal structures and the tacking of elements ( $\tau_w$ ) and the time during which the final welding of the metal structure is performed ( $\tau_c$ ).

According to statistics, the main characteristics of reliability are estimated by the following equations:

Uptime probability  $\overline{P}_{as}(\tau_{as})$  and  $\overline{P}_w(\tau_w)$

$$\overline{P}_{as}(\tau_{as}) = \left| \frac{N_{as} - n_{as}(\tau_{as})}{N_{as}} \right|;$$

$$\overline{P}_w(\tau_w) = \left| \frac{N_w - n_w(\tau_w)}{N_w} \right|.$$

Failure rate  $\overline{\alpha}_{as}(\tau_{as})$  and  $\overline{\alpha}_w(\tau_w)$

$$\overline{\alpha}_{as}(\tau_{as}) = \frac{n_{as}(\tau_{as})}{N_{as} \Delta \tau_{as}};$$

$$\overline{\alpha}_w(\tau_w) = \frac{n_w(\tau_w)}{N_w \Delta \tau_w}.$$

Failure intensity  $\overline{\lambda}_{as}(\tau_{as})$  and  $\overline{\lambda}_w(\tau_w)$ ;

$$\overline{\lambda}_{as}(\tau_{as}) = \frac{n_{as}(\tau_{as})}{N_{cas} \Delta \tau_{as}};$$

$$\overline{\lambda}_w(\tau_w) = \frac{n_w(\tau_w)}{N_{cw} \Delta \tau_w},$$

where  $N_{as}$ ,  $N_w$  – the number of samples placed under observation, pcs.;  $n_{as}$ ,  $n_w$  – the number of samples that failed in time ( $\tau_{as}$ ) or ( $\tau_w$ ), pcs.;  $\Delta \tau_{as}$ ,  $\Delta \tau_w$  – selected value of the time interval, years;  $N_{cas}$ ,  $N_{cw}$  – the average number of working samples in the time interval, pcs.

Average time of trouble-free work  $\overline{T}_{as}$  and  $\overline{T}_w$

$$\overline{T}_{as} = \frac{\frac{\tau_{kas}}{\Delta \tau_{kas}} \sum_{i=1}^{n_{as_i}} n_{as_i} \tau_{as_i}}{N_{as}};$$

$$\overline{T}_w = \frac{\frac{\tau_{kw}}{\Delta \tau_{kw}} \sum_{i=1}^{n_{w_i}} n_{w_i} \tau_{w_i}}{N_w},$$

where  $n_{as_i}$ ,  $n_{w_i}$  – the number of samples that failed in the  $i$ -th interval, pcs.;  $\tau_{as_i}$ ,  $\tau_{w_i}$  – average time of the  $i$ -th interval, years;  $\tau_{kas}$ ,  $\tau_{kw}$  – number of all failed samples over time  $N_{as}$  and  $N_w$ , pcs.

As a result of statistical studies and mathematical processing, the statistical characteristics of coatings reliability  $\overline{P}$ ,  $\overline{\alpha}$ ,  $\overline{\lambda}$  are shown in fig. 5.

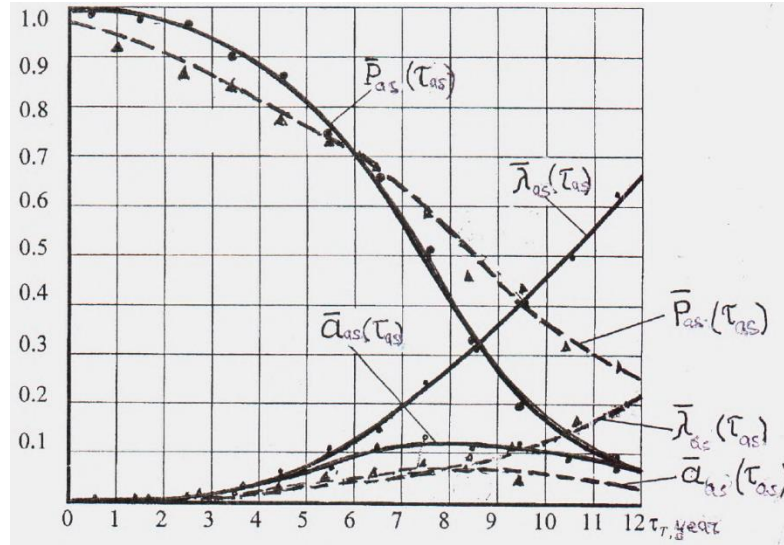


Fig. 5. Statistical characteristics of the reliability of the coating

The average values of the operating time of coatings "x̄" and the standard deviation "σ" are determined from the expressions

$$\bar{x} = \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n_i x_i = C + hu,$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^k n_i (x_i - \bar{x})^2} = h \sqrt{\frac{hu}{N-1} - (\bar{u})^2},$$

where C is the middle of the middle interval; h is the length of the interval (1 year); ū – interval number. The calculation data are given in table 6.

Table 6. Data for the calculation of the operating time "x̄" and standard deviation "σ"

Initial data			Calculation		
intervals τ, years	mid interval	number of failures h, pcs.	u	hu	(hu) <sup>2</sup>
<b>Assembly operations</b>					
1-2	1,5	1	-6	-6	36
2-3	2,5	2	-5	-10	100
3-4	3,5	2	-4	-8	65
4-5	4,5	3	-3	-9	81
5-6	5,5	10	-2	-20	400
6-7	6,5	14	-1	-14	196
7-8	7,5	16	0	0	0
8-9	8,5	16	1	16	256
9-10	9,5	13	2	26	676
10-11	10,5	10	3	30	900
11-12	11,5	6	4	24	576
12-13	12,5	4	5	20	400
13-14	13,5	2	6	12	144
14-15	14,5	1	7	7	49
Total		100		68	3878
<b>Assembly operations</b>					
1-2	1,5	2	-3	-6	36
2-3	2,5	3	-2	-6	36
3-4	3,5	8	-1	-8	64
4-5	4,5	37	0	0	0
5-6	5,5	30	1	30	900
6-7	6,5	10	2	20	400
7-8	7,5	6	3	18	324
8-9	8,5	4	4	16	256
Total		100		64	2016

After processing the results of statistical studies, it was found that the average value of the operating time of the coating during assembly operations is  $x_{as} = T_{as} = 8$

years for welding operations  $x_c = T_c = 5$  years, standard deviation  $\sigma_{as} = 6$  years,  $\sigma_c = 4.5$  years.

When assessing the analytical characteristics of the reliability and durability of a coating, wear failures are the main ones, the time of occurrence of which obeys the truncated normal distribution law.

The failure rate in this case is determined by the well-known equation:

$$\alpha(\tau) = c \cdot e^{-\frac{(\tau-T_1)^2}{2\sigma^2}},$$

where  $c$  is the constant of the truncated normal distribution, which is determined from the expression

$$c = \frac{\sqrt{\frac{2}{P}}}{\sigma \left[ 1 + \varphi\left(\frac{T_1 - T_w}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right]},$$

where  $\sigma$  – standard deviations;  $\varphi$  – probability interval.

After carrying out certain calculations, we obtained for assembly operations  $c = 0.101$ , for welding operations  $c=0,099$ .

For our case, we get the following failure rates

$$\alpha_{as}(\tau_{as}) = 0,101e^{-\frac{(\tau_{as}-8)^2}{72}},$$

$$\alpha_w(\tau_w) = 0,099e^{-\frac{(\tau_w-5)^2}{40,5}}.$$

There is a relationship between  $\alpha(\tau)$  and  $P(\tau)$

$$P(\tau) = 1 - \int_0^\tau \alpha(\tau) d\tau.$$

Substituting the values  $\alpha(\tau)$  and  $c$  and making a series of mathematical transformations, we obtain

For assembly operations

$$P_{as}(\tau_{as}) = \frac{1 - \varphi\left(\frac{\tau_{as} - T_{as}}{\sigma_{as}\sqrt{2}}\right)}{1 + \varphi\left(\frac{T_w}{\sigma_{as}\sqrt{2}}\right)} = \frac{1 - \varphi\left(\frac{\tau_{as} - 8}{8,46}\right)}{1,945}.$$

For welding operations

$$P_w(\tau_w) = \frac{1 - \varphi\left(\frac{\tau_w - T_w}{\sigma_w\sqrt{2}}\right)}{1 + \varphi\left(\frac{T_w}{\sigma_w\sqrt{2}}\right)} = \frac{1 - \varphi\left(\frac{\tau_{as} - 5}{6,34}\right)}{1,788}.$$

For probabilistic determination of the failure rate of the coating between  $\lambda(\tau)$ ,  $P(\tau)$  and  $\alpha(\tau)$  there is a dependence

$$P(\tau) = e^{-\int_0^\tau \lambda(\tau) d\tau},$$

$$\alpha(\tau) = \lambda(\tau)e^{-\int_0^\tau \lambda(\tau) d\tau},$$

$$\lambda(\tau) = \frac{\alpha(\tau)}{P(\tau)} = \frac{c \cdot e^{-\frac{(\tau-T_1)^2}{2\sigma^2}}}{P(\tau)}.$$

Having completed a number of mathematical transformations, we obtain for our case:

For assembly operations

$$\lambda_{as}(\tau_{as}) = \frac{\sqrt{\frac{2}{P}} e^{-\frac{(\tau_{as}-T_{as})^2}{\sigma_{as}^2}}}{\sigma_{as} \left[ 1 - \varphi\left(\frac{\tau_{as} - T_{as}}{\sigma_{as}\sqrt{2}}\right) \right]} = \frac{0,8e^{-\frac{(\tau_{as}-8)^2}{72}}}{6 \left[ 1 - \varphi\left(\frac{\tau_{as} - 8}{8,46}\right) \right]}.$$

For welding operations

$$\lambda_w(\tau_w) = \frac{\sqrt{\frac{2}{P}} e^{-\frac{(\tau_w-T_w)^2}{\sigma_w^2}}}{\sigma_w \left[ 1 - \varphi\left(\frac{\tau_w - T_w}{\sigma_w\sqrt{2}}\right) \right]} = \frac{0,8e^{-\frac{(\tau_w-5)^2}{40,5}}}{6 \left[ 1 - \varphi\left(\frac{\tau_w - 5}{6,34}\right) \right]}.$$

The reliability characteristics of obtaining analytically are presented in the form of graphs (fig. 6).

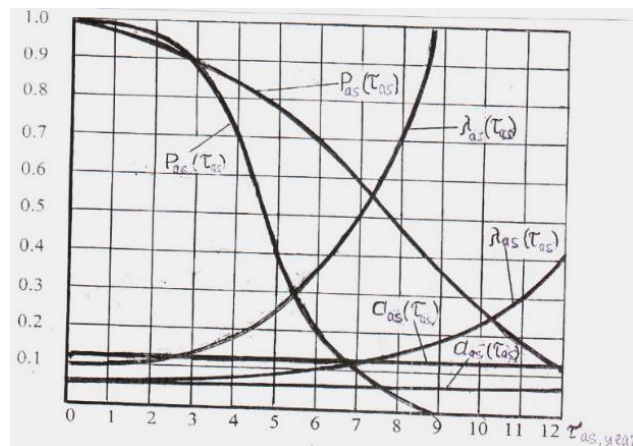


Fig. 6. Analytical characteristics of the reliability of coatings

The average failure-time of protective coatings in the probabilistic version is found from the equation

$$T = \int_0^{\infty} \tau \alpha(\tau) dt = C \int_0^{\infty} \tau e^{-\frac{(\tau-T_1)^2}{2\sigma^2}} d\tau.$$

Performing a series of mathematical transformations, we obtain for our case:

When performing assembly operations

$$T_{as} = T_{as} + C_{as} \sigma_{as}^2 e^{-\frac{T_{as}^2}{2\sigma_{as}^2}} = 9,6 \text{ years.}$$

When performing welding operations

$$T_w = T_w + C_w \sigma_w^2 e^{-\frac{T_w^2}{2\sigma_w^2}} = 5,5 \text{ years.}$$

The considered characteristics make it possible to evaluate the reliability of coatings, but do not allow to establish a relationship between the time components of the operation cycle, not taking into account the time spent on preventive measures and repairs ensuring the durability of the elements of assembly and welding equipment. To solve this issue, a performance coefficient  $k_p$  is introduced, which is determined from the expression:

$$k_p = \frac{T}{T + T_p},$$

where  $T$  – uptime,  $h$ ;  $T_p$  – the time it takes to restore the failed element,  $h$ .

In the process of conducting research on the performance of assembly and welding equipment, one of the main issues in the operation of equipment is the

## References

- Zholtnevich, N. D., Podobedov, V. V., Romenskiy, V. I. (2000), "Tooling for serial production of welded structures" ["Tekhnologicheskaya osnastka dlya seriynogo proizvodstva svarnykh konstruksiy"], *Proceedings of the State Aerospace University, NOT, Zhukovskiy KhAI "Aerospace Engineering and Technology*, Issue 14, P. 102–104.
- Podobedov, V. V., Romenskiy, V. I. (2000), "Prospect state and the concept of development of assembly and welding equipment in mechanical engineering. International scientific and technical collection" ["Sostoyaniye perspektivy i kontseptsiya razvitiya sborchno-svarchnoy osnastki v mashinostroyeni"], *Cutting and tooling in technological systems of KHGPU*, Issue 58, P. 34–38.
- Zholtnevich, N. D., Filatov, L. S., Glushchenko, V. I., Romenskiy, V. I. et al. (1982), "Universal-assembly fixtures with grooves of 8, 12 and 16 mm for assembly and welding operations" ["Universal'no-sbornyye prispobleniya s pazami 8, 12 i 16 mm dlya sborchno-svarchnykh rabot"], *Central Research Institute of Information*, P. 5–75.
- Romenskiy, V. I., Yashkov, I. O. (2015), "Development of a parametric model for creating a module for automated assembly and welding equipment in the manufacture of electronic devices" ["Razrabotka parametricheskoy modeli dlya sozdaniya modulya avtomatizirovannoy sborchno-svarchnoy osnastki pri proizvodstve izdeliy radioelektronnogo priborostroyeniya"], *Instrumentation Technology*, No. 2. P. 47–53.
- Romenskiy, V., Nevludova, V., Persyanova, E. (2019), "Technological methods of improving the reliability of storage and welding equipment in the production of radio-electronic device products", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 120–133. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.120>.
- Romenskiy, V. I., Podobedov, V. V. (1999), "Classification of factors affecting the durability of assembly and welding equipment" ["Klassifikatsiya faktorov, vliyayushchikh na dolgovechnost' sborchno-svarchnoy osnastki"], *Collection "Vesnik" KHPU*, Issue 63, P. 44–47.
- Podobedov, V. V., Romenskiy, V. I., Zholtkevich, G. N. (2000), "Development of the optimal composition of the protective coating that protects the working surfaces of special assembly and welding equipment from the effects of welding spatter" ["Razrabotka optimal'nogo sostava zashchitnogo pokrytiya predokhranyayushchego rabochiye poverkhnosti spetsial'noy sborchno-svarchnoy osnastki ot vozdeystviya svarchnykh bryzgz"], *Bulletin of KhPGU*, No. 104, P. 32–37.

reliability and durability of protective equipment (protective coating) when exposed to welding splashes during welding and mechanical wear during the assembly of welding metal structures in the device.

The method of graphic summation of developments proposed coating protects surfaces during execution of welding operations and the assembly process determined that the average time to failure of the protective coating is 5 – 6 years. It is theoretically revealed and experimentally proved that to ensure an 8 – 10 – year service life of the working surfaces of equipment placed near the welding zone, 2-time coating is necessary, respectively.

## Conclusions

Based on experimental studies, it was determined that the resistance of the proposed protective coating against the impact of welding splashes is described by a multi – factor linear polynomial, and the resistance of the coating during mechanical movement is described by a cubic parabola. Based on experimental studies, it was found that the operating time of the working surfaces of assembly and welding equipment during assembly work (assembly and tacking metalwork elements) is 6–15 years, and when performing assembly and welding operations (tacking and final welding) from 4 to 8 years. Mathematical dependences of the probability of failure-free operation, the frequency and intensity of failures are obtained. The average uptime of the coating is 6 years. It is theoretically determined and experimentally confirmed that to ensure an 8–10-year service life, two-time coating application is necessary.

8. Romenskiy, V. I., Lazarenko, A. P., Filatov, L. S. et al. (1982), *Coating composition for surface protection against sticking of molten metal splashes* [Sostav pokrytiya dlya zashchity poverkhnosti ot nalipaniya bryzg rasplavlennoho metalla], Copyright certificate No. 959963, Publ. in B.I., No. 32.
9. Podobedov, V. V., Romenskiy, V. I., Budyoniy, M. M., Borodinov, V. A. (2002), *Method of testing and evaluation of protective coatings against the action of welding splashes* [Sposib vyprobuvannya y otsinky zakhysnykh pokryt' vid diyi zvaryuval'nykh bryzok], Declaration Patent for Invention No. 46995 of June 17, 2002.
10. Podobedov, V. V., Budenny, M. M. (2000), "Determination of the resistance of the protective coating protecting the working surfaces of assembly and welding equipment from the effects of welding spatter" ["Opredeleniye stoykosti zashchitnogo pokrytiya, predokhranyayushchego rabochiye poverkhnosti sborochno-svarochnoy osnastki ot vozdeystviya svarochnykh bryzg"], *High technology in machine-driven equipment of KSPU*, Vol. 1, P. 194–199.
11. Romenskiy, V. I. (1976), "Investigation of the reliability and durability of surfaces of assembly-welding devices for welding production" ["Issledovaniye nadezhnosti i dolgovechnosti poverkhnostey sborochno-svarochnykh prispособleniy dlya svarochnogo proizvodstva"], *Bulletin of mechanical engineering*, No. 11, P. 69–70.
12. Romenskiy, V. I., Zholtkevich, G. N. (1978), "Protection of surfaces of elements of universally prefabricated devices for assembly and welding production" ["Zashchita poverkhnostey elementov universal'no – sbornykh prispособleniy dlya sborochno-svarochnogo proizvodstva"], *Scientific and technical collection. Questions of defense technology. Series XVII*, Issue 104, P. 67–71.
13. Romenskiy, V. I., Zholtkevich, G. N. (1981), "Investigation of the resistance of protective coatings to the effects of welding spatter and mechanical friction" ["Issledovaniye stoykosti zashchitnykh pokrytyy vozdeystviyu svarochnykh bryzg i mekhanicheskomu treniyu"], *Production - technical bulletin*, No. 11, P. 33–36.
14. Karmanov, V. G. (1975), *Mathematical programming [Matematicheskoye programmirovaniye]*, Moscow : Nauka, No. 1. 272 p.
15. Podobedov, V. V., Romenskiy, V. I. (2000), "Study of the dispersion density of welding spatter on the working surfaces of assembly-welding equipment during welding operations" ["Issledovaniye plotnosti rasseivaniya svarochnykh bryzg na rabochiye poverkhnosti sborochno-svarochnoy osnastki pri vypolnenii svarochnykh operatsiy"], *Bulletin of KHPTU*, No. 110.
16. Nevlyudov, I. Sh. (2005), *Fundamentals of Electronic Appliance Production [Osnovy vyrobnystva elektromykh aparativ]* : A Textbook, Kharkiv, SMIT Company, 592 p.
17. Nevlyudov, I. Sh. (2017), *Production Processes and Equipment of Automation Objects [Vyrobnychi protsesy ta obladnannya ob'yektiv avtomatyzatsiyi]* : A Textbook for Students of Higher Educational Institutions, Krivoy Rog, Krivoy Rog College of NAU, 444 p.
18. Krivov, G. O., Zvorkin, K. O. (2012), *Manufacture of welded structures [Vyrobnystvo zvarnykh konstruksiy]*, Kyiv : KVIT, 896 p.
19. Karpenko, A. S. (2005), *Technological Equipment in Welding Production [Tekhnologichna osnastka u zvaryuval'nomu vyrobnystvu]*, Kyiv : Aristy, 268 p.
20. Dávid Michal, Peter Košťál, Šimon Lecký and Štefan Václav (2018), "Rationalization of Robotic Workstation in Welding Industry", *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, Vol. 26, Issue 42, P. 159–164. DOI: <https://doi.org/10.2478/rput-2018-0019>
21. Rodriguez et al, (2015), "Procedure for quality inspection of welds based on macro-photogrammetric three-dimensional reconstruction", *Journal of Optics and Laser Technology*, Vol. 73, P. 54–62.
22. Yusof, F., Jamaluddin, M. F. (2014), "Welding Defects and Implications on Welded Assemblies", *Comprehensive Materials Processing*, Vol. 6, P. 125-134. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00605-1>
23. Kah, P. and Martikainen, J. (2012), "Current trends in welding processes and materials: improve in effectiveness", *Reviews on Advanced Materials Science*, No. 30, P. 189–200.

Received 15.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Роменський Вячеслав Іванович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: [vladyslav.romenskiy@nure.ua](mailto:vladyslav.romenskiy@nure.ua); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9472-8021>.

**Роменский Вячеслав Иванович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

**Romenskiy Vyacheslav** – PhD (Engineering Sciences), Senior Researcher, Kharkiv National University of Radioelectronics, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

**Невлюдова Вікторія Валеріївна** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: [d\\_tapr@nure.ua](mailto:d_tapr@nure.ua), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1158-5089>.

**Невлюдова Виктория Валерьевна** – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

**Nevliudova Viktoriia** – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radioelectronics, Senior Lecturer at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

**Персіянова Олена Юріївна** – Державне підприємство "Південний державний проектно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості", інженер науково-дослідного відділу, Харків, Україна; email: [persikqw@gmail.com](mailto:persikqw@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3578-4653>.

**Персіянова Елена Юрьевна** – Государственное предприятие "Южный государственный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт авиационной промышленности", инженер научно-исследовательского отдела, Харьков, Украина.

**Persiyanova Elena** – State Enterprise "Southern National Design & Research Institute of Aerospace Industries", Research Engineer, Kharkiv, Ukraine.

## ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРАЦЮВАННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ПОВЕРХОНЬ СКЛАДАЛЬНО-ЗВАРЮВАЛЬНОГО ОСНАЩЕННЯ

**Предметом** дослідження в статті є питання, пов'язані з визначенням терміну служби захисних покриттів, що оберігають поверхні складально-зварювальних пристосувань від впливу зварювальних бризок і механічного зносу при виконанні певних операцій по збірці і зварюванні зварних металокопункцій. Розвиток в Україні різних галузей промисловості, особливо галузі точного машинобудування (приладобудування), характеризується переходом на ринкові методи господарювання, підвищення попиту на конкурентоспроможну і ліквідну продукцію. Цього можна досягти систематичним і швидким впровадженням технічно нових виробів, підвищення їх якості, збільшення продуктивності праці, автоматизацією виробництва. У конструкціях модернізованих і нових видах виробів широко застосовуються зварні металокопункції, якісне виготовлення яких неможливо без застосування складально-зварювального оснащення. Надійність і довговічність даних пристосувань залежить від захисту їх поверхонь впливу зварювальних бризок і задирам при виконанні складальних і зварювальних операцій. Аналітичні і експериментальні дослідження стійкості захисних покриттів впливу експериментальної зварювальної краплі металу показали, що з більшої апробованих покриттів найбільш довговічним є розроблене захисне покриття, що містить суміш порошку дисульфіду молибдену, порошку графіту, епоксидного лаку і певних розчинників. **Мета:** визначення терміну служби розробленого захисного покриття при впливі ряду значущих чинників, в тому числі впливу реальних зварювальних бризок. **Завдання:** виявити основні – значущі технологічні чинники, які впливають на термін служби захисного покриття; розробити матрицю планування на підставі повного факторного експерименту; провести експериментальні дослідження стійкості покриття впливу експериментальної краплі металу при впливі значущих технологічних факторів, отримати рівняння регресії стійкості; провести аналітичні та експериментальні дослідження з визначення температури експериментальної краплі розплавленого металу; провести аналітичні дослідження температури реальної зварювальної бризки; провести дослідження стійкості покриття при терті; провести аналітичні дослідження щодо визначення кількісних характеристик надійності і довговічності запропонованого складу покриття. **Результати:** в статті представлені дані досліджень авторами терміну служби запропонованого захисного покриття, що оберігає поверхні складально-зварювальних пристосувань при впливі зварювальних бризок і зносу покриття при переміщенні елементів металокопункцій в пристосуванні. Отримано кількісні характеристики надійності і довговічності покриття. **Висновки:** Розроблено методологію щодо визначення терміну служби захисних покриттів, що оберігають поверхні складально-зварювальних пристосувань від впливу зварювальних бризок при виконанні зварювальних операцій і зносу покриття при переміщенні елементів зварювальної конструкції в пристосуванні при складанні.

**Ключові слова:** складально-зварювальна оснастка; захисні покриття; зварювальні бризки; товщина захисної плівки; види зварювання; ймовірність безвідмовної роботи; частота відмов; інтенсивність відмов; строк служби.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАРАБОТКИ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СБОРОЧНО-СВАРОЧНОЙ ОСНАСТКИ

**Предметом** исследования в статье являются вопросы, связанные с определением срока службы защитных покрытий, предохраняющих поверхности сборочно-сварочных приспособлений от воздействия сварочных брызг и механического износа при выполнении определенных операций по сборке и сварке сварных металлоконструкций. Развитие в Украине различных отраслей промышленности, особенно отрасли точного машиностроения (приборостроения), характеризуется переходом на рыночные методы хозяйствования, повышения спроса на конкурентоспособную и ликвидную продукцию. Этого можно достичь систематическим и быстрым внедрением технически новых изделий, повышения их качества, увеличением производительности труда, автоматизацией производства. В конструкциях модернизированных и новых видах изделий широко применяются сварные металлоконструкции, качественное изготовление которых невозможно без применения сборочно-сварочной оснастки. Надежность и долговечность данных приспособлений зависит от защиты их поверхностей воздействию сварочных брызг и задирам при выполнении сборочных и сварочных операций. Аналитические и экспериментальные исследования стойкости защитных покрытий воздействию экспериментальной сварочной капли металла показали, что из большинства апробированных покрытий наиболее долговечным является разработанное защитное покрытие, содержащее смесь порошка дисульфида молибдена, порошка графита, эпоксидного лака и определенных растворителей. **Цель:** определение срока службы разработанного защитного покрытия при воздействии ряда значимых факторов, в том числе воздействию реальных сварочных брызг. **Задачи:** выявить основные – значимые технологические факторы влияющие на срок службы защитного покрытия; разработать матрицу планирования на основании полного факторного эксперимента; провести экспериментальные исследования стойкости покрытия воздействию экспериментальной капли металла при влиянии значимых технологических факторов, получить уравнения регрессии стойкости; провести аналитические и экспериментальные исследования по определению температуры экспериментальной капли расплавленного металла; провести аналитические исследования температуры реальной сварочной брызги; провести исследование стойкости покрытия при трении; провести аналитические исследования по определению количественных характеристик надежности и долговечности предложенного состава покрытия. **Результаты:** в статье представлены данные исследований авторами срока службы предложенного защитного покрытия, предохраняющего поверхности сборочно-сварочных приспособлений при воздействии сварочных брызг и износа покрытия при перемещении элементов металлоконструкций в приспособлении. Получены количественные характеристики надежности и долговечности покрытия. **Выводы:** Разработана методология по определению срока службы защитных покрытий предохраняющие поверхности сборочно-сварочных приспособлений от

воздействия сварочных брызг при выполнении сварочных операций и износа покрытия при перемещении элементов сварочной конструкции в приспособлении при сборке.

**Ключевые слова:** сборочно-сварочная оснастка; защитные покрытия; сварочные брызги; толщина защитной пленки; виды сварки; вероятность безотказной работы; частота отказов; интенсивность отказов; срок службы.

*Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Роменський В. І., Невлюдова В. В., Персіянова О. Ю. Дослідження напрацювання захисного покриття поверхонь складально-зварювального оснащення. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 134–146. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.134>.

Romenskiy, V., Nevliudova, V., Persyanova, E. (2020), "Study of the operating time of the protective coating of surfaces of assembly and welding equipment", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 134–146. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.134>.

---

K. SELIVANOVA, O. AVRUNIN, N. KAZIMIROV

## DETERMINATION OF THE BASIC PARAMETERS OF SENSOR DEVICES FOR THE IMPLEMENTATION OF PSYCHONEUROLOGICAL RESEARCH WITH THE INTRODUCTION OF MULTITOUCH TECHNOLOGY

The **subject** of the article is the testing process on multi-touch devices for the implementation of psychoneurological studies. The **goal** of the work is development specialized dynamic tests with the introduction of Multi-touch technology to detect carpal tunnel syndrome and hand dysfunction in the early stages of the disease. An **objective** of the work is to conduct a theoretical analysis to determine the optimal parameters of touchscreen devices for the implementation of psycho neuro logical testing; based on experimental studies to determine the main physical indicators of the test results, indicating the presence of functional disorders of the hand. The constant use of computers, smartphones, gadgets provide multiple identical load on the wrist; constant visual and neuro-emotional stress; sitting position of the body; static tension of the musculoskeletal system caused by the need to maintain a working posture; decreased overall motor activity. The **methods** of computer modeling and visualization of dynamic tests using the multi-platform programming language Python were used. **Results.** The scientific novelty and practical significance of the obtained results is the development of specialized software and algorithmic software for dynamic testing on sensory devices with the ability to video record the movements of the upper extremities in the mode "Rapid". The advantage of this method is its non-invasiveness, ease of implementation, as well as the absence of sensors that can restrict movement. Using the rapid method, one can easily distinguish the pathological state of motor activity of the hand from the established norm. **Conclusions.** A specialized software tool was developed, which was adapted for multi-touch screens that allow identifying functional disorders of the hand by registering the main physical parameters during testing. Dynamic tests are adapted for any age category of participants (patients), have additional modes for individual color perception and different levels of complexity.

**Keywords:** carpal tunnel syndrome; hand dysfunction; multi-touch devices; dynamic testing; psychoneurology.

### Formulation of the problem

The widespread introduction of modern information technologies in all areas of human activity, as well as the global computerization of work processes, has led to a significant increase in the number of cases of such a hand disorder as "carpal tunnel syndrome" or "carpal tunnel syndrome" especially among the young and middle-aged population [1]. Informally, it is called the "computer mouse" syndrome, sometimes the concept is found as a "gamer's hand" among teenagers and the younger generation [1–3]. Often there are concomitant consequences of this disorder in the form of violations of perception by lateral vision, in connection with the continuous processing of visual information on different monitors and screens of electronic devices [4–6]. Determination of professional or functional disorders of human hands of various etiology and pathogenesis, their prevention at the early stages is an urgent scientific and technical problem, especially in Psychoneurology, in order to develop new automated rapid testing tools using interactive sensory devices.

### Analysis of recent research and publications

In scientific works [7–8], the touch screen is defined as a coordinate device, which allows you to touch the area of the monitor screen by touching the area of the monitor screen to make the necessary data element, menu or to enter data on different computer systems. It is known that touch screens use only four basic principles of construction: resistive, capacitive, acoustic and infrared; however, various sources [7–9] distinguish six, and sometimes even eight/ten, technologies for the production of touch screens [9–10].

According to the data given in [7–11], two types of displays – resistive and capacitive – have become most widespread at this time. Development of interactive tests for registration of such parameters as speed of sensorimotor reaction, pressure of force, accuracy and time of task fulfillment, determination of level of development of graphic skills, fine motor skills, dysfunction of a hand of a hand require implementation of Multitouch (or multi-touch) technology as it enables to fix several clicks at a time or only one during testing. In addition, the Multitouch screens allow the device to work with several individuals simultaneously, enabling testing to be implemented as an interactive game for children and adolescents [9]. It should be noted that touch screens have a coordinate system independent of the main display. Touch map mapping requires a conversion algorithm from one coordinate system to another. The accuracy of this conversion depends on the stability of the touch point coordinate system and the video coordinates [11].

The analysis of literature sources [1–11] found that:

- the most common types of touch screens are resistive and projection-capacitive, because they have the highest accuracy in determining the touch point;
- infrared sensors are most often used in narrow-profile models of portable electronics;
- the innovation of building sensor devices in the future will only concern the development of a flexible matrix and new protective coatings;
- capacitive sensors are convenient and easy to use for recognizing and entering information;
- for solving research problems in Psychoneurology, the best are Multitouch (multisensory) screens, which also use the click-through process.

A review of the scientific and technical literature

[1–13] demonstrated the lack of sufficient theoretical and experimental work to determine the basic technical parameters of sensory devices for testing and physical indicators of hand dysfunction, since functional disorders of the upper extremities have neurological, or only psychological component of the pathogenesis of the disease.

#### Purpose and objectives of the study.

The purpose of the research is to develop specialized interactive tests on Multitouch screens to detect early-stage dysfunction of the hand or tunnel syndrome of the wrist.

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

- to carry out theoretical analysis to determine the optimal parameters of sensor devices for the implementation of psychoneurological testing;
- to determine, on the basis of experimental studies, the main physical indicators of the test results, indicating the presence of functional disorders of the hand.

#### Theoretical analysis to determine the optimal parameters of touch screens for the implementation of psychoneurological testing

Touching the touch screen causes local deformation of the flexible surface layer, resulting in a change in the electrical resistance or capacity of the corresponding cell, depending on the type of sensor. Contact coordinates are determined using two-dimensional matrix sensors. On the basis of matrix tactile sensors, systems of recording the coordinates of touch and fingerprint recognition for biometric identification of the person were created. Most often, resistive and capacitive touch panels are used in electronics [7].

In practice, the capacitance is calculated between the electrodes, in other words the square symmetric matrix of the capacitance of the touch screen is calculated, which determines the relationship between the voltage and the charge on the electrodes of the system.

It is generally accepted [7–9] that the diagonal components of this screen matrix  $C_{ii}$  are calculated as an integral of the energy density  $\int_{\Omega} W_e$  in the area  $\Omega$  and the vector of spatial coordinates  $V_k$ :

$$C_{ii} = \frac{2}{V_k^2} \int_{\Omega} W_e d\Omega, \quad (1)$$

where  $V_k = \begin{cases} 0, 1 & j \neq i \\ V_i & j = i \end{cases}$ .

Non-diagonal members of the screen matrix  $C_{ij}$  are calculated by the formula using the vectors separately with coordinates  $V_i$  and  $V_j$ :

$$C_{ij} = \frac{2}{V_k} \int_{\Omega} W_e d\Omega - \frac{1}{2} \left( \frac{V_i}{V_j} C_{ii} + \frac{V_j}{V_i} C_{jj} \right), \quad (2)$$

where  $V_k = \begin{cases} 0, 1 & k \neq i, j \\ V_i & k = i \\ V_j & k = j \end{cases}$ .

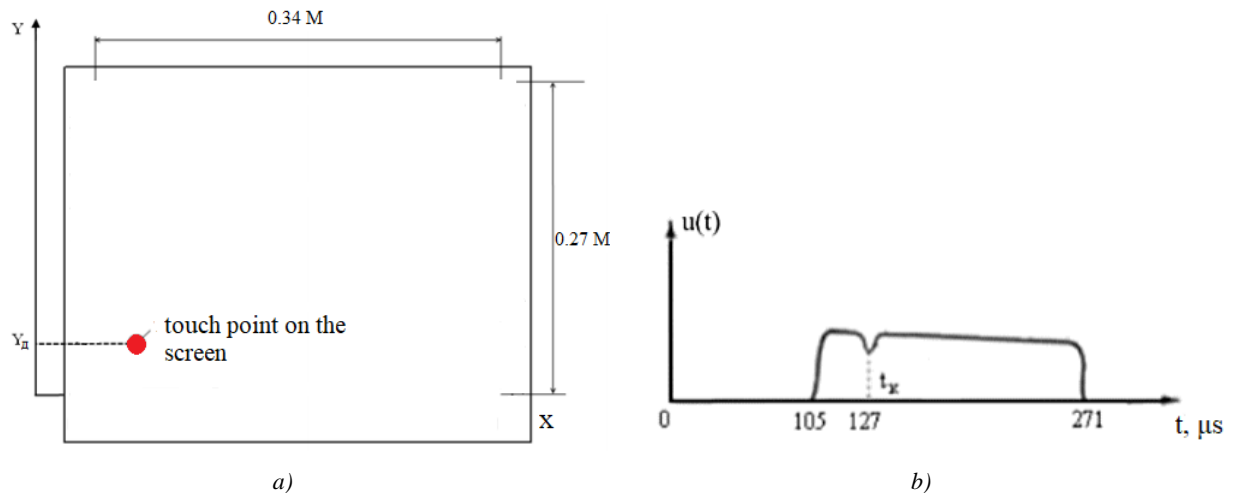
The principle of operation of the capacitive panel is based on the determination of the point of pressure, while changes in field strength and weak AC signal at the corners of the plate are recorded. Touching any conductive material on the plate will cause the current to be fixed by the sensors at the same angles. The main disadvantage of capacitive technology is the use of sophisticated mathematical processing to determine the contact coordinates and the inability to register the force of pressure on the touch screen, if it is made, for example, through a glove [8].

With respect to resistive technology, the panel consists of two plates that are opposite each other. A layer of resistive material is applied vertically on one of the plates and horizontally on the other, 2 electrodes are drawn from each of them. Detecting the point of contact in resistive panels is to determine the presence of contact between two conductive plates. The measurement of the coordinate of the point of click is performed along the x and y axes, respectively. The resolution of the resistive type touch panels is limited by the ADC converter bit and the voltage difference applied to the panel electrodes. Using a 10-bit ADC, you can measure up to 1024 voltage levels (ie points on the touch panel). This technology uses the simplest mathematical processing to determine the coordinates of the touch, which is an advantage over capacitive. The disadvantage of the touch screen resistive type is the wear of the panels and the need for gradual calibration [7, 8].

Here is an algorithm for finding the coordinates of the point of contact of a touch screen with a desktop with a diagonal of 17 inches (0.34m × 0.27m) (fig. 1). The registration of the electrical signal after pressing begins from the moment of receiving the wave that has traveled the shortest distance (0.34 m) on the surface of the touch panel and ends at the moment when it has traveled the longest distance (0.88 m). As can be seen in fig. 1 b the amplitude of the response signal after pressing sharply decreases, indicating that there is a touch at a certain point of the touch screen (fig. 1 a).

The accuracy of determining the coordinates of the touch point depends on the sampling rate of the received signal. Due to the higher sampling rate of the received signal, it is possible to more accurately determine the level of amplitude drop after the touch panel is pressed.

Having tested various types of touch screens for dynamic testing, the optimal specifications listed in table 1 were determined.



**Fig. 1.** Example of touch point calculation (a) and received feedback response form after pressing (b)

**Table 1.** Optimal specifications of sensor devices for dynamic testing

Options	Specifications
The number of pixels in the matrix	20584 (124x166)
Pixel dimensions	81.6 x 81.6 $\mu\text{m}$
The dimensions of the sensor matrix	10,1x13,5 mm
Image digitization time	2 ms
Image identification time	100 ms

### Experimental psychoneurological studies on multitouch screens

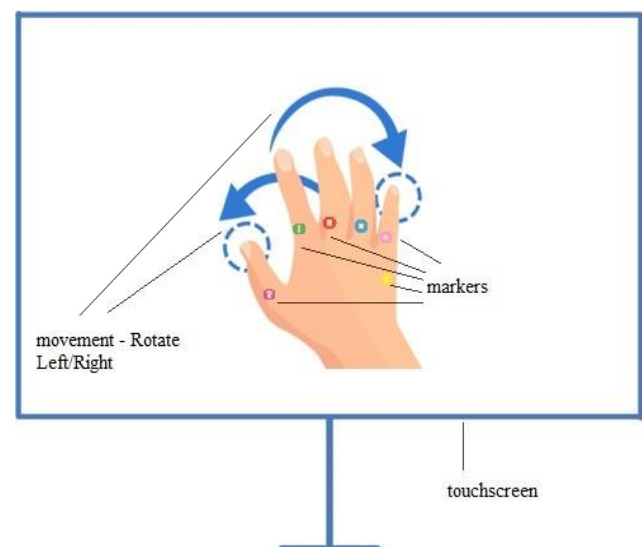
The purpose of the experiment was to investigate the physical parameters during testing on Multitouch screens, which indicate the presence of wrist tunnel syndrome or hand dysfunction. The cause of these disorders is nerve entrapment in the carpal tunnel, accompanied by pain during arm movements. Continuous static loading of the same muscles in a large number of monotonous movements during prolonged work with a computer mouse, joystick, ballpoint manipulator or keyboard, due to which the wrist is in constant tension.

The experimental studies were conducted on the basis of the Laboratory of Biomedical 3D Technologies of the Department of Biomedical Engineering of Kharkiv National University of Radio Electronics. The MEDION MD 20165 monitor was used as a graphical display, which has the ability to touch control and connect Multitouch mode. It was there that the participants of the experiment were tested in the form of repeating the trajectories of motion of dynamic figures. A layout of two HP HD-5210 digital webcams was also used to provide video recording of upper extremity movements as an additional method for detecting hand dysfunction [18].

One of the basic conditions for touch screen video recording is to place bright color markers on each phalanx and hand separately, which can be easily detected by computer vision algorithms. As markers, adhesive material of various colors of circular shape was used, which can be easily attached to a person's hand. The choice of this shape is justified by the properties of the

circle or sphere for projecting, since this type of figure has the most optimal shading during color segmentation. Color is used to separate the marker from the background, as well as to identify a specific marker from others. For background marker segmentation, it was decided to use HSV segmentation, which has significant advantages over segmentation in RGB color space. Dynamic test code on a multisensor screen is shown in fig. 2, taking into account the most common multitouch gestures:

- finger shift - the image becomes smaller;
- fingers spread - the image becomes larger;
- multi-finger movement at the same time - scroll;
- two-finger rotation - rotate the subject.



**Fig. 2.** Symbol for test execution on the Multitouch screen

Dynamic test development is a projection of the complex trajectory of the object's motion. Python high-level programming language was used for this purpose. The chaotic trajectory of the movement of the figure is quite difficult during the testing of the participants, because it requires the maximum concentration of attention and flexibility of the fingers and wrist, the speed of the sensorimotor response, which, as a result, allows to determine different levels of dysfunction of the hand or tunnel syndrome. The testing process itself is organized as a single system of interactive interaction between the participant and the specialist. Task templates have been designed so that the trajectories of the movement of the figure correspond to the entire workspace of the GUI at different ends of the multi-touch screen.

The dynamic test was designed as a game form that allows it to be used for different age groups of experiment participants. The object for the test is a spherical, 800x800 pixel shaped ball that corresponds to the average diameter of the fingertip. In our case, this is a pink ball that moves along a given trajectory with certain conditions. That is, when the ball touches any finger of the ball, it sharply changes its direction of movement to the opposite along the x or y axis. The "working area" of the developed GUI was set, namely 400 pixels. The motion graphic is updated every 0.09 seconds. The  $x_d$  (85 pixels) and  $y_d$  (45 pixels) parameters are responsible for the direction in which the figure will move from the starting point. If the object touches the boundaries of the work area, it changes its direction to the opposite according to the main condition:

$$\begin{cases} x_d = -x_d \\ y_d = -y_d \end{cases} \quad (3)$$

Fig. 3 clearly illustrates an example of moving a dynamic object according to the given conditions. In fig. 4 shows the trajectory of the ball and the graphical interface of the software to perform testing on the Multitouch screen to determine dysfunction of the hand or tunnel syndrome of the wrist.

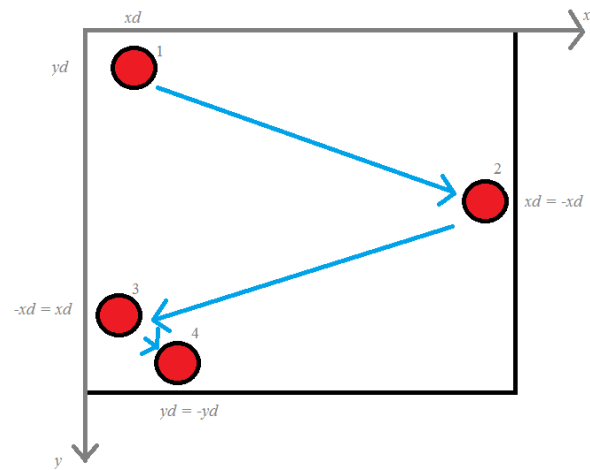
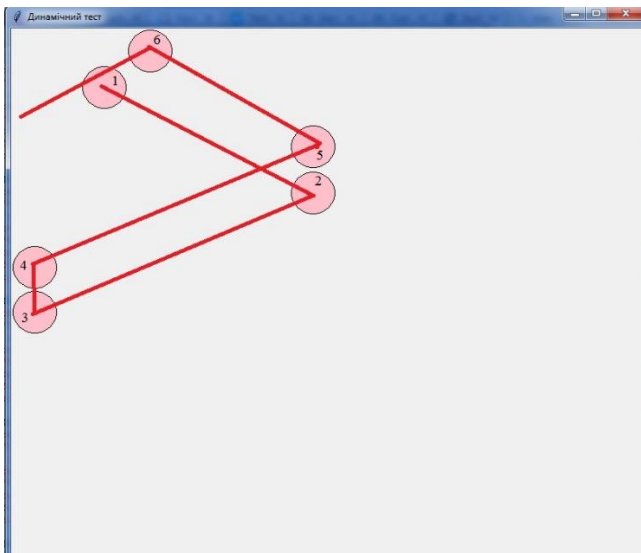
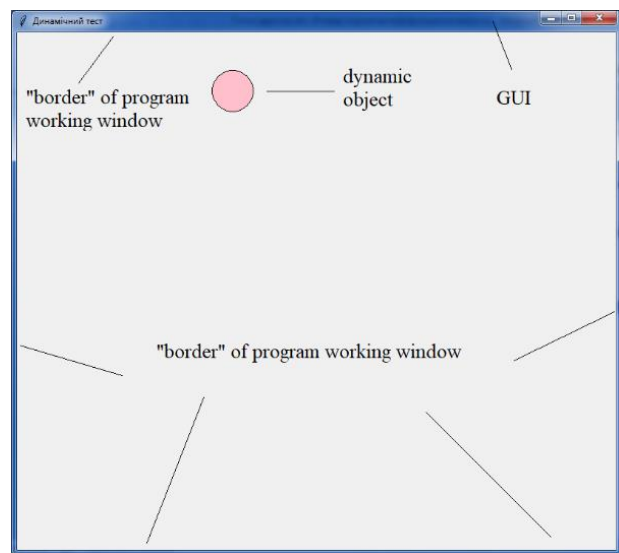


Fig. 3. Symbol for the example of programmed object movement during testing



a



b

Fig. 4. The trajectory of the object (a) and the appearance of the graphical interface of the developed software for testing (b)

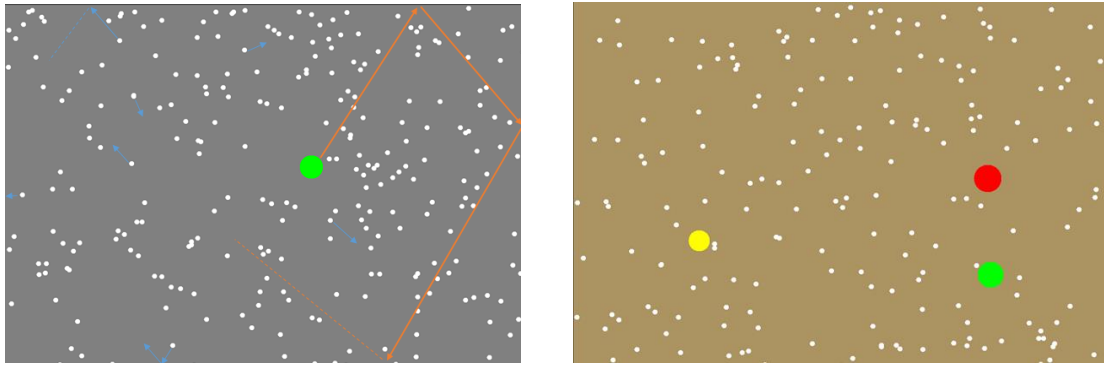
For the purpose of additional studies, about 100 variations of dynamic tests with "obstacles" were developed to analyze the concentration of attention and the degree of freedom of movement of the brush (fig. 5). The movement vector of a figure in the Cartesian coordinate system starts from the initial (0;0), with a step  $h=5$  pixels and a random velocity of motion  $v(X)$  and

$v(Y)$ , for example, on a segment  $[-5; 5]$  is given by the following expression:

$$\begin{cases} x = x + v(X) \\ y = y + v(Y) \end{cases} \quad (4)$$

The adaptation of the background and the color scheme of the main and auxiliary objects can be adjusted

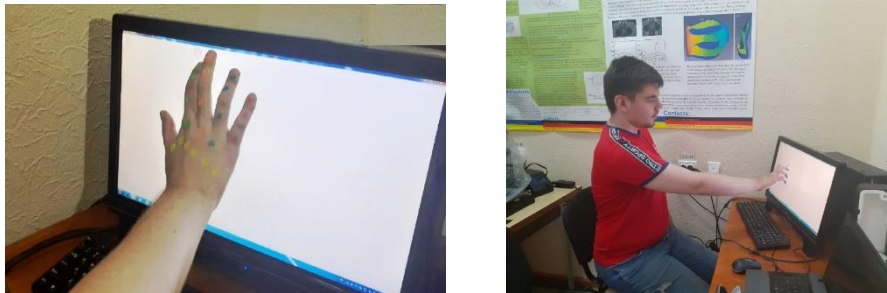
individually for each participant, depending on his color perception and psycho-emotional state.



**Fig. 5.** The appearance of several variants of dynamic test with "obstacles" and conventions of trajectories of objects

The test is considered to have been performed if no deviations from the specified conditions were detected during its repetition of trajectories or touching of the object. If one of the markers of the hand or fingers shows an abnormal deviation from the standard, it may indicate the presence of functional disorders of the hands. The nature of the anomalous movements and the specific marker make it possible to set the type of upper limb movement disorder during video recording in rapid mode and color segmentation. Fig. 6 shows an example of a multisensor screen test performed by a participant in an

experiment in the laboratory of biomedical 3D technologies with adhesive colored markers on the hand. At the study, 32 participants (19 males and 13 females), aged 20–26, voluntarily participated in the first stage of preclinical trials, of which 28 were right-handed and 28 left-handed. In this case, 2 people had signs of carpal tunnel syndrome, as participants reported experiencing wrist pain during prolonged work on various computer manipulators. The results of the survey of participants before the tests were experimentally confirmed.



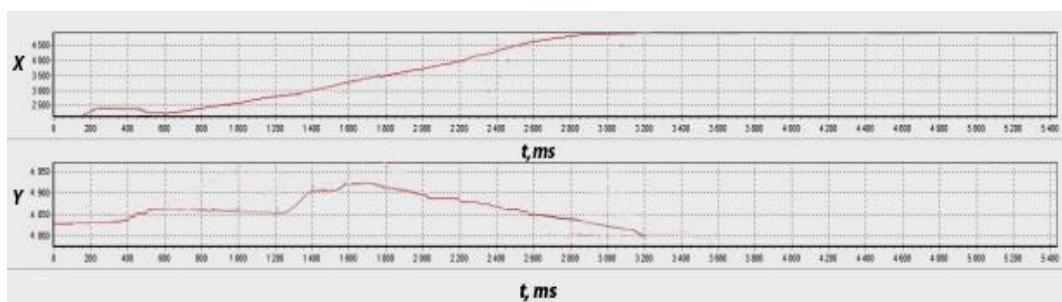
**Fig. 6.** An example of the implementation of the test developed by a participant (co-author of a scientific article) on a multisensory screen in the laboratory of biomedical 3D technologies of the of BME Department

In fig. 7–8 shows the automated analysis of the results of testing the participants in a graphical form on the example of performing one task in the norm and revealed dysfunction of the hand. The first and second graphs show the deviation of the x coordinates and the given trajectory of motion of the dynamic object from the experimental one, calculating the error as:

$$E = \sum_{t=1}^n \sqrt{(\hat{y}_t - y_t)^2 + (\hat{x}_t - x_t)^2}, \quad (5)$$

where  $E$  – integral (cumulative) error; the mean square error (MSE) is calculated as  $MSE = \frac{1}{t} E$ ;

$\hat{y}_t$  i  $\hat{x}_t$  – registered coordinates of the participant's finger while repeating the shape's trajectory at a given time  $t$ ;  $y_t$  i  $x_t$  – given coordinates of the trajectory of motion at a certain point in time  $t$ .



**Fig. 7.** Automated analysis of test results in a graphical form of the test is normal

While observing the tasks of one participant, there were no health factors that could be prerequisites for wrist tunnel syndrome. As can be seen in fig. 8, the test run time is 54 ms, the force of the pressure is gradually changing, the deviation of the coordinates of the given and

experimental trajectories looks like a positive and negative curvilinear dependence. The obtained test data are within the normal range, the inaccuracy of the task is explained by the non-concentration of the participant.

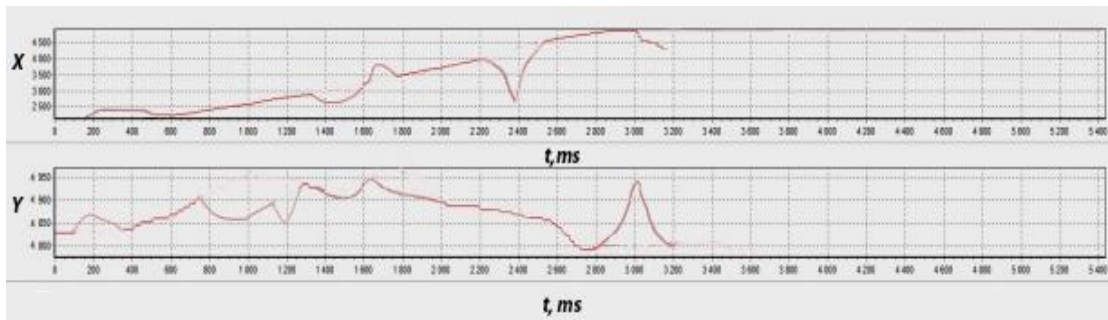


Fig. 8. Automated analysis of test results in graphical test form during functional brush disorder

Fig. 8 shows the nature of the deviation of the coordinates of the trajectories has uncharacteristic "peaks" on the graphs, which indicates the presence of functional disorder during the task.

Using the analysis of the physical parameters of the test participants, the conditional ranges for the norm and functional disorders of the upper extremities corresponding to the data from scientific sources were

calculated [1–13]. Table. 2 lists the basic physical parameters of psychoneurological research.

According to the obtained data, the average experimental dependence of the force of pressure on the touch screen during touching a dynamic object and repeating its trajectory of motion from the time of tasks was constructed (fig. 9)

Table 2. The main physical parameters of the experimental studies

Parameter	Norm	Functional disorders of the hand
Task completion time, In seconds	< 50	> 100
The number of tasks completed correctly (20 is the maximum number of tasks)	> 15	< 7
Deviation of the experimental trajectory length from the specified one, in pixels	< 60	> 100
Force of onslaught of the dominant hand on the touch screen, in N/mm <sup>2</sup>	> 370 < 800	< 200 > 1000

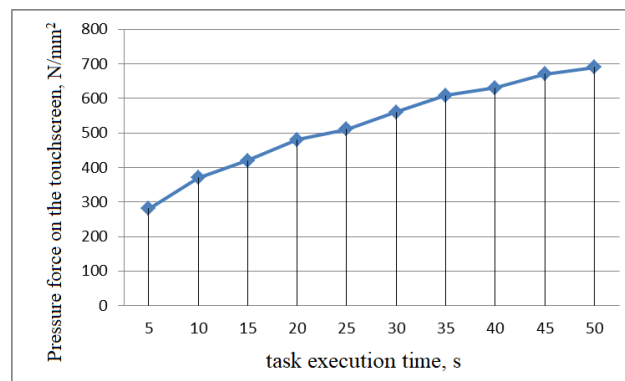


Fig. 9. The average experimental dependence of the pressure of the touch screen on the time of tasks

According to the graph, you can see a direct correlation of the curve, i.e. the increase in the force of the pressure leads to an increase in the time of the test, indicating a gradual fatigue during the perception of the task and decrease the speed of the sensorimotor response or difficulties associated with functional disorders of the hands.

Analysis of the test results showed that in 23 persons (71.88%) of the total number of participants of the

experiment, the values of calculated and registered parameters correspond to the established range of norm, and in 9 (21.13%) the values of indicators have deviations from the norms, of which 2 people (6.25%) had significant abnormalities, which indicated the presence of functional disorders of the hand.

Thus, the main advantages of the developed specialized software for testing on multi-touch screens are:

- non-invasiveness of the research method;
- ease of setup and ease of implementation;
- no need for contact sensors that can be uncomfortable and limit movement, creating additional noise or interference;
- the possibility of flexible adaptation of tests for any age group, taking into account the individual characteristics of fine motor skills and psychomotor skills;
- the ability to integrate the "game form" of tests;
- great space for enhancing and expanding functionality, as well as introducing new authoring ideas to meet new research challenges.

### Conclusions and prospects for further development

1. As a result of the first stage of theoretical and experimental psychoneurological studies, it was found that the optimal technical parameters of multisensory screens are: resolution in the mode of displaying tests not less than 1280x800; minimum number of finger pressure sensitivity levels is 1024; the minimum sizes of the working window of the software - 1024x768; the best resolution of a digital webcam for recording hand movements - 1280x720, which combines the trade-off between price, accuracy and

performance; the pixel brightness of the dynamic test display according to [0... 255] - not less than 28 intensity levels; contrast – not less than 227 levels of intensity; minimum color gamut of tasks - two-color.

2. The data obtained during dynamic testing indicate that in participants with manifestation of fatigue of the muscles of the arm or the presence of painful sensations in the wrist, the speed of the sensorimotor response significantly exceeds the parameters of the established range of norm, and reaches from 120 to 200 ms, which may indicate about the possibility of using this parameter as a diagnostic perspective.

3. A specialized software tool, which has been adapted for multisensor screens, enables the detection of functional disorders of the hand by registering basic physical parameters during testing. Comparison of values of indicators of a conditional norm with values corresponding to different degrees of deviation allows to estimate a psychoneurological condition of the person in dynamics.

The prospect of further research is the conduct of clinical trials on the basis of medical institutions and the introduction of scientific results to improve the diagnostic process in psychoneurology.

### References

1. Bogov, A. A. et al (2014), "Carpal tunnel syndrome", *Practical Medicine*, Vol. 4–2, No. 80, P. 35–40.
2. Aksekili, M. A. (2015), "Comparison of the early postoperative period electrophysiological and clinical findings following carpal tunnel syndrome: is EMG necessary?", *Int J Clin Exp Med*, Vol. 8, No. 4. P. 6267–6271.
3. Bland, J. D. P. (2007), "Treatment of carpal tunnel syndrome", *Muscle Nerve*, Vol. 36, No. 2, P. 167–71.
4. Blazar, P. E. (2015), "Prognostic indicators for recurrent symptoms after a single corticosteroid injection for carpal tunnel syndrome", *J Bone Joint Surg Am*, Vol. 97, No. 7, P.1567–1570.
5. Zaytseva, N. et al (2016), "The diagnostic opportunities of sympathetic skin response in patients with carpal tunnel syndrome", *Journal of the Neurological Sciences*, Vol. 381, P. 270.
6. Belova, N. et al (2016), "Autonomic disturbances in CTS", *2nd 108 Congress of the European Academy of Neurology, Copenhagen: Proceedings of theses*, P. 117.
7. Meshchaninov, S. K., Spivak, V. M., Orlov, A. T. (2015), *Electronic methods and means of biomedical measurements : a tutorial*, K. Chair, 211 p.
8. Asmakov, S. (2010), "Multiplicity of touch displays", *Computer Press*, No. 8, P. 60–67.
9. Mukhin, I. A. (2006), "Touch screens – problem solving", *BROADCASTING: Television and Broadcasting*, No. 7, P. 64–66.
10. Bhalla, M. R., Bhalla, A. V. (2010), "Comparative Study of Various Touchscreen Technologies", *International Journal of Computer Applications*, Vol. 6, No. 8, P. 12–18.
11. Quinnell, R. A. (1995), *Touchscreen Technology*, EDN.
12. Korolchuk, M. S. Krainek, V. M. (2006), *Socio-psychological support of activity in ordinary and extreme conditions*, Kyiv : Nika-Center, 580 p.
13. By general ed. O. P. Mintzera (2010), *Modern methods and means for definition and diagnosis of emotional stress: a monograph*, Vinnytsia : National Technical University, 228 p.
14. Selivanova, K. G. Tymkovich, M. Y., Avrunin, O. G. (2018), "Introduction of multi-touch technology for the implementation of interactive testing in psychoneurology", *XVII International Scientific and Technical Conference "Physical Processes and Fields of Technical and Biological Objects": Conference Proceedings*, Kremenchuk : KRNU, P. 121–122.
15. Lebedev, V. V. Selivanova, K. G. (2019), "Application of multi-touch technology for express estimation of stress level of flight composition of aircraft", *Proceedings of the reports of the Second All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students "Aviation, Industry, Society"*, Kremenchuk, P. 265–266.
16. Selivanova, K. G. et al (2017), "Computer-aided system for interactive psychomotor testing", *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. Proc. of SPIE: Proceedings*, Vol. 10445: 104453B. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2280815>
17. Selivanova, K. G. et al (2019), "Virtual training system for tremor prevention", *Information Technology in Medical Diagnostics II*, P. 9–14.
18. Avrunin, O. G. et al (2015), "The surgical navigation system with optical position determination technology and sources of errors", *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, No. 5 (4), P. 689–696. DOI: <https://doi.org/10.1166/jmih.2015.1444>

**Селіванова Каріна Григорівна** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри біомедичної інженерії, Харків, Україна; email: selivanova\_kg@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1002-0761>.

**Селиванова Карина Григорьевна** – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Харьков, Украина.

**Selivanova Karina** – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

**Аврунін Олег Григорович** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри біомедичної інженерії, Харків, Україна; email: oleh.avrunin@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6312-687X>.

**Аврунин Олег Григорьевич** – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Харьков, Украина.

**Avrunin Oleg** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

**Казимиров Микита Андрійович** – Харківський національний університет радіоелектроніки, студент-магістр кафедри біомедичної інженерії, Харків, Україна; email: kazimirov539@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6447-4622>.

**Казимиров Никита Андреевич** – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, студент-магистр кафедры биомедицинской инженерии, Харьков, Украина.

**Kazimirov Nikita** – Kharkiv National University of Radio Electronics, Master's Degree Student of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

## ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПСИХОНЕВРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВПРОВАДЖЕННЯМ MULTITOUCH-ТЕХНОЛОГІЇ

**Предметом** дослідження статті є процес тестування на мультисенсорних пристроях для реалізації психоневрологічних досліджень. **Метою** роботи є розробка спеціалізованих динамічних тестів з впровадженням Multitouch-технології для виявлення тунельного синдрому зап'ястя та дисфункції кисті на ранніх стадіях захворювання. **Завданнями** роботи є провести теоретичний аналіз із визначення оптимальних параметрів сенсорних пристроїв для реалізації психоневрологічного тестування; на підставі експериментальних досліджень визначити основні фізичні показники результатів тестування, що свідчать про наявність функціональних розладів кисті руки. Постійне користування комп'ютерами, смартфонами, гаджетами передбачає одноманітні багаторазові навантаження на зап'ястя; постійне зорове та нервово-емоційне напруження; сидяче положення тіла; статичне напруження опорно-рухової системи, що викликається необхідністю підтримки робочої пози; зниження загальної рухливої активності. Були використані **методи** комп'ютерного моделювання та візуалізації динамічних тестів із застосуванням мультиплатформенної мови програмування Python. **Результати.** Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів полягає у розробці спеціалізованого програмно-алгоритмічного забезпечення для проведення динамічного тестування на сенсорних пристроях з можливістю відеореєстрації рухів верхніх кінцівок в режимі "рапід". Перевагою цього методу є його неінвазивність, простота реалізації, а також відсутність застосування датчиків, котрі можуть обмежувати рухи. За допомогою рапід-методу можна легко відрізнити патологічний стан рухової активності кисті руки від установленої норми **Висновки.** Розроблений спеціалізований програмний засіб, котрий був адаптований для мультисенсорних екранів, дає змогу виявити функціональні розлади кисті руки за допомогою реєстрації основних фізичних параметрів під час тестування. Динамічні тести пристосовані для будь-якої вікової категорії учасників (пацієнтів), мають додаткові режими для індивідуального кольорового сприйняття та різні рівні складності.

**Ключові слова:** тунельний синдром зап'ястя; дисфункція кисті руки; мультисенсорні пристрої; динамічне тестування; психоневрологія.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПСИХОНЕВРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ВНЕДРЕНИЕМ MULTITOUCH-ТЕХНОЛОГИИ

**Предметом** исследования в статье является процесс тестирования на мультисенсорных устройствах для реализации психоневрологических исследований. **Целью** работы является разработка специализированных динамических тестов с внедрением Multitouch-технологии для выявления туннельного синдрома запястья и дисфункции кисти на ранних стадиях заболевания. **Задачами** работы является провести теоретический анализ по определению оптимальных параметров сенсорных устройств для реализации психоневрологического тестирования; на основании экспериментальных исследований определить основные физические показатели результатов тестирования, свидетельствующие о наличии функциональных расстройств кисти руки. Постоянное использование компьютеров, смартфонов, гаджетов предусматривает одинаковые многократные нагрузки на запястье; постоянное зрительное и нервно-эмоциональное напряжение; сидячее положение тела статическое напряжение опорно-двигательной системы, вызываемое необходимостью поддержания рабочей позы; снижение общей двигательной активности. Были использованы **методы** компьютерного моделирования и визуализации динамических тестов с применением мультиплатформенного языка программирования Python. **Результаты.** Научная новизна и практическое значение полученных результатов заключается в разработке специализированного программно-алгоритмического обеспечения для проведения тестирования на сенсорных устройствах с возможностью видео регистрации

движений верхних конечностей в режиме "рапид". Преимуществом этого метода является его неинвазивность, простота реализации, а также отсутствие применения датчиков, которые могут ограничивать движения. С помощью рапид-метода можно легко отличить патологическое состояние двигательной активности кисти руки от установленной нормы **Выводы.** Было разработано специализированное программное средство, которое адаптировано для мультисенсорных экранов, позволяет выявить функциональные расстройства кисти руки с помощью регистрации основных физических параметров во время тестирования. Динамические тесты приспособлены для любой возрастной категории участников (пациентов), имеют дополнительные режимы для индивидуального цветового восприятия и разные уровни сложности.

**Ключевые слова:** туннельный синдром запястья; дисфункция кисти руки; мультисенсорные устройства; динамическое тестирование; психоневрология.

*Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Селіванова К. Г., Аврунін О. Г., Казиміров М. А. Визначення основних параметрів сенсорних пристроїв для реалізації психоневрологічних досліджень з впровадженням multitouch-технології. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2020. № 1 (11). С. 147–155. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.147>.*

Selivanova, K., Avrunin, O., Kazimirov, N. (2020), "Determination of the basic parameters of sensor devices for the implementation of psychoneurological research with the introduction of multitouch technology", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 147–155. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.147>.

---

R. TRISHCH, O. MALETSKA, O. CHERNIAK, JU. SEMIONOVA, V. JANCIS

## ANALYSIS OF THE REQUIREMENTS OF INTERNATIONAL AND NATIONAL STANDARDS FOR MEASUREMENT METHODS AND METROLOGICAL EQUIPMENT

The **subject** of research in the article are methods and means of measurement and testing. The **goal** of the work is to analyze the metrological requirements of the ISO/IEC 17025:2017 standard for equipment and methods used to conduct tests in laboratories to ensure control of the metrological system processes, and to provide information on the practical application of the requirements of this standard, taking into account the provisions of other international standards. The following **tasks** are solved in the article: analysis of the position of international documents containing the requirements to the equipment and test methods for measurement in order to determine their practical implementation; analysis of ISO/IEC 17025:2017 on metrological requirements and proposed ways of implementation of these requirements. The following **methods** are used - analysis method. The following **results** have been obtained: the analysis of international requirements to the equipment, including measuring, testing (measurement) and standardization of these requirements has been carried out to implement the provisions of ISO/IEC 17025:2017. An important factor in the implementation of the standard in Ukraine is that currently there are no national standards that would regulate the general requirements for the use of measuring equipment and assess the accuracy of measurement results. This standard provides general approaches to the use of equipment and accuracy characteristics of the results obtained by appropriate methods. Fulfillment of the requirements of the methodology makes it possible to obtain a reliable result with the required accuracy. **Conclusions:** on the basis of the carried out analysis it is established that ISO/IEC 17025:2017 became a new perspective step towards application of metrological requirements to means and methods of testing and measurements defined by various other international documents in the field of metrology; the standard is a fundamental, in fact, reference book for metrologists on organization of work on assurance of reliability of measurement results and tests at the enterprise; assurance of conformity to the requirements of the international standard provides customers with confidence in the results of measurements.

**Keywords:** validation; verification; measurement; measuring equipment; reliability of the results; measurement technique; metrology.

### Introduction

DSTU International Standard ISO/IEC 17025 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories" [1], which sets out the general requirements for the competence of testing laboratories, known in Ukraine for many years. However, at the end of 2017, international standards organizations - ISO and IES – have announced a new version of this standard. However, in this article, the authors pay particular attention to the implementation of metrological requirements, first of all, to measurement techniques and equipment. The application of the new edition in 2018-2019 in Ukraine showed that more attention should be paid to the correct implementation of metrological requirements, because they directly affect the solution of the main task set by this standard - ensuring the reliability of the results of tests and measurements obtained in the laboratory.

SSTU International Standard ISO / IEC 17025 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories" [1], which sets out the general requirements for the competence of testing laboratories, known in Ukraine for many years. However, at the end of 2017, international standards organizations - ISO and IES - have announced a new version of this standard. However, in this article, the authors pay particular attention to the implementation of metrological requirements, first of all, to measurement techniques and equipment. The application of the new edition in 2018-2019 in Ukraine showed that more attention should be paid to the correct implementation of metrological requirements, because they directly affect the solution of

the main task set by this standard - ensuring the reliability of the results of tests and measurements obtained in the laboratory.

In the new version of this International Standard, requirements for equipment and test methods (measurements) are different from those in previous versions. This article summarizes the results of the analysis on metrological requirements and suggests ways to implement these requirements.

### Analysis of the problem and existing methods

Since the introduction of ISO / IEC 17025: 2005 [3] in Ukraine, accredited testing laboratories have focused on the fact that the measurement criterion is the measurement uncertainty. However, the new version of this standard provides for the assessment and measurement of the different quantitative characteristics provided for by other international standards for measuring accuracy. This is a significant step forward in ensuring that the measurement results are accurate because the value of measurement uncertainty in the laboratory result did not contribute to confidence in the result. This is justified by the lack of standardized methods for determining the uncertainty of the target, the absence of generally accepted equations of measurement for the given measurement task, the unproven determination of the uncertainty of type B, etc. However, there are a considerable number of international standards that describe other methods of controlling the accuracy of measurement results. Analysis of the implementation of the provisions and prospects of ISO/IEC 17025: 2017 dedicated to the work of foreign researchers [4–7].

The purpose of the work is to analyze the metrological requirements of the standard [1] for the equipment and methods used for testing in laboratories and to provide information on the practical application of the requirements of this standard, taking into account the provisions of other international standards.

### Solving the problem

#### Analysis of equipment requirements by international and national standards.

Let us analyze the requirements of ISO / IEC 17025: 2017 [1] and its translation into Ukrainian [2], to equipment. The term "equipment" and not "equipment" or "equipment" used in previous revisions of ISO / IEC 17025 should be noted "and the general term by which these two types of equipment were referred to was" equipment". Which was not consistent enough.

Paragraph 6.4.1 of the standard specifies that "the laboratory must have access to the equipment (including, but not limited to, measuring instruments, software, standards, standard samples, standard reference data, reagents, supplies or accessories) required for the proper implementation of the laboratory and what may affect the results". However, the incorrect term "measuring instrument" has been used. Incorrect because the term "measuring instrument" is used in the original. When referring to the International Metrology Dictionary (VIM) [8], this term corresponds to the terms "measuring equipment means" or "measuring equipment" (see SSTU ISO 10012 [9]). Hereinafter referred to as the NAAU translation, the term "measuring equipment".

The requirement to inspect the equipment for compliance with the specified regulations before commissioning or putting it back into service complies with previous versions of the standard. However, the 2017 edition clearly states that the equipment used for the measurement must provide the measurement accuracy and / or measurement uncertainty required to ensure the accuracy of the result. And this should be understood as follows: it is recognized that measuring instruments (measuring equipment) have a basic metrological characteristic – an error. And this is confirmed by the EU directives on measuring equipment in the "essential requirements" sections, which specify the need for the manufacturer of the measuring equipment to establish the maximum permissible error. Based on the use of the term "accuracy" for measuring equipment, which is a qualitative assessment, and quantitatively for measuring equipment is characterized by its error - accuracy class or maximum permissible error.

Attention should be drawn to the definition of an "accuracy class" in the international dictionary [8], a class of measuring instruments or measuring systems that satisfies the metrological requirements necessary to maintain measurement errors or instrumental uncertainties within specified limits under specified operating conditions. The maximum permissible error sets the maximum error limits for the measuring equipment. The characteristics and designation of accuracy classes of measuring equipment by its categories are defined in the

recommendation of the International Organization of Legal Metrology OIML R 34 [11].

Paragraph 6.4.6 specifies the requirement for calibration of measuring equipment. Measuring instruments must be calibrated if:

- measurement accuracy or measurement uncertainty affects the accuracy of the results obtained, and/or
- calibration of equipment is necessary to establish the metrological traceability of the obtained results.

According to Resolution 11 of the 22nd General Conference on Weights and Measures "Communication between national metrology institutes and national (recognized) accreditation bodies", FTA calibration is not a conformity assessment. The question then arises as to why calibration of measuring equipment is used in conformity assessment rather than calibration. The calibration involves the conformity of metrological characteristics of the measuring equipment with the requirements set to it, and the calibration does not provide this.

Remaining in ISO/IEC 17025: 2017 such an important requirement as metrological traceability, namely "6.5.1. The laboratory shall establish and maintain metrological traceability of the measurement results using a documented non-breaking calibration circuit, each contributing to measurement uncertainty. them with the appropriate standard".

The revision of ISO / IEC 17025: 2017 establishes rules for handling non-measuring equipment. For such equipment (testing and auxiliary) the word "verification" was applied, which in Ukraine was carried out as attestation - verification of compliance with the equipment installed to the requirements.

According to ISO/IEC 17000 [10] (implemented in Ukraine as DSTU ISO/IEC 17000: 2007 "Conformity Assessment. Glossary of Terms and General Principles") a test means the determination of one or more characteristics of an object of conformity assessment in accordance with a defined procedure. During the tests the following can be applied:

- technical means having accuracy characteristics;
- technical means that do not have precise characteristics;
- measuring equipment having metrological characteristics;
- indicators - devices or substances that indicate the occurrence of a phenomenon, body or substance in the event of exceeding a specified value.

The type of technical equipment used depends on the purpose and the procedure for determining the characteristics of the conformity assessment object.

In Ukraine, experts distinguish between "test equipment" and "measuring equipment". Testing equipment is used to reproduce the test conditions, that is, technical means that in some way affect the object of research over the required time. Measuring techniques are used to perform measurements, that is, by which they implement the process of experimentally determining one or more values of a value that can reasonably be assigned to that value. The term "measuring instruments" according to ISO 10012: 2003 [9] (introduced in Ukraine as SSTU

ISO 10012: 2005 "Measurement Control Systems. Requirements for Measurement Processes and Measurement Equipment") now corresponds to the international term "measuring equipment". The term "measuring equipment" is also used in the translation of SSTU ISO/IEC 17025: 2017 [2].

Concerning the identity of the terms, then:

- according to VIM [8], the definition of "measuring instruments" indicates the following: "a device used for measurements, only one or in combination with one or more devices";

- in accordance with ISO 10012 [9], the definition of the term "measuring equipment" - measuring instrument, software, standard unit of physical quantity, standard sample, or auxiliary devices or combinations thereof necessary to perform the measurement process.

From the point of view of risk-oriented thinking, the main risk when using measuring equipment is to exceed the maximum permissible error of a particular tool or the required uncertainty of its calibration. However, at this time the issue of setting a target (regulated for a specific measurement task) measurement uncertainty is not addressed.

Clause 6.4.6 of the discussed standard [1] specifies the requirement for calibration of measuring equipment. Measuring instruments must be calibrated if:

- measurement accuracy or measurement uncertainty affects the accuracy of the results obtained, and / or
- calibration of equipment is necessary to establish the metrological traceability of the obtained results.

The estimation of measurement uncertainty during calibration is regulated in EA-4/02 [12].

The new version of the standard establishes rules for handling non-measuring equipment. For such equipment (testing and auxiliary) the word "verification" was applied, which in Ukraine was performed as a certification - a check for compliance with the established requirements for the equipment. That is, the term "testing of test equipment" can be used at this time.

#### **Analysis of requirements for test and measurement methods according to international and national standards.**

The reliability of the test results depends not only on the correct use of the equipment, but on the methods by which these tests are conducted.

Let's consider the concept of "methodology" in relation to testing and measurement. At the international level, techniques are commonly referred to as procedures. The International Metrology Dictionary [8] provides the following definition of a measurement procedure: a detailed description of measurement in accordance with one or more measurement principles and a measurement method that is based on the measurement model and contains a calculation to obtain the measurement result. This definition does not contradict the definition of "measurement technique" adopted in Ukraine: a document containing a set of operations and rules whose implementation ensures that the measurement result is obtained with established accuracy.

According to VIM [8]:

- the principle of measurement – a phenomenon that serves as a basis for measurement (a phenomenon can be physical, chemical or biological in nature);

- measurement method – a general description of the logical sequence of operations used during measurements (for example, the direct measurement method);

- measurement model – mathematical relation between all quantities that are related to measurement);

- accuracy – the closeness between the measured value of the value and the true value of the measured value.

The notion of "measurement accuracy" is not a quantity and therefore is not given in the form of a numerical value. Measurement is more accurate when it has less measurement error. More accurate measurements must be made, or it is sufficient to obtain the measurement result with less accuracy. That is, accuracy is a qualitative indicator, in quantitative terms it can be expressed by other quantitative indicators.

The test also applies the concept of "test accuracy". In this case, accuracy is characterized by an accuracy characteristic or an established tolerance for the test result. Accurate test performance is, for example, an error in setting the temperature in a drying cabinet or the tolerance to the value of the relevant product parameter being tested..

The requirements of the standard [1,2] for the methods are set out in section 7.2 "Selection, verification and validation of methods".

The laboratory should use acceptable methods and procedures to carry out the entire activity (ie measurements and tests in the field of activity). The text of this standard defines that the term "method" as used in the original of this document may be considered synonymous with the term "measurement procedure" (i.e. test/measurement technique) as defined in the dictionary. [8].

The status of test/measurement techniques in ISO / IEC 17025: 2017 Section 7.2 is as follows:

- (1) all methods, procedures and supporting documentation, such as instructions, standards, guidelines and background data related to the activities of the laboratory, should be kept up-to-date and accessible to staff;

- 2) the laboratory must ensure that it uses the latest valid version of the method, except where it is inappropriate or impossible;

- 3) where necessary, the application of the method should be supplemented by additional information to ensure consistent application;

- 4) techniques developed by the laboratory.

Unfortunately, in ISO / IEC 17025: 2017 the term "standardized methodology" does not apply in clause 7.2.1.4, but hereinafter it is used. However, it is confirmed that techniques published in international, regional or national standards, or published by reputable technical organizations, or published in relevant scientific literature or journals, or those specified by the manufacturer of the equipment, are recommended (ie standardized). It has also been confirmed that techniques developed and modified by the laboratory can also be used.

A positive aspect of the new version of the standard is the clear definition of the application of the terms "verification" and "validation" to test and measurement methods. Verification means providing objective evidence that an entity meets the above requirements. As for the test facility, both the measurement method and the test method are subject.

Verifications are subject to standardized (recommended) techniques that apply to their scope. The laboratory should check that its specialists can properly perform the methods before their introduction by demonstrating that the desired performance can be achieved - the reliability of the measurement (test) result. Records of verification of methodologies should be kept in the laboratory. The verification procedure for standardized methods should be performed by all testing (measuring) laboratories, and not only by accredited ones, as this is evidence of the quality assurance of the laboratory work.

The laboratory should validate:

- non-standard methods;
- techniques developed by the laboratory;
- standardized techniques that are used other than as provided or modified.

Validation is the verification that these requirements are appropriate for the intended use. Thus, during the validation of the methodology, the laboratory confirms its suitability for use.

Validation should be as extensive as is necessary to meet the needs of the application or scope. The techniques used to validate the method can be one or a combination of the following:

- measurement bias and precision estimation using standard samples;
- systematic evaluation of the factors that influence the result;
- checking the stability of the method by changing adjustable parameters such as incubator temperature, dose volume;
- comparison with results obtained by other validated methods;
- interlaboratory comparisons;
- estimation of uncertainty of measurement results on the basis of understanding of theoretical principles of method and practical experience of work on sampling or test method.

The laboratory must determine the accuracy of the measurements. However, not only accuracy is estimated by uncertainty. The measurement uncertainty requirement is defined where appropriate. It is very important from the point of view of practical application of the techniques that the main requirement for the performance characteristics of the validated methods is compliance with the needs of the customers and compatibility with certain requirements. This means that not only uncertainty can characterize measurement accuracy, as defined in previous versions of the standard, and is contrary to many other international standards that govern measurement accuracy requirements.

International standard [1] provides that performance may include, but is not limited to, measurement range,

measurement error, measurement uncertainty, detection limit, quantification limit, method selectivity, linearity, repeatability or reproducibility, resistance to external influences, or cross-sensitivity to the influence of the sample matrix or test object and measurement offset.

Therefore, when developing techniques in the laboratory, those performance characteristics that are appropriate to its scope can be selected.

This also indicates that different performance characteristics can be applied in standardized methods. And then there is the question - what is the need to evaluate measurement uncertainty if the reliability of the result is provided by other characteristics of the accuracy of the result.

For the evaluation of many of the characteristics proposed in the standard [1, 2], the provisions of ISO 5725 [13–18] should be used. The authors of the article [19] described in detail the working characteristics of the methods.

It is advisable to clarify what characteristics quantify the notion of "measurement accuracy" in test and measurement methods:

- measurement error – normalized maximum permissible error; attributed an error at a confidence probability of 0.95;

- measurement uncertainty – target (set maximum allowed value); laboratory definitive (own) measurement uncertainty;

- correctness – systematic error, offset from the reference value;

- Precision – random error, repeatability and reproducibility.

For practical use in testing laboratories, it is advisable to use the characteristics of techniques such as the limit of tolerance of the results of two measurements, carried out in parallel or quickly in succession, in repeatability and reproducibility conditions (see SSTU GOST ISO 5725-6 [18]). To determine these characteristics, it is necessary to conduct experimental studies, namely  $n$  independent observations, which should be at least 10. Based on the obtained values to determine the experimental mean-square deviation of the mean by the formula (1):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ar})^2}{n(n-1)}}, \quad (1)$$

where  $x_i$  – results of  $n$  independent observations;  $x_{ar}$  – arithmetic mean of  $n$  independent observations.

It should be noted that the results of the experimental studies and the determined experimental mean-square deviation of the mean can be determined:

- standard uncertainty of measurements according to type A by formula (1);

- the random component of the measurement error according to the formula (1);

- the margin of tolerance of the results of two measurements, carried out in parallel or carried out rapidly in series, in terms of the repetition of the formula (2):

$$r = 2,77 \sigma, \quad (2)$$

where  $\sigma$  – experimental mean squared deviation of the mean determined by the formula (1).

The coefficient 2.8 can be used instead of the coefficient 2.77. The concept of "fast sequentially performed in repeatability" is interpreted as conducting independent observations over a time during which the measured value will not change compared to its condition at the first observation.

Determination for the test and measurement methods of the limit of tolerance of the results of two measurements in the conditions of repeatability enables the laboratory to control the reliability of the obtained result during measurements and tests.

### Conclusions

Based on the analysis, it should be noted that:

### References

1. ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. available at : <https://www.iso.org/ru/standard/66912.html> (last accessed: 30.01.2020).
2. NAAU Management System "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (in accordance with ISO/IEC 17025:2017)" [Systema upravlinnja NAAU «Zaghaljni vymoghy do kompetentnosti vyprobuvaljnykh ta kalibruvaljnykh laboratorij (vidpovidno do ISO/IEC 17025:2017)], available at : [http://www.aviator.nau.edu.ua/metrology/npd/DSTU\\_ISO-IEC-17025\\_2017.pdf](http://www.aviator.nau.edu.ua/metrology/npd/DSTU_ISO-IEC-17025_2017.pdf) (last accessed: 30.01.2020).
3. ISO/IEC 17025:2005 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, available at : <https://www.iso.org/ru/standard/39883.html> (last accessed: 30.01.2020).
4. Ghernaout, D., Aichouni, M., Alghamdi, A. (2018), "Overlapping ISO/IEC 17025:2017 into Big Data: A Review and Perspectives", *International Journal of Science and Qualitative Analysis.*, Vol. 4, No. 3, P. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ij.sqa.20180403.14>
5. Habibie, M., Kresiani, H. (2019), "Implementation of PDCA Cycle in Calibration and Testing Laboratory Based on ISO/IEC 17025:2017", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 598, P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/598/1/012108>
6. Al-mijrab, A. S. A., Elgharib, M. E., Al-Griw, M. A. (2019). "Critical Success Factors of ISO/IEC 17025 Implementation within Arabic Countries: A Case Study of Libyan Research Centres and Laboratories (LRCL)", *ST-6: TQ e-Learning Practices in Industries*, No. 6 (6), P. 1–6.
7. Putri, Z. T., Fahma, F., Sutopo, W., Zakaria, R. (2019), "A Framework to Measure Readiness Level of Laboratory for Implementing ISO/IEC 17025: A Case Study", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 495, P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/495/1/012011>
8. ISO/IEC Guide 99:2007 International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), available at : <https://www.iso.org/ru/standard/45324.html> (last accessed: 30.01.2020).
9. ISO 10012:2003 Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measuring equipment, available at : <https://www.iso.org/standard/26033.html> (last accessed: 30.01.2020).
10. ISO/IEC 17000:2004 Conformity assessment — Vocabulary and general principles, available at : <https://www.iso.org/ru/standard/29316.html> (last accessed: 30.01.2020).
11. OIML R 34. Recommendation. Edition 1979 (E). Accuracy classes of measuring instruments, available at : [https://www.oiml.org/en/files/pdf\\_r/r034-e79.pdf](https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r034-e79.pdf) (last accessed: 30.01.2020).
12. EA-4/02 M: 2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, available at : <https://european-accreditation.org/wp-content/uploads/2018/10/ea-4-02-m-rev01-september-2013.pdf> (last accessed: 30.01.2020).
13. ISO 5725-1:1998 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1: General principles and definitions, available at : <https://www.iso.org/standard/29779.html> (last accessed: 30.01.2020).
14. ISO 5725-2:1998 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method, available at : <https://www.iso.org/standard/11834.html> (last accessed: 30.01.2020).
15. ISO 5725-3:1998 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method, available at : <https://www.iso.org/standard/11835.html> (last accessed: 30.01.2020).
16. ISO 5725-4:1998 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 4: Basic methods for the determination of the trueness of a standard measurement method, available at : <https://www.iso.org/ru/standard/11836.html> (last accessed: 30.01.2020).
17. ISO 5725-5:1998 Part Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. 5: Alternative methods for the determination of the precision of a standard measurement method, available at : <https://www.iso.org/standard/1384.html> (last accessed: 30.01.2020).
18. ISO 5725-6:1998 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 6: Use in practice of accuracy values, available at : <https://www.iso.org/standard/11837.html> (last accessed: 30.01.2020).

- ISO / IEC 17025: 2017 has become a new promising step towards the application of metrological requirements to the means and test and measurement methods identified by various other international metrology documents;

- this standard is fundamental, essentially a guide for metrologists to organize work to ensure the accuracy of measurements and tests at the enterprise;

- ensuring compliance with the requirements of the international standard gives the customers confidence in the results obtained in the laboratory.

Currently, the ISO / IEC 17025: 2017 metrological requirements confirm the variety of means and methods for ensuring the reliability of results, so practical-metrologists, based on analyzing these requirements and professionally determining the feasibility of applying them to a specific measurement task, can ensure the quality control of product parameters at all stages its production.

19. Motalo, V., Chereshevskaya, A. (2018), "Analysis of indicators of quality of measurements" ["Analiz pokaznykiv yakosti vymiriuvan"], *Measuring Equipment and Metrology*, Vol. 79, No. 2, P. 35–41. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtn2018.02.035>

Received 14.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Трищ Роман Михайлович** – доктор технічних наук, професор, Українська інженерно-педагогічна академія, завідувач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації, Харків, Україна; email: [trich\\_@ukr.net](mailto:trich_@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3074-9736>.

**Трищ Роман Михайлович** – доктор технических наук, профессор, Украинская инженерно-педагогическая академия, заведующий кафедрой охраны труда, Харьков, Украина.

**Trishch Roman** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Head of the Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine.

**Малецька Ольга Євгенівна** – кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, старший викладач кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації, Харків, Україна; email: [maletskaolga@ukr.net](mailto:maletskaolga@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5686-5503>.

**Малецкая Ольга Евгеньевна** – кандидат технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, старший преподаватель кафедры охраны труда, стандартизации и сертификации, Харьков, Украина.

**Maletska Olga** – PhD (Engineering Sciences), Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Senior Lecturer of the Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine.

**Черняк Олена Миколаївна** – кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, асистент кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації, Харків, Україна; email: [olena-cherniak@ukr.net](mailto:olena-cherniak@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6167-8809>.

**Черняк Елена Николаевна** – кандидат технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, ассистент кафедры охраны труда, стандартизации и сертификации, Харьков, Украина.

**Cherniak Olena** – PhD (Engineering Sciences), Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Assistant of the Department of Labour Safety, Standardization and Certification, Kharkiv, Ukraine.

**Семенова Юлія** – Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса, аспірантка, Вільнюс, Литва; email: [julija.semionova@gmail.com](mailto:julija.semionova@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6463-8458>.

**Семёнова Юлия** – Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса, аспирантка, Вильнюс, Литва.

**Semionova Julija** – Vilnius Gediminas Technical University, graduate student, Vilnius, Lithuania.

**Дженсіс Владислав** – Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса, аспірант, Вільнюс, Литва; email: [vladislovas.jancis@gmail.com](mailto:vladislovas.jancis@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2712-7453>.

**Дженсис Владислав** – Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса, аспирант, Вильнюс, Литва.

**Jancis Vladislav** – Vilnius Gediminas Technical University, graduate student; Vilnius, Lithuania.

## АНАЛІЗ ВИМОГ МІЖНАРОДНИХ ТА НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ ДО МЕТОДИК ВИМІРЮВАННЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

**Предметом** дослідження в статті є методи та засоби вимірювання та випробувань. **Мета** роботи – проведення аналізу метрологічних вимог стандарту ISO/IEC 17025:2017 до обладнання та методик, за якими проводяться випробування в лабораторіях для забезпечення управління процесами метрологічної системи, та надання інформації щодо застосування на практиці вимог цього стандарту із урахуванням положень інших міжнародних стандартів. В статті вирішуються наступні **завдання**: аналіз положення міжнародних документів, які містять вимоги до обладнання та методик випробувань до проведення вимірювань з метою визначення їх доцільної практичної реалізації; аналіз ISO/IEC 17025:2017 щодо метрологічних вимог та запропонування шляхів реалізації цих вимог. Використовуються такі **методи**: метод аналізу. Отримано наступні **результати**: проведено аналіз міжнародних вимог до обладнання, у тому числі до вимірювального, методик випробувань (вимірювань) та нормування цих вимог з метою реалізації положень ISO/IEC 17025:2017. Важливим фактором впровадження стандарту в Україні є те, що на цей час відсутні національні стандарти, які б регламентували загальні вимоги до використання засобів вимірювальної техніки та оцінки точності результатів вимірювання. В стандарті, що розглядається, надані загальні підходи до використання обладнання та характеристик точності результатів, одержаних за відповідними методиками. Виконання вимог методики дає можливість одержати достовірний результат з необхідною точністю. **Висновки**: на підставі проведеного аналізу визначено, що ISO/IEC 17025:2017 став новим перспективним кроком до застосування метрологічних вимог до засобів та методик випробувань та вимірювань, визначених різними іншими міжнародними документами в галузі метрології; стандарт є основоположним, по суті довідником для метрологів щодо організації роботи із забезпечення достовірності результатів вимірювань та випробувань на підприємстві; забезпечення відповідності вимогам міжнародного стандарту надає замовникам довіри до результатів, одержаних у лабораторії.

**Ключові слова**: валідація; верифікація; вимірювання; вимірювальне обладнання; достовірність результатів; методики вимірювань; метрологія.

## АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ МЕЖДУНАРОДНЫХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ К МЕТОДИКАМ ИЗМЕРЕНИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Предметом** исследования в статье являются методы и средства измерения и испытаний. **Цель** работы – проведение анализа метрологических требований стандарта ISO/IEC 17025:2017 к оборудованию и методикам, по которым проводятся испытания в лабораториях для обеспечения управления процессами метрологической системы, и предоставление информации по применению на практике требований этого стандарта с учетом положений других международных стандартов. В статье решаются следующие **задачи**: анализ положения международных документов, содержащих требования к оборудованию и методикам испытаний к проведению измерений с целью определения их целесообразной практической реализации; анализ ISO/IEC 17025:2017 по метрологическим требованиям и предлагаемых путей реализации этих требований. Используются следующие **методы**: метод системного анализа. Получены следующие **результаты**: проведен анализ международных требований к оборудованию, в том числе к измерительному, методикам испытаний (измерений) и нормирования этих требований с целью реализации положений ISO/IEC 17025:2017. Важным фактором внедрения стандарта в Украине является то, что в настоящее время отсутствуют национальные стандарты, которые бы регламентировали общие требования к использованию средств измерительной техники и оценки точности результатов измерения. В рассматриваемом стандарте предоставлены общие подходы к использованию оборудования и характеристик точности результатов, полученных по соответствующим методикам. Выполнение требований методики дает возможность получить достоверный результат с требуемой точностью. **Выводы**: на основании проведенного анализа установлено, что ISO/IEC 17025:2017 стал новым перспективным шагом к применению метрологических требований к средствам и методикам испытаний и измерений, определенных различными другими международными документами в области метрологии; стандарт является основополагающим, по сути справочником для метрологов по организации работы по обеспечению достоверности результатов измерений и испытаний на предприятии; обеспечение соответствия требованиям международного стандарта предоставляет заказчикам доверия к результатам, полученных в лаборатории.

**Ключевые слова**: валидация; верификация; измерения; измерительное оборудование; достоверность результатов; методики измерений; метрология.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Тришч Р. М., Малецька О. Є., Черняк О. М., Семенова Ю., Дженсіс В. Аналіз вимог міжнародних та національних стандартів до методик вимірювання та метрологічного обладнання. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 156–162. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.156>.

Trishch, R., Maletska, O., Cherniak, O., Semionova, Ju., Jancis, V. (2020), "Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 156–162. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.156>.

О. С. ЄРЕМЕНКО, М. О. ЄВДОКИМЕНКО, Б. СЛЕЙМАН

## УДОСКОНАЛЕНА МОДЕЛЬ ШВИДКОЇ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦІЇ З РЕАЛІЗАЦІЄЮ СХЕМИ ЗАХИСТУ ШЛЯХУ ТА ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ В ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ

**Предметом** дослідження в статті є процеси швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності. **Мета** роботи – вдосконалення моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності, яка може бути використана для програмно-конфігурованих мереж. У статті вирішуються наступні **завдання**: вдосконалення та дослідження математичної моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності. Використовуються такі **методи**: теорія графів, теорія масового обслуговування та методи математичного програмування. Отримано наступні **результати**: вдосконалено та досліджено математичну модель швидкої перемаршрутизації, яка завдяки введенню додаткових умов дозволяє реалізувати схему захисту шляху  $1:n$  та пропускну здатність у програмно-конфігурованих мережах. **Висновки**: В рамках запропонованої моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності було вирішено завдання розрахунку множини основних і резервних шляхів, що не перетинаються, яке зводилося до розв'язання оптимізаційної задачі цілочисельного лінійного програмування. Перевагою вдосконаленої моделі є можливість реалізації схем захисту  $1:1, 1:2, \dots, 1:n$  без введення додаткової множини керуючих (маршрутних) змінних, що сприяє зменшенню розмірності оптимізаційної задачі, що розв'язується, та обчислювальної складності її практичної реалізації. Критерій оптимальності маршрутних рішень сприяє формуванню основних і резервних шляхів, що не перетинаються, з максимально високою пропускною здатністю. У цьому випадку шлях з найвищою пропускною здатністю буде відповідати основному шляху, тоді як решта шляхів будуть використовуватися як резервні в порядку зменшення їх пропускної здатності. Загальна кількість обчислених шляхів, що не перетинаються, залежить від обраної схеми надмірності.

**Ключові слова**: програмно-конфігурована мережа; швидка перемаршрутизація; захист шляху; пропускна здатність.

### Вступ

Як відомо, останні декілька років популярність програмно-конфігурованих мереж (Software-Defined Networks, SDN) стрімко зростає. Це обумовлено багатьма перевагами SDN у порівнянні з традиційними телекомунікаційними мережами (ТКМ), особливо з точки зору гнучкості управління для оптимізації мережі та процесів, які в ній протікають [1-4]. Однак, однією з основних проблем як у ТКМ, так і в SDN досі залишаються питання щодо забезпечення відмовостійкості мережі. Виходячи з того, що в SDN здійснюється розподіл площини даних і площини управління, у разі відмови того чи іншого елемента мережі (каналу, вузла, сегмента або цілого шляху) SDN контролер повинен вжити певних заходів для швидкого відновлення передачі уражених потоків пакетів [5-7]. При цьому, кількість і тип таких відмов, а також необхідність реконфігурації та перемаршрутизації потоків пакетів збільшує навантаження на контролери мережі, що так само може призвести до перевантаження самого контролера. З огляду на те, що постійна реконфігурація мережі є досить складним і тривалим завданням, найбільш ефективним є використання механізмів швидкої перемаршрутизації (Fast ReRoute, FRR). Загалом існуючі механізми швидкої перемаршрутизації для мереж IP/MPLS можна перенести на SDN, але в цьому випадку слід враховувати обмеження маршрутних таблиць OpenFlow-комутаторів і складність реалізації FRR [5, 6].

Під час швидкої перемаршрутизації реалізація основних схем захисту мережних елементів від збоїв є ключовою технологічною проблемою при розгортанні

як корпоративних, так і глобальних SDN різних типів [7]. Додатково мультисервісність сучасних мереж вимагає впровадження не лише схем захисту їх топологічних елементів – каналу, вузла, шляху, але й захисту рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS) у мережі в цілому [6, 8]. Для цього основним кроком забезпечення QoS є захист пропускної здатності [9–13] з подальшою перспективою захисту інших показників QoS, таких як середня міжкінцева затримка та прийнятний рівень втрат пакетів [8-10].

Слід зазначити, що рішення, пов'язані з FRR, можуть підтримувати наступні схеми резервування залежно від вимог до відмовостійкості [11, 12]:

- схема  $1+1$ , в якій потік даних передається як основним, так і резервним маршрутами;
- схема  $1:1$ , коли для кожного основного маршруту створюється резервний маршрут, яким дані будуть передані у разі відмови основного шляху;
- схема  $n:1$ , в якій створюється один резервний шлях для  $n$  основних шляхів (facility backup);
- схема  $1:n$ , в якій  $n$  резервних шляхів створюються для одного основного маршруту;
- схема  $n:m$ , яка є найпоширенішим випадком, коли підтримуються  $m$  резервних для  $n$  основних маршрутів.

Треба також зауважити, що досить часто під час реалізації FRR виникає задача розрахунку множини шляхів, що не перетинаються [11, 12, 14–18]. Така постановка задачі відповідає вимогам підвищення відмовостійкості маршрутних рішень, особливо коли потрібен захист шляхів та їх пропускної здатності. Отже, науково-практичне завдання розробки та дослідження моделі Fast ReRoute з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності, яка може бути

використана як в MPLS, так і в SDN, є актуальним. Крім того, запропонована модель повинна забезпечувати масштабованість отриманих рішень і низьку обчислювальну складність її подальшої протокольної реалізації.

### Аналіз існуючих рішень щодо швидкої перемаршрутизації

Аналіз існуючих рішень показав актуальність розробки підходів щодо швидкої перемаршрутизації в напрямку впровадження в SDN [9–13, 19–26]. Загалом сучасні підходи до використання механізмів швидкої перемаршрутизації в SDN при реалізації різних схем захисту елементів мережі, таких як класичні (канал, вузол тощо) і особливі схеми для цього типу мереж, можна розділити на евристичні, графові та поточкові [7, 9–12, 14–18, 26]. Наразі найпоширенішими методами щодо реалізації стратегії FRR є евристичні підходи, а серед схем підвищення відмовостійкості все ще переважає забезпечення локального захисту (каналу, вузла чи контролера). Однак відомо, що найбільш перспективними є поточкові підходи, які, як правило, базуються на оптимізаційній постановці задач маршрутизації, які спрямовані на ефективне використання доступних мережних ресурсів [9–13, 18, 26].

Одним з недоліків існуючих рішень використання швидкої перемаршрутизації у програмно-конфігурованих мережах є те, що реалізація схеми захисту шляху зі схемою надмірності  $1:n$ , як правило, призводить до збільшення в  $n$  разів розмірності оптимізаційної задачі при обчисленні маршрутів [7, 9, 10, 18]. А якщо запропоновано рішення для багатошляхової FRR, то це часто призводить до необхідності формулювання та вирішення нелінійної задачі оптимізації. Ці фактори дуже критично впливають на обчислювальну складність і масштабованість протокольних рішень маршрутизації, які повинні бути централізовано оброблені контролером SDN.

Таким чином, для розробленої моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності, яка може бути основою для перспективних протоколів при впровадженні відмовостійких SDN і гібридних SDN (Hybrid SDN), сформульовано наступні вимоги

- врахування поточної природи трафіка;
- реалізація як класичних схем захисту елементів мережі (канал, вузол, шлях), так і здійснення захисту пропускної здатності мережі;
- лінійність оптимізаційної задачі і масштабоване збільшення її розмірності.

### Модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності

Модель, що представлена в [11] та пропонується для подальшої модифікації, буде використана для обчислення множини основних і резервних маршрутів, що не перетинаються, в умовах реалізації

швидкої перемаршрутизації з орієнтацією на максимальну пропускну здатність шляху.

В межах модифікованої моделі мережна структура описується графом  $G = (R, E)$ , в якому  $R = \{R_i; i = \overline{1, m}\}$  – множина вершин, що представляють маршрутизатори мережі, а  $E = \{E_{i,j}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$  – множина дуг, що представляють канали зв'язку. Нехай кожен  $k$ -й потік пакетів для передачі в мережі асоціюється з низкою функціональних параметрів:  $s_k$  – вузол-відправник;  $d_k$  – вузол-отримувач;  $K$  – множина потоків у мережі ( $k \in K$ ). Крім того, значення  $\phi_{i,j}^k$  відповідає пропускній здатності каналу  $E_{i,j} \in E$ , доступній для  $k$ -го потоку. Також позначимо  $Bw^k$  як вимоги щодо пропускної здатності для  $k$ -го потоку.

В результаті розв'язання задачі обчислення множини основних і резервних шляхів, що не перетинаються, необхідно розрахувати множину змінних  $a_{i,j}^k$ , кожна з яких визначає належність каналу  $E_{i,j} \in E$  до множини обчислених шляхів, що не перетинаються, при передачі  $k$ -го потоку. Кількість керуючих змінних  $a_{i,j}^k$  відповідає добутку  $|K| \cdot |E|$ .

Маршрутні змінні  $a_{i,j}^k$  мають наступні обмеження:

$$a_{i,j}^k \in \{0; 1\}. \quad (1)$$

Також для вузлів відправника та отримувача повинні виконуватися наступні умови [11]:

$$\sum_{j: E_{i,j} \in E} a_{i,j}^k = M^k; k \in K, R_i = s_k; \quad (2)$$

$$\sum_{j: E_{j,i} \in E} a_{j,i}^k = M^k; k \in K, R_i = d_k, \quad (3)$$

де  $M^k$  – ціле число, що характеризує кількість основних і резервних шляхів ( $M^k > 1$ ), що не перетинаються та використовується під час реалізації швидкої перемаршрутизації залежно від обраного типу схеми резервування. При цьому  $M^k$  визначається як:

$$M^k = n + 1, \quad (4)$$

де  $n$  – кількість резервних шляхів, що відносяться до основного шляху відповідно до схеми резервування ( $1:1, 1:2, \dots, 1:n$ ), яку необхідно реалізувати.

Водночас для транзитних вузлів у мережі ( $R_i \neq s_k, d_k$ ) встановлені наступні обмеження [11]:

$$\begin{cases} \sum_{j: E_{i,j} \in E} a_{i,j}^k \leq 1, & k \in K; \\ \sum_{j: E_{j,i} \in E} a_{j,i}^k \leq 1, & k \in K; \\ \sum_{j: E_{i,j} \in E} a_{i,j}^k - \sum_{j: E_{j,i} \in E} a_{j,i}^k = 0, & k \in K. \end{cases} \quad (5)$$

Нехай величина  $\beta$  є нижнім граничним значенням для пропускної здатності каналів, що входять до результуючого рішення FRR. Воно визначає пропускну здатність найменш продуктивного розрахованого маршруту. Тоді слід виконати наступну умову (за аналогією з [11, 18]):

$$a_{i,j}^k \varphi_{i,j} + W(1 - a_{i,j}^k) \geq \beta, \quad (6)$$

де  $W$  – ваговий коефіцієнт, який відповідає значенню пропускної здатності найбільш продуктивного каналу. Тоді умову захисту пропускної здатності мережі можна сформулювати таким чином:

$$\beta \geq Bw^k. \quad (7)$$

Як перший критерій оптимальності рішень задачі FRR було обрано максимум функції:

$$J_1 = \beta. \quad (8)$$

Другий критерій оптимальності маршрутних рішень пов'язаний з максимізацією модифікованої по відношенню до (8) цільової функції:

$$J_2 = c_\beta \beta - c_w \sum_{E_{i,j} \in E} w_{i,j} a_{i,j}^k, \quad (9)$$

де вагові коефіцієнти  $c_\beta$  та  $c_w$  визначають важливість кожного з доданків, які входять до виразу (9).

У першому випадку (8) забезпечується максимізація нижнього граничного значення пропускної здатності кожного з множини розрахованих шляхів – основного та резервних. Якщо обмежитись використанням критерію (8), то найменш продуктивний шлях матиме пропускну здатність, яка дорівнює значенню  $\beta$ . З іншого боку, використання критерію (8) не завжди сприяє отриманню рішення, коли множини розрахованих шляхів утворюють найбільш продуктивні канали зв'язку. Це обумовлено тим, що пропускну здатність маршруту визначає включений до нього канал з найменшою пропускну здатністю.

Тому новизною вдосконаленої моделі є використання другого члена в критерії (9), який вводиться за аналогією до метрик протоколів маршрутизації OSPF та EIGRP для включення в розраховані маршрути каналів з високою пропускну здатністю. Тому пропонується використовувати в цільовій функції (9) вагові коефіцієнти  $w_{i,j} = 10/\varphi_{i,j}$ . Таким чином, завдання обчислення множини найбільш продуктивних основного та резервних шляхів для реалізації швидкої перемаршрутизації зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування (Mixed Integer Linear Programming, MILP) з критерієм (9) за наявності лінійних обмежень (1)–(7), оскільки змінні маршрутизації є булевими, а змінна  $\beta$  – дійсне число. Введені умови (1)–(5) відповідають за реалізацію схеми захисту шляху, а умови (6), (7) – пропускної здатності мережі. Для реалізації обчислення

запропонованої моделі в реальному часі сформульована задача MILP повинна розв'язуватися евристичними методами, наприклад, з використанням алгоритмів оптимізації мурашиної колонії, імітації відпалу, мереж Хопфілда тощо [27–29]. Експериментально встановлено, що вагові коефіцієнти у виразі (9) повинні відповідати такій умові:  $c_\beta \gg c_w$ .

В результаті розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі отримується множина маршрутів, що не перетинаються. З цієї множини маршрут з максимальною пропускну здатністю буде відповідати основному шляху, тоді як решта маршрутів будуть використовуватися як резервні шляхи у порядку зменшення їх пропускної здатності. Кожен з розрахованих маршрутів буде мати необхідну пропускну здатність завдяки забезпеченню виконання умови (7). У загальному випадку сумарна кількість обчислених шляхів залежить від обраної схеми резервування (1:1, 1:2, ..., 1:n).

#### Дослідження та порівняльний аналіз отриманих маршрутних рішень

У процесі дослідження проводилось порівняння маршрутних рішень, які отримувались за допомогою моделі (1)–(7) при використанні критеріїв оптимальності (8) та (9) для різних структур мережі та схем резервування – 1:2 і 1:3. Для прикладу, результати дослідження будуть продемонстровані на структурі мережі, яка наведена на рис. 1. У розривах каналів зв'язку вказані їхні пропускі здатності (1/c).

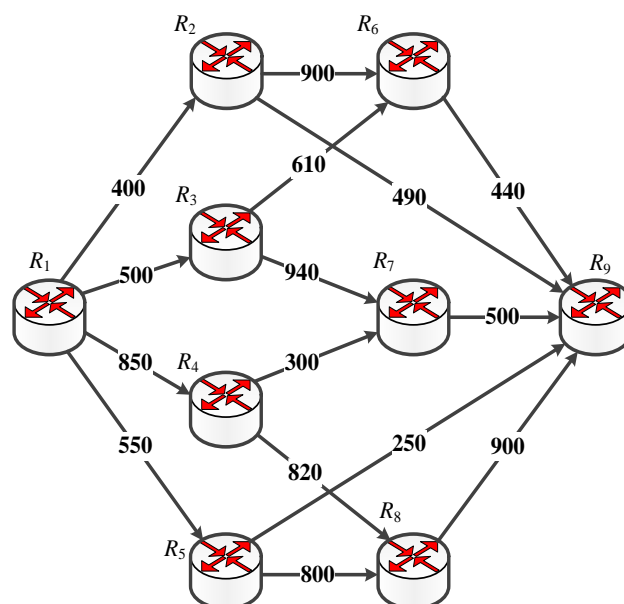


Рис. 1. Вихідна структура мережі

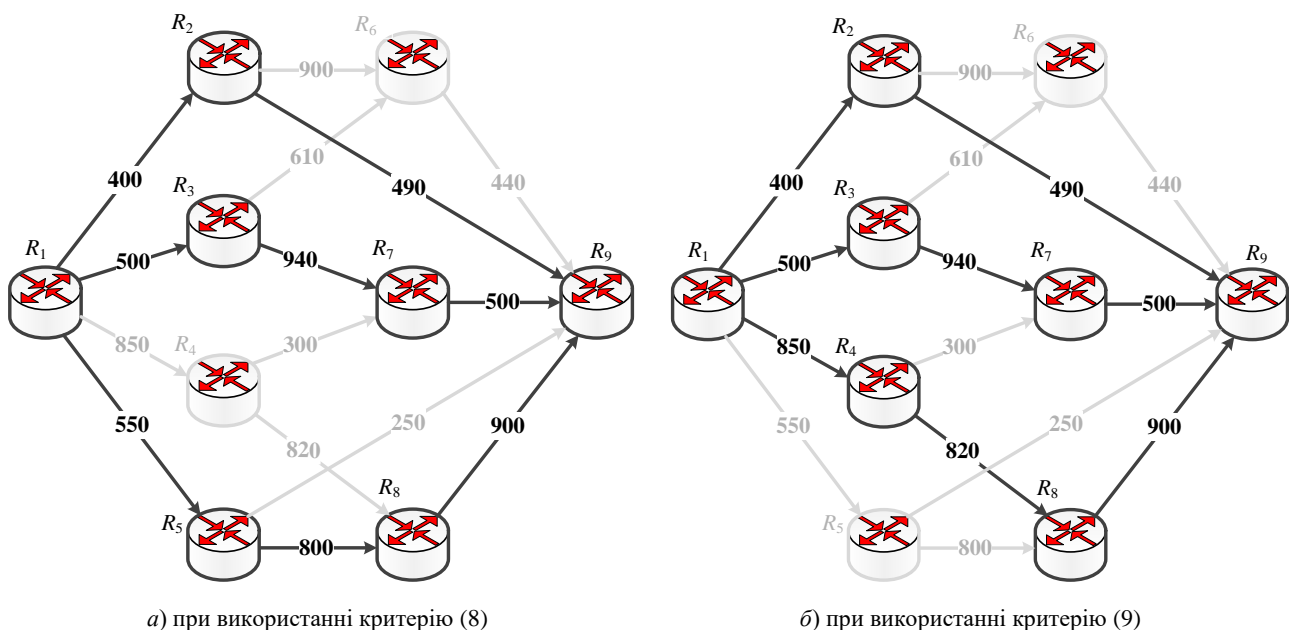
В загальному випадку між першим і дев'ятим маршрутизаторами може бути встановлено вісім маршрутів, які можуть перетинатись за вузлами та/або за каналами. Характеристики цих шляхів наведені в табл. 1.

**Таблиця 1.** Характеристики шляхів між першим і дев'ятим маршрутизаторами для структури мережі, представлені на рис. 1

Номер шляху	Позначення шляху	Множина каналів, що утворюють шлях	Пропускна здатність шляху, 1/с
1	$L_1$	$\{E_{1,2}, E_{2,6}, E_{6,9}\}$	400
2	$L_2$	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400
3	$L_3$	$\{E_{1,3}, E_{3,6}, E_{6,9}\}$	440
4	$L_4$	$\{E_{1,3}, E_{3,7}, E_{7,9}\}$	500
5	$L_5$	$\{E_{1,4}, E_{4,7}, E_{7,9}\}$	300
6	$L_6$	$\{E_{1,4}, E_{4,8}, E_{8,9}\}$	820
7	$L_7$	$\{E_{1,5}, E_{5,9}\}$	250
8	$L_8$	$\{E_{1,5}, E_{5,8}, E_{8,9}\}$	550

Нехай у першому випадку необхідно реалізувати схему резервування 1:2 при передачі пакетів з інтенсивністю  $r=390$  1/с від першого маршрутизатора до дев'ятого. Таким чином, вимоги щодо величини пропускної здатності мережі, яка захищається в процесі швидкої перемаршрутизації, визначається на рівні  $B_w = 390$  1/с. Використання розрахункової моделі (1)-(7) з критерієм оптимальності (8) визначило для реалізації схеми резервування 1:2 три шляхи, які не перетинаються:  $L_2$ ,  $L_4$  та  $L_8$  (рис. 2 а). Кожен з цих шляхів мав пропускну здатність (табл. 1) не меншу за розрахований поріг  $\beta=400$  1/с, тобто умови (6) і (7) виконувались і реалізувалась швидка перемаршрутизація із захистом пропускної здатності мережі. При цьому маршрут  $L_8$  доцільно обрати основним,  $L_4$  – першим резервним, а  $L_2$  – другим резервним шляхом.

резервним шляхом відповідно до зростання їх пропускних здатностей. Використання розрахункової моделі (1)–(7), але вже з критерієм оптимальності (9) визначило для реалізації схеми резервування 1:2 також три шляхи, які не перетинаються:  $L_2$ ,  $L_4$  та  $L_6$  (рис. 2 б). Як і в попередньому випадку кожен з цих шляхів мав пропускну здатність (табл. 1) не меншу за розрахований поріг  $\beta=400$  1/с. При цьому маршрут  $L_6$  доцільно обрати основним,  $L_4$  – першим резервним, а  $L_2$  – другим резервним шляхом. Варто зауважити, що використання критерію оптимальності маршрутичних рішень (9) дозволило обрати основним шляхом значно продуктивніший маршрут  $L_6$  з пропускну здатністю 820 1/с замість  $L_8$  (550 1/с).

**Рис. 2.** Множина шляхів, що не перетинаються, для швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми 1:2

В табл. 2 представлено результати розрахунку шляхів, що не перетинаються, при використанні моделі (1)–(7) та критеріїв оптимальності (8) і (9) для реалізації схеми резервування 1:2. При цьому для кожного з маршрутів вказано середню міжкінцеву затримку пакетів, якщо ним буде протікати потік пакетів з інтенсивністю  $\lambda=390$  1/с. Як показано в табл. 2, використання критерію оптимальності (9) дозволяє забезпечити розрахунок основного та множини резервних шляхів не тільки із заданою пропускну здатністю, але й покращити ще один

ключовий показник якості обслуговування – середню міжкінцеву затримку пакетів. Цей показник у межах проведеного дослідження розраховувався як сума середніх затримок пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів та в каналах зв'язку, що створювали той чи інший маршрут. При цьому робота кожного з інтерфейсів, для прикладу, моделювалась системою масового обслуговування М/М/1, що не впливало на загальність отриманих результатів розрахунків. Так для основного маршруту вдалось знизити середню міжкінцеву затримку пакетів майже на 40%.

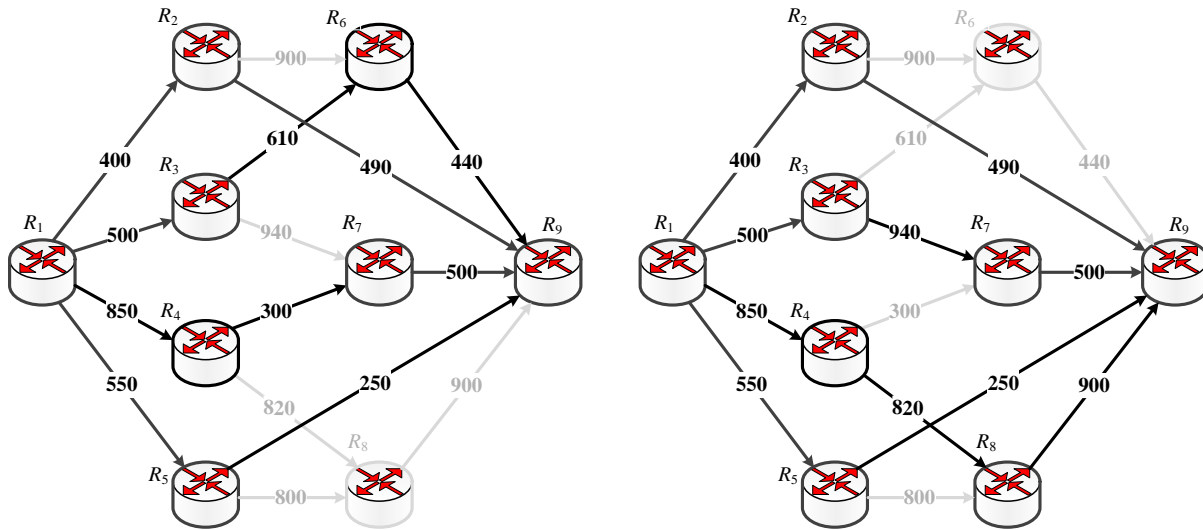
**Таблиця 2.** Результати розрахунку шляхів, що не перетинаються, при використанні моделі (1)–(7) і критеріїв оптимальності (8) і (9) для реалізації схеми резервування 1:2

Розраховані шляхи	Тип шляху	Канали зв'язку, що створюють шлях	Пропускна здатність шляху, 1/с	Середня затримка пакетів вздовж шляху, мс
з використанням критерію оптимальності (8)				
$L_8$	основний	$\{E_{1,5}, E_{5,8}, E_{8,9}\}$	550	10,6
$L_4$	перший резервний	$\{E_{1,3}, E_{3,7}, E_{7,9}\}$	500	20
$L_2$	другий резервний	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400	110
з використанням критерію оптимальності (9)				
$L_6$	основний	$\{E_{1,4}, E_{4,8}, E_{8,9}\}$	820	6,5
$L_4$	перший резервний	$\{E_{1,3}, E_{3,7}, E_{7,9}\}$	500	20
$L_2$	другий резервний	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400	110

Нехай у другому випадку необхідно було реалізувати схему резервування 1:3 при передачі потоку пакетів з інтенсивністю 240 1/с від першого маршрутизатора до дев'ятого. Таким чином, вимоги щодо величини пропускну здатності мережі, яка захищається в процесі швидкої перемаршрутизації, визначалась вже на рівні  $B_w = 240$  1/с. У цьому випадку застосування моделі (1)–(7) з критерієм оптимальності (8) визначило чотири шляхи, що не перетинались:  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_5$  та  $L_7$  (рис. 3 а). Кожен з цих шляхів мав пропускну здатність (табл. 1) не меншу за розрахований поріг  $\beta = 250$  1/с, тобто виконувались умови (6), (7) та реалізувалась швидка перемаршрутизація із захистом пропускну здатності мережі. Виходячи з даних про пропускну здатності цих шляхів, маршрут  $L_3$  доцільно обрати основним,  $L_2$  – першим резервним,  $L_5$  – другим резервним, а  $L_7$  – третім резервним шляхом. Використання критерію оптимальності (9) визначило для реалізації схеми резервування 1:3 також чотири маршрути, що не перетинались:  $L_2$ ,  $L_4$ ,

$L_6$  та  $L_7$  (рис. 3 б). Як і в попередньому випадку, кожен з цих шляхів мав пропускну здатність (табл. 1) не меншу за розрахований поріг  $\beta = 250$  1/с. При цьому маршрут  $L_6$  доцільно обрати основним, а  $L_4$  – першим,  $L_2$  – другим та  $L_7$  – третім резервними шляхами.

Варто зазначити, що для реалізації схеми резервування 1:3 використання критерію оптимальності маршрутичних рішень (9) дозволило обрати не тільки основний, але й перший та другий резервні маршрути, які мали більшу пропускну здатність (табл. 1), аніж у випадку використання критерію (8). Ця перевага також позначилась і на відповідних значеннях середніх міжкінцевих затримок пакетів, які передавались як за основним, так і за більшістю резервних шляхів (табл. 3). Так для основного маршруту вдалось знизити середню міжкінцеву затримку пакетів майже на 57,4%, для першого резервного – на 11,7%, а для другого резервного – на 53,6%.



а) при використанні критерію (8)

б) при використанні критерію (9)

**Рис. 3.** Множина шляхів, що не перетинаються, для швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми 1:3**Таблиця 3.** Результати розрахунку шляхів, що не перетинаються, при використанні моделі (1)-(7) і критеріїв оптимальності (8) і (9) для реалізації схеми резервування 1:3

Розраховані шляхи	Тип шляху	Канали зв'язку, що створюють шлях	Пропускна здатність шляху, 1/с	Середня затримка пакетів вздовж шляху, мс
з використанням критерію оптимальності (8)				
$L_3$	основний	$\{E_{1,3}, E_{3,6}, E_{6,9}\}$	440	11,5
$L_2$	перший резервний	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400	10,3
$L_5$	другий резервний	$\{E_{1,4}, E_{4,7}, E_{7,9}\}$	300	22,2
$L_7$	третій резервний	$\{E_{1,5}, E_{5,9}\}$	250	103,2
з використанням критерію оптимальності (9)				
$L_6$	основний	$\{E_{1,4}, E_{4,8}, E_{8,9}\}$	820	4,9
$L_4$	перший резервний	$\{E_{1,3}, E_{3,7}, E_{7,9}\}$	500	9,1
$L_2$	другий резервний	$\{E_{1,2}, E_{2,9}\}$	400	10,3
$L_7$	третій резервний	$\{E_{1,5}, E_{5,9}\}$	250	103,2

### Висновки

У роботі запропоновано вдосконалення потокової моделі швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху 1:n та його пропускної здатності. Дана математична модель представлена умовами (1)-(7) і (9), що дозволило звести рішення технологічної задачі швидкої перемаршрутизації до розв'язання оптимізаційної задачі змішаного цілочисельного лінійного програмування з модифікованим критерієм оптимальності (9) за наявності лінійних обмежень (1)-(7), оскільки маршрутні змінні (1) – булеві, а нижня

границя пропускної здатності основного та множини резервних маршрутів (7) – дійсне число.

До переваг запропонованої моделі варто віднести те, що реалізація схеми захисту шляху 1:n не призводить до пропорційного збільшення розмірності оптимізаційної задачі у порівнянні з рішеннями, що описані в роботах [7, 9, 10, 18]. Модифікація використаного критерію оптимальності (9) направлена на те, щоб множина розрахованих шляхів (основного та резервних) містила маршрути, які не тільки відповідали вимогам щодо пропускної здатності (7), але й включали в себе найбільш продуктивні канали зв'язку, що позитивно впливало на рівень якості обслуговування, наприклад, за показником середньої

міжкінцевої затримки пакетів (табл. 2 та табл. 3). Оскільки всі розраховані шляхи мали пропускну здатність не гіршу за заданий поріг (7), то шлях, який забезпечував найменше значення середньої міжкінцевої затримки пакетів, обирався основним. Решта маршрутів використовувались як резервні відповідно до схеми захисту 1:n у порядку зростання середньої міжкінцевої затримки пакетів, які передавались вздовж цих шляхів.

Лінійність запропонованої потокової моделі (1)-(7), (9) та зменшення кількості маршрутних змінних (1), які підлягали розрахунку, сприяло зниженню складності її обчислювальної реалізації при практичному використанні як частини програмного

забезпечення маршрутизаторів або SDN-контролерів, на які покладаються функції щодо організації швидкої перемаршрутизації в мережі.

Перспектива подальших досліджень в цій області, перш за все, стосується підтримки багатошляхових стратегій маршрутизації, а також реалізації схем захисту не тільки такого важливого показника якості обслуговування, як пропускну здатність, але й інших QoS-показників – середньої затримки, джитеру, ймовірності втрат пакетів, а також значень показників якості сприйняття (QoE) та мережної безпеки, що особливо актуально при передачі мультимедійного трафіка та конфіденційних даних.

## References

- White, R., Banks, E. (2018), *Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks*, 1st ed., Addison-Wesley Professional, 832 p.
- Blokdyk, G. (2018), *SD-WAN A Complete Guide*, Edition Paperback, 300 p.
- Abd Elazim, N. M., Sobh, M. A., Bahaa-Eldin, A. M. (2018), "Software Defined Networking: Attacks and Countermeasures", in *Proc. 2018 13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, P. 555–567. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCES.2018.8639429>
- Prajapati, A., Sakadasariya, A., Patel, J. (2018), "Software defined network: Future of networking", in *Proc. 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, P. 1351–1354. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399028>
- Kim, T., Nguyen-Duc, T. (2018), "OQR: On-demand QoS Routing without Traffic Engineering in Software Defined Networks", in *Proc. 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*, P. 362–365. DOI: <https://doi.org/10.1109/NETSOFT.2018.8460088>
- Linkov, I. (2019), *Cyber Resilience of Systems and Networks (Risk, Systems and Decisions)*, 1st ed. Kindle Edition, 475 p.
- Rak, J. (2015), *Resilient Routing in Communication Networks*. 1st edition, Springer, 179 p.
- Lemeshko, A. V., Evseeva, O. Yu., Garkusha, S. V. (2014), "Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greater Number of Indices", *Telecommunications and RadioEngineering*, Vol. 73, Issue 15, P. 1339–1360. DOI: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30>
- Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Shapovalova, A., Hailan, A.M., Mersni, A. (2019), "Cyber Resilience Approach Based on Traffic Engineering Fast ReRoute with Policing", in *Proc. 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, P. 117–122. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924294>
- Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O. (2019), "Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunication networks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (9), P. 127–134. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.127>
- Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Sleiman, B. (2019), "Enhanced Solution of the Disjoint Paths Set Calculation for Secure QoS Routing", in *Proc. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, P. 1–4.
- Lemeshko, O., Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Sleiman, B., Hailan, A.M., Mersni, A. (2019), "Computation Method of Disjoint Paths under Maximum Bandwidth Criterion", in *Proc. 3rd IEEE International Conference Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, P. 161–164. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2019.8847756>
- Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Naors, Y. A. A. (2018), "Development of the tensor model of multipath QoE-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, Issue 2 (95), P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141989>
- Chang, Z., Zhao, G., Sun, Y. (2013), "A Calculation Method for The Reliability of a Complex k-out-of-n System," in *Proc. 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE)*, P. 204–207.
- Shi, Y. (2010), "Calculation of Network System Reliability Based on Improved Disjointed Minimal Path Set," in *Proc. 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, P. 1–4.
- Guo, L. (2016), "Efficient approximation algorithms for computing k disjoint constrained shortest paths", *Journal of Combinatorial Optimization*, Vol. 32, Issue 1, P. 144–158.
- Yu, Z., Ni, M., Wang, Z., Huang, H. (2011), "Heuristic algorithm for K-disjoint QoS routing problem. Computational Sciences and Optimization (CSO)", In *Proc. of the Fourth International Joint Conference*, P. 353–356. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSO.2011.145>
- Cruz, P., Gomes, T., Medhi, D. (2014), "A Heuristic for Widest Edge-disjoint Path Pair Lexicographic Optimization," in *Proc. 2014 6th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling (RNDM)*, P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.1109/RNDM.2014.7014925>
- Guck, J. W., Bemtjen, A., Van, Reisslein, M., Kellerer, W. (2018), "Unicast QoS Routing Algorithms for SDN: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 20, No. 1, P. 388–415. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2749760>
- Karakus, M., Duresi, A. (2019), "Quality of Service (QoS) in Software Defined Networking (SDN): A survey", *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 80, P. 200–218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.12.019>

21. Yang, Y., Xu, M., Li, Q. (2018), "Fast Rerouting Against Multi-Link Failures Without Topology Constraint", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 26, No. 1, P. 384–397. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2780852>
22. Strelkovskaya, I., Solovskaya, I., Grygoryeva, T., Paskalenko, S. (2016), "The solution to the problem of the QoS characteristics definition for self-similar traffic serviced by the W/M/1 QS," in *Proc. 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, P. 40-42. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2016.7905330>
23. Hasan, H., Cosmas, J., Zaharis, Z., Lazaridis, P., Khwandah, S. (2016), "Development of FRR mechanism by adopting SDN notion", in *Proc. 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/SOFTCOM.2016.7772133>
24. Lee, K., Kim, M., Kim, H., Chwa, H. S., Lee, J., Shin, I. (2019), "Fault-Resilient Real-Time Communication Using Software-Defined Networking", in *Proc. 2019 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, P. 204-215. DOI: <https://doi.org/10.1109/RTAS.2019.00025>
25. Chen, Y., Zhao, Z. (2018), "Research on Network Performance Optimization and Application of Wireless Intelligent Routing", in *proc. 2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI)*, P. 489-492. DOI: <https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690466>
26. Tipper, D. (2014), "Resilient network design: challenges and future directions. Telecommunication Systems", No. 56 (1), P. 5–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11235-013-9815-x>
27. Mu, C., Zhang, J., Liu, Y. (2019), "Multi-objective ant colony optimization algorithm based on decomposition for community detection in complex networks", *Soft Comput*, P. 12683–12709 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03820-y>
28. Chen, C., Xu, C., Xu, C., Liu, D., Tian, L. (2018), "Trajectory Data Compression Using Hopfield Neural Network", in *Proc. 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, P. 186–190. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSCI46756.2018.00043>
29. Andrade, B. A. R., Ferreira, N. R. (2018), "Simulated annealing and tabu search applied on network reconfiguration in distribution systems", in *Proc. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395757>

Надійшла (Received) 29.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Єременко Олександра Сергіївна** – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: [oleksandra.yeremenko.ua@ieee.org](mailto:oleksandra.yeremenko.ua@ieee.org); ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3721-8188>.

**Єременко Олександра Сергеевна** – доктор технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

**Yeremenko Oleksandra** – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

**Євдокименко Марина Олександрівна** – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: [maryna.yevdokymenko@ieee.org](mailto:maryna.yevdokymenko@ieee.org); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7391-3068>.

**Євдокименко Марина Александровна** – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

**Yevdokymenko Maryna** – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

**Слейман Батуль** – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірантка кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: [sleimanbatoul@hotmail.com](mailto:sleimanbatoul@hotmail.com); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8359-1752>.

**Слейман Батуль** – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирантка кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

**Sleiman Batoul** – Kharkiv National University of Radio Electronics, Graduate Student of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МОДЕЛЬ БЫСТРОЙ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦИИ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ПУТИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ

**Предметом** исследования в статье являются процессы быстрой перемаршрутизации с реализацией схемы защиты пути и пропускной способности. **Цель** работы – усовершенствование модели быстрой перемаршрутизации с реализацией схемы защиты пути и пропускной способности, которая может быть использована для программно-конфигурируемых сетей. В статье решаются следующие **задачи**: усовершенствование и исследование математической модели быстрой перемаршрутизации с реализацией схемы защиты пути и пропускной способности. Используются следующие **методы**: теория графов, теория массового обслуживания и методы математического программирования. Получены следующие **результаты**: усовершенствована и исследована математическая модель быстрой перемаршрутизации, которая благодаря введению дополнительных условий позволяет реализовать схему защиты пути 1:n и пропускной способности в программно-конфигурируемых сетях. **Выводы**: В рамках предложенной модели быстрой перемаршрутизации с реализацией схемы

защиты пути и пропускной способности была решена задача расчета множества основных и резервных непересекающихся путей, которая сводилась к решению оптимизационной задачи целочисленного линейного программирования. Преимуществом усовершенствованной модели является возможность реализации схем защиты 1:1, 1:2, ..., 1:n без введения дополнительного множества управляющих (маршрутных) переменных, что способствует уменьшению размерности решаемой оптимизационной задачи и вычислительной сложности ее практической реализации. Критерий оптимальности маршрутных решений способствует формированию основных и резервных непересекающихся путей с максимальной пропускной способностью. В этом случае путь с наивысшей пропускной способностью будет соответствовать основному пути, тогда как остальные пути будут использоваться как резервные, в порядке уменьшения их пропускной способности. Общее количество рассчитанных непересекающихся путей зависит от выбранной схемы резервирования.

**Ключевые слова:** программно-конфигурируемая сеть; быстрая перемаршрутизация; защита пути; пропускная способность.

## ADVANCED PERFORMANCE-BASED FAST REROUTING MODEL WITH PATH PROTECTION AND ITS BANDWIDTH IN SOFTWARE-DEFINED NETWORK

The **subject** matter of the article is the fast rerouting processes with the implementation of the protection scheme of the path and its bandwidth. The **goal** of the work is to improve the performance-based Fast ReRoute model with the protection scheme of the path and its bandwidth, which can be used for Software-Defined Networks. The following **tasks** are solved in the article: improvement and research of the Fast ReRoute model with the protection scheme of the path and its bandwidth. The following **methods** are used: graph theory, queuing theory, and mathematical programming methods. The following **results** were obtained: Fast ReRoute model was improved and investigated. That allows implementing the 1:n protection scheme of the path and its bandwidth in Software-Defined Networks. **Conclusions:** Within the framework of the proposed Fast ReRoute model with the schemes of the path protection and its bandwidth, the problem of calculating the set of primary and backup disjoint paths was solved. The proposed mathematical model, using the introduction of additional conditions, allowed us to reduce the solution of the technological problem of fast rerouting to the solution of the optimization problem of mixed integer linear programming. The advantage of the improved model is the possibility of implementing protection schemes 1:1, 1:2, ..., 1:n without introducing an additional set of control (routing) variables. This helps to reduce the dimension of the optimization problem to be solved and the computational complexity of its implementation. The optimality criterion of routing solutions contributes to the formation of primary and backup disjoint paths with the maximum bandwidth. In this case, the path with the highest bandwidth will correspond to the primary path, while the remaining paths will be used as a backup, in order to reduce their bandwidth. The total number of calculated disjoint paths depends on the selected redundancy scheme.

**Keywords:** Software-Defined Network; Fast ReRouting; path protection; bandwidth.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Єременко О. С., Євдокименко М. О., Слейман Б. Удосконалена модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності в програмно-конфігурованих мережах. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 163–171. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.163>.

Yeremenko, O., Yevdokymenko, M., Sleiman, B. (2020), "Advanced performance-based Fast ReRouting model with path protection and its bandwidth in Software-Defined Network", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 163–171. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.163>.

V. RUDNYTSKY, M. MOZHAIEV, N. KUCHUK

**METHOD FOR THE DIAGNOSTICS OF SYNCHRONIZATION DISTURBANCES IN THE TELECOMMUNICATIONS NETWORK OF A CRITICAL USED COMPUTER SYSTEM**

**Relevance** of the study. To improve the quality of service (QoS), the work of all network technologies, protocols, and individual traffic management mechanisms is constantly optimized. It is known that the quality of information transmission in modern telecommunication equipment is affected by the quality of synchronization devices. Synchronization is a means of maintaining the operation of all digital equipment in a data transmission network at one average speed, which must exist at three levels: bit synchronization, synchronization at the level of channel intervals (time slot) and frame synchronization. Therefore, the lack of synchronization of the computer system at the required level can lead to a significant decrease in QoS. At the same time, the requirements for ensuring these indicators are significantly tightened in the face of an increase in the load of network resources.

**Subject** of study: computer system synchronization. The **aim** of the article is to develop a method for diagnosing synchronization disturbances in the telecommunications network of a computer system of critical application by increasing the resolution of an acousto-optical spectrum analyzer. Research **results**. The influence of non-stationary data transmission in the telecommunications subsystem of the computer system under study is analyzed. The analysis and classification of the causes of computer network synchronization failure of a critical application computer system is carried out. The article describes the consequences of a violation of computer network stabilization for ensuring the quality of service provided by various frequently used services. Proposed the use of acousto-optic spectrum analyzer with spatial integration for diagnostics of violations of the synchronization network. In work the analysis of the use of acousto-optic spectrum analyzers. The conducted research allowed us to obtain an analytical expression for the output signal of the spectroanalyzer when two rectangular pulses with different carrier frequencies, durations and delay times are received at its input. This result, as well as the numerical calculations provided, allowed us to develop General recommendations for increasing the resolution of the acousto-optical spectrum analyzer, and thus create theoretical prerequisites for improving the synchronization of the computer system. The given analytical relations and numerical estimates were experimentally verified by means of system simulation. **Conclusions**. As a result of the research, a method of diagnostics of synchronization violations in the telecommunications network of a computer system of critical application was proposed. The method is based on increasing the resolution of the measuring system based on an acoustooptic spectrum analyzer.

**Keywords:** computer system; telecommunication network; synchronization; acousto-optic spectrum analyzer.

**The relevance of research**

Expanding the range of information transmission services and improving the quality of service are key trends in the development of the telecommunication network. To improve the quality of service (QoS), the work of all network technologies, protocols, and individual traffic management mechanisms is constantly optimized. It is known that the quality of information transmission in modern telecommunication equipment is affected by the quality of synchronization devices. Therefore, the lack of synchronization of the computer system at the required level can lead to a significant decrease in QoS. At the same time, the requirements for ensuring these indicators are significantly tightened in the face of increased load of network resources. Consequently, the quality of functioning of existing and promising computer systems and networks cannot be improved without taking into account the effects of synchronization and ensuring appropriate synchronization indicators.

**Formulation of the problem**

In the process of transmitting information in a computer system, including a computer data network, there is always a problem of insufficient synchronization, which is caused by various software and hardware factors. Synchronization is a means of maintaining the operation of all digital equipment in a data transmission network at

one average speed, which must exist at three levels: bit synchronization, synchronization at the level of channel intervals (time slot) and frame synchronization. The network clock located in the source node controls the transmission frequency of bits, frames, and channel slots through this node. The secondary network generator located in the receiving node is designed to control the speed of reading information. The purpose of network clock synchronization is the coordinated operation of the primary generator and receiver so that the receiving node can correctly interpret the digital signal. The difference in the synchronization of nodes located on the same network can lead to a skipping or re-reading by the receiving node of information sent to it. Thus, improving the quality of functioning of existing and planned computer systems by increasing the system synchronization indicators is an urgent research task.

**Literature analysis**

Much attention is paid to the study of factors that affect the quality of service (QoS) of computer networks. [3–21]. Studies of the influence of data transmission channel throughput were conducted in [1–4]. The analysis [7, 8] of the influence of the architecture of computer systems and computer networks was carried out in [5–8]. Works [9–14] are devoted to the analysis of packet queues and the development of a comprehensive approach to QoS diagnostics of computer systems and networks. In addition, there is a separate question about the relationship

between QoS indicators and meeting the requirements for computer system transactions [15-20]. In [21], the main parameters of the basic telecommunications network that affect the quality of transaction execution of a computer system are highlighted. In particular, it is shown that when choosing special platforms with centralized management (converged and hyperconverged), synchronization of the computer system plays a significant role. To ensure the required level of synchronization, it is necessary to monitor the stability of the computer system generators [22, 23]. Technical means of such control are presented in [24-27]. In [28], a method for rapid calculation of the jitter value of a telecommunications network is developed based on a method for increasing the resolution of acousto-optical spectroanalysts, which allows for dynamic reconfiguration of network parameters

#### **Aim of the article.**

The aim of the article is to develop a method for diagnosing synchronization disturbances in the telecommunications network of a computer system of critical application by increasing the resolution of an acousto-optical spectrum analyzer.

#### **Types of computer system synchronization**

Bit synchronization consists in the fact that the transmitting and receiving ends of the transmission line operate at the same clock frequency, so the bits are read correctly. To achieve bit synchronization, the receiver can receive its clock from the incoming line. Bit synchronization includes issues such as transmission line jitter and unit density. These issues are raised when requirements for synchronization and transmission systems are presented.

Time slot synchronization connects the receiver and transmitter so that the channel slots can be identified to retrieve data. This is achieved by using a fixed frame format to separate bytes. The main synchronization problems at the channel interval level are frame change time and frame loss detection.

Frame synchronization is caused by the need for phase matching of the transmitter and receiver in such a way that the beginning of the frame can be identified. A frame in a DS1 or E1 signal is a group of bits consisting of twenty-four or thirty bytes (channel slots), respectively, and one frame synchronization pulse. The frame time is 125 microseconds. Channel intervals correspond to users of specific (telephone) communication channels.

The synchronization characteristics in the hierarchical network of the transmitter-receiver are determined by three components: the error of the control generator, the characteristics of the devices that distribute the reference signal, and the characteristics of the generators of the receiver receiving the reference signal through these devices. It is known that the instability of the synchronization frequency of the control generator usually weakly affects the overall instability in the synchronization networks. The timing characteristics are mainly determined by the combination of the characteristics of the distribution devices and the receiver

generator. In real networks, the receiver generator connected to the control generator will operate at a long-term frequency different from the frequency of the control generator. The frequency instability of the receiver oscillator is usually 10–100 times higher than the frequency instability of the control oscillator. Therefore, receiver generators cause most of the synchronization errors and slippage in networks.

For example, if the equipment transmitting information operates at a frequency higher than the frequency of the receiving equipment, then the receiver cannot monitor the flow of information. In this case, the receiver will periodically pass part of the information transmitted to it. Loss of information is called slippage deletion. In the event that the receiver operates at a frequency higher than the frequency of the transmitter, the receiver will duplicate information while continuing to operate at its own frequency and still communicate with the transmitter. This duplication of information is called repetition slippage.

The influence of one or more slippages on the quality of services provided in digital communication networks depends on the type of these services [1-6]. The following describes the effect of single slippage on various types of services. When providing telephone (voice) communication services, slippage can cause random sound clicks. These clicks are not always audible and do not lead to serious speech distortions. Therefore, telephone services are not critical to slippage. The frequency of occurrence of slippages up to several slippages per minute is considered acceptable. Single slippage leads to distortion or missing lines in the received fax message. Slippage can cause up to 8 scanned lines to disappear. This corresponds to a gap of 0.08 inches of vertical space. On a standard printed page, slippage looks like the absence of the top or bottom half of the printed line. A prolonged occurrence of slippage will result in the need to resubmit the pages affected by them. Retransmission cannot be automated and is done manually by the user. The effect of slippage on data transmission using modems is manifested in the form of long error packets in the range from 10 milliseconds to 1.5 seconds. When these errors occur, the terminal receiver connected to the modem receives corrupted data. As a result, the user must retransmit the data. If slippage occurs during a videotelephone session, the image disappears. Subscribers are asked to re-establish a connection to restore the image. The effect of slippage on digital data transmission depends on the protocol used. In protocols that do not provide for retransmission, data may be skipped, repeated, or corrupted. Possible loss of frame synchronization causes the distortion of many frames when resuming the arrival of pulses of frame synchronization. Retransmission protocols have the ability to detect slippage and initiate retransmission. Initializing and performing such a relay usually takes one second. Therefore, slippage will affect throughput, usually resulting in a loss of a second transmission time. When digitally transmitting images (for example, video conferencing), slippage usually causes a part of the image to distort or freeze for up to 6 seconds. The severity and

duration of the distortion depends on the coding and compression equipment used [8]. The most significant distortion occurs when using low-speed decoding equipment. Slippage is mostly affected by the provision of encrypted data services. Slippage leads to the loss of the encoding key. Loss of the key results in inaccessibility of the transmitted data until the key is retransmitted and communication is repeated. Therefore, all communication stops. More important is the need to relay the key significantly affects security. For many security-related applications, slippage in excess of 1 per day is considered unacceptable.

To control slippage, pointer alignment events, and error beams caused by synchronization, ITU and ANSI have set several requirements for synchronization performance. For international connections, the slip rate threshold for an "acceptable" connection is set by the ITU at the level of one slip for every five hours. To achieve a satisfactory slippage rate during end-to-end transmission, the long-term maximum frequency instability at the output of the digital synchronization system is  $1 \times 10^{-11}$ . This requirement was established by both ANSI [29] and ITU

[30, 31]. The requirements for short-term instability allow from 1 to 10 microseconds with errors per day at the output of each network clock [29, 30].

To determine the moment of synchronization disruption in critical use computer systems, it is necessary to use appropriate computing systems, which should determine the current frequency of the generators in the network with high speed and accuracy. Currently, such hardware is acousto-optical spectrum analyzers (AOSA) with spatial integration. The main characteristics and ways to increase the resolution of this device will be investigated in the next part of the proposed work.

### Basic relationships and formulations

The structural diagram of the analyzer [22] is shown in fig. 1, where 1 - laser, 2 - capacitor, 3 - collimator, 4 - acousto-optic modulator (AOM), 5 - Fourier lens, 6 - recording device are indicated and the used coordinate systems  $x_1, y_1, z_1$  and  $x_2, y_2, z_2$  are shown.

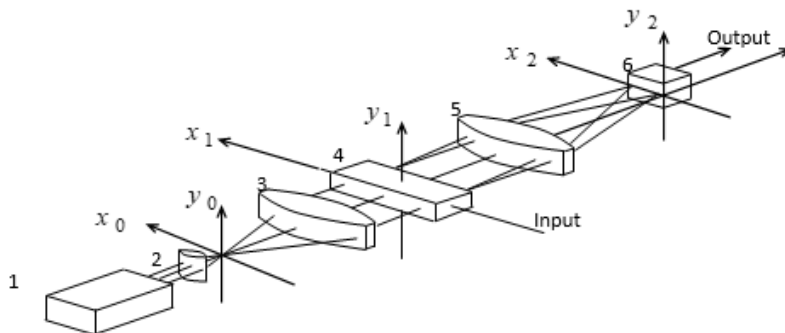


Fig. 1. The structural diagram of an acousto-optical spectrum analyzer

The capacitor and collimator convert the monochromatic wave  $\exp[i(\omega_L t - k_L z_1)]$  emitted by the laser into a plane wave incident at an angle  $\theta_i$  on the AOM  $E_0(x_1, t) = r(x_1) \exp[i(\omega_L t - k_L z_1 + k_L x_1 \tan \theta_i)]$  with a given aperture  $r(x_1) = \begin{cases} 1, & |x_1| \leq D/2; \\ 0, & |x_1| > D/2, \end{cases}$  where  $D/2$  is the half-width of the AOAC collimator.

An analyzer receives a radio signal  $s(t)$ , which is then converted into a traveling acoustic wave  $r(x_1) s\left(t - \frac{x_1 + D/2}{v}\right)$  propagating with the speed  $v$ . In the linear approximation, the field of the light wave of the first diffraction order is represented as

$$E_1(x_1, t) = A r(x_1) s\left(t - \frac{x_1 + D/2}{v}\right) \exp[i(\omega_L t - k_L z_1 + k_L x_1 \tan \theta_i)], \quad (1)$$

where  $A$  characterizes the modulating effect of an acoustic wave on laser radiation passing through AOM.

In the output plane of the analyzer coinciding with the rear focal plane of the lens 5, the field is written as

$$E_2(x_2, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dx_1 E_1(x_1, t) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda F} x_1 x_2\right), \quad (2)$$

where  $F$  is a lens focal length,  $\lambda$  is a laser wavelength.

Using the expansion (1), formula (2) can be transformed to the form

$$E_2(\omega_x, t) = A v \exp(-i\omega_x T/2) \int_0^T d\tau \exp(i\omega_x \tau) s(t - \tau), \quad (3)$$

where the non-essential multiplier  $\exp[i(\omega_L t - k_L z_1)]$  is omitted and the notation  $\omega_x = v \left( \frac{2\pi}{\lambda F} x_2 + k_L \tan \theta_i \right)$  is entered, and there is a duration of the time sample corresponding to the light aperture  $D$ . In formula (3) and everywhere below, the dependence of the field  $E_2$  on the  $x_2$  using  $\omega_x = \omega(x_2)$ .

Let's consider the incoherent transformation of the output light distribution into an electrical signal proportional to the time integral of its intensity

$$u(\omega_x, T_R) = \int_0^{T_R} dt |E_2(\omega_x, t)|^2, \quad (4)$$

where  $T_R$  is the registration time, counted from the moment  $t = 0$ .

### Resolution of pulses with a rectangular envelope

Let two rectangular-shaped pulses of the same unit amplitude simultaneously arrive at the analyzer input, but with different carrier frequencies  $\omega_a$ , durations  $\tau_a$  and delay times  $t_a$  ( $a=1, 2$ ):  $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$ , where

$$s_a(t) = \begin{cases} 0, & t < t_a; \\ \sin(\omega_a(t-t_a)), & t_a \leq t \leq t_a + \tau_a; \\ 0, & t > t_a + \tau_a. \end{cases} \quad (5)$$

Substituting (5) into (3) gives

$$E_2(\omega_x, t) = E_2^{(1)}(\omega_x, t) + E_2^{(2)}(\omega_x, t), \quad (6)$$

where the summand  $E_2^{(a)}(\omega_x, t)$  corresponding to the response to the  $a$ -th input pulse ( $a=1, 2$ ), in the case of a time aperture  $T$  that is shorter than the pulse  $\tau_a$  duration, up to an insignificant factor  $A \exp(-i\omega_x T/2)$  for further consideration, is given by the following expressions:

at  $T_R < t_a$ :

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = 0; \quad (7)$$

at  $t_a \leq T_R < t_a + T$ :

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = e_a(t-t_a, t-t_a, t-t_a); \quad (8)$$

at  $t_a + T \leq T_R < t_a + \tau_a$ :

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = e_a(T, 2(t-t_a) - T, T); \quad (9)$$

at  $t_a + \tau_a \leq T_R < t_a + \tau_a + T$ :

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = e_a(t-t_a - \tau_a + T, t-t_a + \tau_a - T, \tau_a + T - t + t_a); \quad (10)$$

at  $T_R \geq t_a + \tau_a + T$ :

$$E_2^{(a)}(\omega_x, t) = 0. \quad (11)$$

In formulas (8-10), a notation for a function of three variables is introduced to shorten the entry

$$e_a(s_1, s_2, s_3) = e^{\frac{i\omega_x s_1}{2}} \left[ e^{\frac{i\omega_a s_2}{2}} \frac{\sin(\omega_a^- s_3 / 2)}{\omega_a^-} - e^{-\frac{i\omega_a s_2}{2}} \frac{\sin(\omega_a^+ s_3 / 2)}{\omega_a^+} \right],$$

where  $\omega_a^\pm = \omega_x \pm \omega_a$ .

Thus, by virtue of (4) and (6), the total recorded signal can be written as

$$u(\omega_x, T_R) = u_1(\omega_x, T_R) + u_2(\omega_x, T_R) + u_{12}(\omega_x, T_R), \quad (12)$$

where  $u_a(\omega_x, T_R) = \int_0^{T_R} dt |E_2^{(a)}(\omega_x, t)|^2$  represent the output signal when there is only the  $a$ -th pulse at the input, and the third term

$$u_{12}(\omega_x, T_R) = 2 \operatorname{Re} \left[ \int_0^{T_R} dt E_2^{(1)}(\omega_x, t) \overline{E_2^{(2)}(\omega_x, t)} \right] \quad (13)$$

arises as a result of interference of the first two (the bar above means complex conjugation).

The expressions for  $u_a(\omega_x, T_R)$  in the case of a temporary aperture  $T$  shorter than the duration of each of the pulses  $\tau_i$  are given in [32]. Explicit expressions for  $u_{12}(\omega_x, T_R)$  are obtained after substituting formulas (7-11) in (13) and are not given here only because of their cumbersome nature, since they take into account all possible options for the relative position along the time axis of the steps of entering the aperture, its complete filling, and exit from the aperture of each of pulses. The physical interpretation of these expressions is similar to that given in [32] for the quantities  $u_a(\omega_x, T_R)$ .

Thus, the set of formulas (7-13) determines the output signal of the spectrum analyzer when two rectangular pulses with different carrier frequencies, durations, and delay times arrive at its input.

### Numerical calculations and discussion

The most significant qualitative and quantitative characteristics of the frequency resolution can be seen already on the example of two pulsed signals that differ only in carrier frequencies.

When conducting numerical calculations, it was assumed that the duration of the input pulses  $\tau_1 = \tau_2 = \tau = 1000$ , and the value of the time aperture  $T = 800$  (time was measured in arbitrary units, which were determined by the ratio  $\omega_1 = 1$ ). The delays of both pulses without loss of generality were assumed to be equal  $t_1 = t_2 = 0$ , and the time evolution of the output signal was considered over the interval  $0 \leq T_R \leq \tau + T$ , which made it possible to reveal all the features of the time course, since then the signal went to a stationary value [32].

Fig. 2 illustrates the results of calculations of the time evolution of the dependence of the output signal  $u(\omega_x, T_R)$  on a value  $\omega_x$  proportional to the coordinate  $x_2$  for the relative detuning of the carrier frequencies  $\varepsilon = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_1 = 0,02$ .

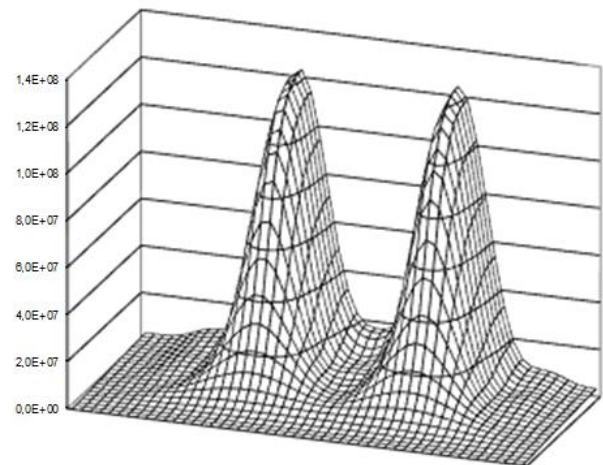
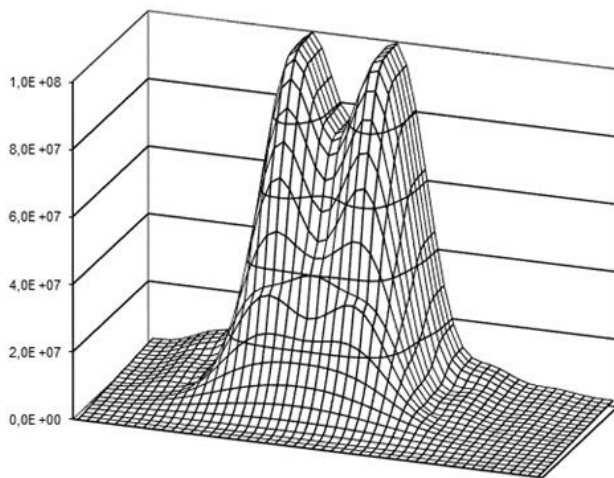


Fig. 2. The output signal of the spectroanalyzer when the carrier frequencies of the input pulses are greatly disrupted

The axis  $x$  corresponds to the value  $\omega_x$ , and the axis  $y$  to the value  $T_R$ , with the left peak in this and subsequent figures representing the input pulse with the carrier  $\omega_1$ , the right – the pulse with the carrier  $\omega_2$ .

As can be seen from fig. 2, for such a detuning  $\varepsilon$ , the presence of the interference term in expression (12) is practically insignificant, and the pulses are reliably distinguishable even after the stage of filling the AOM aperture with them.

Fig. 3 shows the results of calculations of the output signal  $u(\omega_x, T_R)$  for half as much as in fig. 2, detuning  $\varepsilon = 0,01$  with the remaining parameters unchanged. A comparison of these figures shows that for a given mismatch value, a reliable resolution of pulses is possible only at a sufficiently large (close to the stage of reaching the stationary value) observation time.



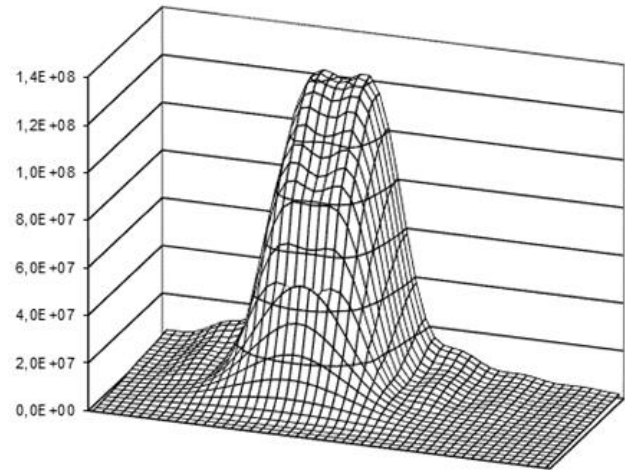
**Fig. 3.** Output signal with moderate mismatch of carrier frequencies

In addition, if two (even weakly distinguishable) pulses are recorded for the detuning  $\varepsilon = 0,02$  at the very beginning, and at the grow of  $T_R$  their difference increases, then for the  $\varepsilon = 0,01$ , both pulses are absolutely indistinguishable (look like a single whole) and only during registration, if its time large enough, their resolution is getting more and more complete.

The calculation data in fig. 3 also illustrates the weak efficiency of the signal discrimination algorithm at the average (according to the Rayleigh criterion) resolution of the output pulses based on filtering the interference term in (12) by passing through a low-pass filter (compared to the beat frequency proportional to the difference  $\omega_2 - \omega_1$ ). Since at such detuning values, the interference term is comparable in magnitude with the responses from individual pulses and makes a comparable contribution to the total output signal, its filtering will lead to a decrease in the level of the useful signal and, accordingly, a decrease in the efficiency of such an algorithm.

The calculation results presented in fig. 4, differ from the previous two by an even greater magnitude of detuning:  $\varepsilon = 0,005$ . The nature of the change in the output signal is the same as in fig. 3: first, both impulses look as a single indistinguishable, and only in the process

of registration the dependence curve  $u(\omega_x, T_R)$  of  $\omega_x$  becomes a two-hump. However, even when the signal reaches a stationary value, this bumpiness is small, and the presence of a second pulse against the background of the first one can only indirectly judge the increased total amplitude of the output signal compared to the previous figure.



**Fig. 4.** The output signal with a small detuning carrier frequencies

However, it is easy to see that the total signal from two completely identical pulses is only four times the signal from a single pulse, which may not be enough for devices whose parameters are similar to those used in the calculations in this article.

Thus, to distinguish between the carrier frequencies of the input pulses at medium and small values of the detuning, the general necessary condition is a sufficiently large (compared with the total duration of the input pulse and time aperture of the spectrum analyzer) recording time. Such an increase in the resolution of an acousto-optical spectrum analyzer will improve the quality of synchronization diagnostics of critical use computer systems.

### Diagnostics of synchronization failures

A method for diagnosing synchronization disruptions in a telecommunication network consists in determining the moment of desynchronization of the information transmission network of a critical computer system. Most digital communication systems using coherent modulation require all three levels of synchronization: phase, symbol and frame. Incoherent modulation systems usually require only symbolic and frame synchronization; since the modulation is incoherent, accurate phase synchronization is not required. In addition, incoherent systems require frequency synchronization. Frequency synchronization differs from phase synchronization in that the copy of the carrier generated by the receiver may have arbitrary phase shifts from the received carrier.

Network out of sync diagnostics require high-precision phase and frequency measurements of the carrier frequency of the master oscillators of the receiver and transmitter with high resolution of the used hardware.

Carrier frequency measurements will allow phase synchronization calculations and determination of the moment of frequency synchronization violation. To ensure such measurements, the developed method proposes the use of AOSA with spatial integration. To increase the resolution of AOSA with spatial integration, it is necessary to increase the interval of signal accumulation, which can lead to an increase in the time required for network analysis. Thus, the proposed method will improve the accuracy of determining the fact of a synchronization violation, but this requires an increase in the time and complexity of the analysis. Further improvement of this method requires a significant increase in the resolution of the AOSA for comparing the reference signals with the received ones (by the principle of maximum likelihood).

### Conclusions

The paper proposes a method for the diagnosis of disorders of the synchronization of telecommunications networks computer systems for critical applications. The method is based on the higher resolution of the measuring system on the basis of acousto-optic spectrum analyzer. The main findings of the study are:

- the article presents the results of the analysis of factors affecting the violation of the stabilization computer networks computer systems for critical applications. Established qualitative and quantitative indicators of system synchronization;

- this paper analyzes the functionality of the use of acousto-optic spectrum analyzers for quality control of synchronization of computer networks, presents the basic mathematical relations that determine the parameters of the output signal of AOAS;

- as a result of numerical calculations, it was found that to distinguish the carrier frequencies of input pulses at moderate and small values of the detuning the General necessary condition is large enough (compared to the total duration of the input pulse and the time of the aperture spectrum analyser) the time of registration;

- the main outcome of the research opportunities enhance the resolution of OAS is that there is the theoretical background to determine the synchronous operation of generators in the network information computer system of critical usage, which will lead to increased quality of service (QoS);

- further investigation in this direction, it is desirable to devote to obtaining quasi-optimal and optimal methods of resolution enhancement of AOAS to determine the parameters of desynchronization of the computer network.

### References

- Whitt, W. (1983), "The Queuing Network Analyzes", *Bell System Tech. I.*, Vol. 62, No. 9, P. 2779–2815.
- Kuchuk, G. A. (2007), "Traffic management of multiservice distributed telecommunication network" ["Upravlinnya trafikom mul'tyservisnoyi rozpodilenoii telekomunikatsiynoyi merezhi"], *Control, navigation and communication systems*, Kyiv : TsNII NiU, Issue 2, P. 18–27.
- Svyrydov, A., Kovalenko, A., Kuchuk, H. (2018), "The pass-through capacity redevelopment method of net critical section based on improvement on/off models of traffic", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 2, P. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
- Kuchuk, G. A., Kovalenko, A. A., Lukov-Chuiko, N. V. (2017), "A method for minimizing the average packet delay in virtual cloud support network connections" ["Metod minimizatsiyi seredn'oyi zatrymky paketiv u virtual'nykh z'yednannyakh merezhi pidtrymky khmarnoho servisu"], *Control, navigation and communication systems*, No. 2 (42), P. 117–120.
- Merlac, V., Smatkov, S., Kuchuk, N., Nechausov, A. (2018), "Resources Distribution Method of University e-learning on the Hypercovergent platform", *Conf. Proc. of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018. Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2018*, P. 136–140. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114>
- Kuchuk, N., Artiukh, R. and Nechausov, A. (2017), "Method of building the semantic network of distributed search in e-learning", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (2), P. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.062>
- Kuchuk, G. A., Ruban, I. V., Davikoza, O. P. (2013), "Conceptual approach to synthesis of information and telecommunication network structure" ["Kontseptual'nyy pidkhid do syntezu struktury informatsiyno-telekomunikatsiynoyi merezhi"], *Systems of information processing: collection of scientific works*, No. 7 (114), P. 106–112.
- Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O. (2019), "Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunication networks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (9), P. 127–134. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.127>
- Kosenko, V. (2017), "Mathematical model of optimal distribution of applied problems of safety-critical systems over the nodes of the information and telecommunication network", *Advanced Information Systems*, Vol. 1, No. 2, P. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.01>
- Sivaram, M., Batri, K., Amin Salih, Mohammed and Porkodi V. (2019), "Exploiting the Local Optima in Genetic Algorithm using Tabu Search", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 12, Issue 1, P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.17485/ijst/2019/v12i1/139577>
- Zykov, I., Kuchuk, N., Shmatkov, S. (2018), "Architecture synthesis of the computer system of transaction control e-learning", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 3, P. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>
- Gelenbe, E., Pujolle, G. (2010), *Analysis and synthesis of computer systems (2nd Edition)*, *Advances in Computer Science and Engineering* : Texts, Vol. 4, 309 p.
- Kuchuk, N., Mohammed, A. S., Shyshatskyi, A. and Nalapko, O. (2019), "The method of improving the efficiency of routes selection in networks of connection with the possibility of self-organization", *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, No. 8 (1), P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/0181.22019>

14. Kuchuk, G., Kharchenko, V., Kovalenko, A., Ruchkov, E. (2016), "Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems", *East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>
15. Mozhaev, O., Kuchuk, H., Kuchuk, N., Mozhaev, M., Lohvynenco, M. (2017), "Multiservice network security metric", *IEEE Advanced information and communication technologies-2017, Proc. of the 2th Int. Conf. Lviv, 2017*, P. 133–136.
16. Kosenko, V. (2017), "Principles and structure of the methodology of risk-adaptive management of parameters of information and telecommunication networks of critical application systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (1), P. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.046>
17. Kuchuk, G. A., Kovalenko, A. A., Mozhaev, A. A. (2010), "An Approach To Development Of Complex Metric For Multiservice Network Security Assessment", *Statistical Methods Of Signal and Data Processing (SMSDP – 2010): Proc. Int. Conf., October 13-14, 2010. – Kiev: NAU, RED, IEEE Ukraine section joint SP, 2010*, P. 158–160.
18. Kliuiev, O., Mozhaev, M., Uhrovetskyi, O., Mozhaev, O., Simakova-Yefremian, E. (2019), "Method of forensic research on image for finding touch up on the basis of noise entropy", *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, AICT 2019 – Proceedings*.
19. Gavrylenko, S. (2019), "Synthesis of identification measurements in the computer system of critical purpose", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (8), P. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.036>
20. Filimonchuk, T., Volk, M., Risukhin, M., Olshanska, T., Kazmina, D. (2019), "The modified information technology for the distribution of resource tasks for cloud computing systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (7), P. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.7.121>
21. Davydovskiy, Y., Reva, O., Artiukh, O., Kosenko, V. (2019), "Simulation of computer network load parameters over a given period of time", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (9), P. 72–80. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.072>
22. Mohammed, Amin Salih, Saravana, Balaji B., Saleem, Basha M. S. (2019), "Fuzzy applied energy aware clustering based routing for IoT Networks", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 4, P. 140-145. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.22>
23. Akayev, A. A., Mayorov, S. A. (1988), *Optical methods of information processing [Opticheskiye metody obrabotki informatsii]*, Moscow : Higher school, 237 p.
24. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Komari, I. E., Svyrydov, A., Kharchenko, V. (2019), "Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method", *Studies in Systems, Decision and Control, Springer Nature Switzerland AG*, Vol. 171, P. 161–183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
25. Svyrydov, A., Kuchuk, H., Tsiapa, O. (2018), "Improving efficiency of image recognition process: Approach and case study", *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2018*, P. 593–597. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201>
26. Saravana, Balaji B., Karthikeyan, N.K., Raj Kumar, R.S., (2018), "Fuzzy service conceptual ontology system for cloud service recommendation", *Computers & Electrical Engineering*, Vol. 69, P. 435–446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2016.09.013>
27. Saravana, Balaji B., Mohamed, Uvaze Ahamed, Eswaran C., Kannan R. (2019), "Prediction-based Lossless Image Compression", *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics (Springer)*, Vol. 30, No. 1, P. 1749–17961, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00665-5\\_161](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00665-5_161)
28. Mozhaev, M., Kuchuk, N., Usatenko M. (2019), "The method of jitter determining in the telecommunication network of a computer system on a special software platform", *Innovate Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 134–140. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.134>
29. American National Standard for Telecommunications (1994), "Synchronization Interface Standards for Digital Networks", ANSI T1.101-1994.
30. International Telecommunication Union (2007), "Timing requirements at the output of primary reference clocks suitable for plesiochronous operation of international digital links", ITU-T Recommendation G.811.
31. International Telecommunication Union (2011), "The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 1544 kbit/s hierarchies", ITU-T Recommendation G.824.
32. Strelkov, A. I., Stadnik, A. M., Korotkov V. V. (2001), "Features of the incoherent acousto-optic spectrum analyzer at a finite recording time" [Osobennosti raboty nekogerentnogo akustoopticheskogo spektroanalizatora pri konechnom vremeni registratsii], *Radio engineering*, Kharkiv : KhNURE, No. 122, P. 162–168.

Received 28.02.2020

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Рудницький Володимир Миколайович** – доктор технічних наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, завідувач кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії, Черкаси, Україна; email: [rvn\\_2008@ukr.net](mailto:rvn_2008@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7610-3319>.

**Рудницький Владимир Николаевич** – доктор технических наук, профессор, Черкасский государственный технологический университет, заведующий кафедрой информационной безопасности и компьютерной инженерии, Черкассы, Украина.

**Rudnytsky Vladimir** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Cherkasy State Technological University, Head of the Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy, Ukraine.

**Можась Михайло Олександрович** – кандидат технічних наук, Харківський науково-дослідний інститут судових експертиз ім. засл. проф. М. С. Бокаріуса, завідувач лабораторії комп'ютерно-технічних, телекомунікаційних досліджень та досліджень відео-, звукозапису, Харків, Україна; email: [mikhail.mozhayev@hniise.gov.ua](mailto:mikhail.mozhayev@hniise.gov.ua); ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1566-9260>.

**Можаєв Михайл Александрович** – кандидат технических наук, Харьковский научно-исследовательский институт судебных экспертиз им. засл. проф. Н. С. Бокариуса, заведующий лабораторией компьютерно-технических, телекоммуникационных исследований и исследований видео-, звукозаписи, Харьков, Украина.

**Mozhaiev Mykhailo** – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv SRI examinations named dist. prof. N. S. Bokarius, Head of the Laboratory on Speech and Audio Computer Engineering and Telecommunication, Kharkiv, Ukraine.

**Кучук Ніна Георгіївна** – кандидат педагогічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Харків, Україна; email: nina\_kuchuk@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0784-1465>.

**Кучук Нина Георгиевна** – кандидат педагогических наук, доцент, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Харьков, Украина.

**Kuchuk Nina** – PhD (Pedagogy Sciences), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Programming, Kharkiv, Ukraine.

## МЕТОД ДІАГНОСТИКИ ПОРУШЕНЬ СИНХРОНІЗАЦІЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

**Актуальність** дослідження. Для поліпшення якості обслуговування (QoS) постійно оптимізується робота всіх мережевих технологій, протоколів і окремих механізмів управління трафіком. Відомо, що на якість передачі інформації в сучасному телекомунікаційному обладнанні впливає якість пристроїв синхронізації. Синхронізація – це засіб підтримки роботи всього цифрового устаткування в мережі передачі інформації на одній середній швидкості, яке повинно існувати на трьох рівнях: бітова синхронізація, синхронізація на рівні каналних інтервалів (time slot) і кадрова синхронізація. Тому відсутність синхронізації комп'ютерної системи на необхідному рівні може призвести до значного зниження показників QoS. У той же час істотно посилюються вимоги до забезпечення цих показників в умовах збільшення завантаження мережевих ресурсів.

**Предмет** дослідження: синхронізація комп'ютерної системи. **Метою** статті є розробка методу діагностики порушень синхронізації телекомунікаційної мережі комп'ютерної системи критичного застосування за рахунок підвищення роздільної здатності акустооптичного спектроаналізатора. **Результати** дослідження. Проведено аналіз впливу нестационарності передачі даних в телекомунікаційній підсистемі досліджуваної комп'ютерної системи. Проведено аналіз та класифікацію причин порушення синхронізації комп'ютерної мережі комп'ютерної системи критичного застосування. Наведено наслідки порушення стабілізації комп'ютерної мережі для забезпечення якості обслуговування, що надається різними сервісами, що часто вживаються. Запропоновано використання акустооптичних спектроаналізаторів з просторовим інтегруванням для діагностики порушення синхронізації мережі. В роботі проведено аналіз використання акустооптичних спектроаналізаторів. Проведені дослідження дозволили отримати аналітичний вираз для вихідного сигналу спектроаналізатора при надходженні на його вхід двох імпульсів прямокутної форми з різними несучими частотами, тривалістю і часом затримки. Цей результат, а також наведені чисельні розрахунки дозволили виробити загальні рекомендації для підвищення роздільної здатності акустооптичного спектроаналізатора, і, таким чином, створити теоретичні передумови для поліпшення синхронізації комп'ютерної системи. Наведені аналітичні співвідношення і чисельні оцінки були експериментально перевірені за допомогою імітаційного моделювання системи. **Висновки.** В результаті досліджень було запропоновано метод діагностики порушень синхронізації телекомунікаційної мережі комп'ютерної системи критичного застосування. Метод заснований на підвищенні роздільної здатності виміральної системи на базі акустооптичного спектроаналізатора.

**Ключові слова:** комп'ютерна система; телекомунікаційна мережа; синхронізація; акустооптичний спектроаналізатор.

## МЕТОД ДИАГНОСТИКИ НАРУШЕНИЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

**Актуальность** исследования. Для улучшения качества обслуживания (QoS) постоянно оптимизируется работа всех сетевых технологий, протоколов и отдельных механизмов управления трафиком. Известно, что на качество передачи информации в современном телекоммуникационном оборудовании влияет качество устройств синхронизации. Синхронизация – это средство поддержания работы всего цифрового оборудования в сети передачи информации на одной средней скорости, которое должно существовать на трех уровнях: битовая синхронизация, синхронизация на уровне каналных интервалов (time slot) и кадровая синхронизация. Поэтому отсутствие синхронизации компьютерной системы на требуемом уровне может привести к значительному снижению показателей QoS. В тоже время существенно ужесточаются требования к обеспечению этих показателей в условиях увеличения загрузки сетевых ресурсов. **Предмет** исследования: синхронизации компьютерной системы. **Целью** статьи является разработка метода диагностики нарушений синхронизации телекоммуникационной сети компьютерной системы критического применения за счет повышения разрешающей способности акустооптического спектроанализатора. **Результаты** исследования. Проведен анализ влияния нестационарности передачи данных в телекоммуникационной подсистеме исследуемой компьютерной системы. Проведен анализ и классификация причин нарушения синхронизации компьютерной сети компьютерной системы критического применения. Приведены последствия нарушения стабилизации компьютерной сети для обеспечения качества обслуживания, предоставляемого различными часто употребляющимися сервисами. Предложено использования акустооптических спектроанализаторов с пространственным интегрированием для диагностики нарушения синхронизации сети. В работе проведен анализ использования акустооптических спектроанализаторов. Проведенные исследования позволили получить аналитическое выражение для выходного сигнала спектроанализатора при поступлении на его вход двух импульсов

прямоугольной формы с различными несущими частотами, длительностями и временами задержки. Этот результат, а также приведенные численные расчеты позволили выработать общие рекомендации для повышения разрешающей способности акустооптического спектроанализатора, и, таким образом, создать теоретические предпосылки для улучшения синхронизации компьютерной системы. Приведенные аналитические соотношения и численные оценки были экспериментально проверены посредством имитационного моделирования системы. **Выводы.** В результате исследований был предложен метод диагностики нарушений синхронизации телекоммуникационной сети компьютерной системы критического применения. Метод основан на повышении разрешающей способности измерительной системы на базе акустооптического спектроанализатора.

**Ключевые слова:** компьютерная система; телекоммуникационная сеть; синхронизация; акустооптический спектроанализатор.

*Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Рудницький В. М., Можаяев М. О., Кучук Н. Г. Метод діагностики порушень синхронізації телекомунікаційної мережі комп'ютерної системи критичного застосування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 172–180. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.172>.

Rudnytsky, V., Mozhaiev, M., Kuchuk, N. (2020), "Method for the diagnostics of synchronization disturbances in the telecommunications network of a critical used computer system", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (11), P. 172–180. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.172>.

---

**АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК**

Авер'янова Л.О.	106
Аврунін О.Г.	147
Артюх О.В.	19
Бондар А.В.	28
Боцман І.В.	122
Бушуєв Д.А.	35
Голяка Р.Л.	5
Демська Н.П.	122
Дженсіс В.	156
Євдокименко М.О.	163
Єременко О.С.	163
Захарова І.В.	114
Зекері А.	44
Кадірі І. Б.	44
Казимиров М.А.	147
Ково С. А.	44
Козир Б.Ю.	35
Косенко В.В.	90
Косенко Н.В.	19
Кучук Н.Г.	172
Логінов О.В.	59
Логінова Л.В.	59
Малецька О.Є.	156
Марусенкова Т.А.	5
Можасєв М.О.	172
Невлюдов І.Ш.	122
Невлюдова В.В.	134
Палагін В.А.	122
Персіянова О.Ю.	134
Пітерська В.М.	59
Попко О.В.	68
Прончаков Ю.Л.	90
Решетняк О.І.	80
Роменський В.І.	134
Роянов В.О.	114
Рудницький В.М.	172
Селіванова К.Г.	147
Семенова Ю.	156
Серенко О.М.	114
Слейман Б.	163
Смідович Л.С.	19
Старенький В.П.	106
Тришч Р.М.	156
Федасюк Д.В.	5
Федорович О.Є.	90
Черняк О.М.	156
Ястремська О.О.	97

**ALPHABETICAL INDEX**

Averyanova Lilya	106
Avrunin Oleg	147
Artiukh Olesia	19
Bondar Alla	28
Botsman Irina	122
Bushuiev Denis	35
Holyaka Roman	5
Demska Nataliia	122
Jancis Vladislav	156
Yevdokymenko Maryna	163
Yeremenko Oleksandra	163
Zakharova Irina	114
Zekeri Abu	44
Kadiri Ismaila	44
Kazimirov Nikita	147
Kowo Solomon	44
Kozyr Boris	35
Kosenko Viktor	90
Kosenko Nataliia	19
Kuchuk Nina	172
Lohinov Oleh	59
Lohinova Liliia	59
Maletska Olga	156
Marusenкова Tetyana	5
Mozhaiev Mykhailo	172
Nevliudov Igor	122
Nevliudova Viktoriia	134
Palagin Victor	122
Persiyanova Elena	134
Piterska Varvara	59
Popko Olena	68
Pronchakov Yurii	90
Reshetnyak Olena	80
Romenskiy Vjacheslav	134
Royanov Vyacheslav	114
Rudnytsky Vladimir	172
Selivanova Karina	147
Semionova Julija	156
Serenko Alexandr	114
Sleiman Batoul	163
Smidovych Leonid	19
Starenkiy Victor	106
Trishch Roman	156
Fedasyuk Dmytro	5
Fedorovich Oleg	90
Cherniak Olena	156
Iastremaska Olesia	97

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА  
ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**Щоквартальний науковий журнал**

№ 1 (11), 2020

Відповідальний за випуск *А. А. Коваленко*  
Комп'ютерна верстка *О. Ю. Персіянова*

**АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:**

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14

Тел.: +38 (057) 704-10-51

Веб-сайт: <http://itssi-journal.com>

E-mail: [journal.itssi@gmail.com](mailto:journal.itssi@gmail.com)

---

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 20,48. Тираж 150 прим.

Відруковано з готових оригінал-макетів в типографії ФОП Андреев К.В.  
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.  
Запис №24800170000045020 від 30.05.2003.

61166, Харків, вул. Серпова, 4, тел. 063-993-62-73  
e-mail: [ep.zakaz@gmail.com](mailto:ep.zakaz@gmail.com)