

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv 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 (23), 2023

No. 1 (23), 2023

*Щоквартальний
науковий
журнал*

*Quarterly
scientific
journal*

Харків
2023

Kharkiv
2023

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Бодяньський 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:

Артиух Роман Володимирович, канд. техн. наук;
Бабенко Віталіна Олексіївна, д-р екон. наук, канд. техн. наук, професор;
Безкоровайний Володимир Валентинівич, д-р техн. наук, професор;
Гасімов Юсіф, д-р мат. наук, професор (Азербайджан);
Гопсенко 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, професор;
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;
Опанасюк Анатолій Сергійович, д-р фіз.-мат. 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);
Тєстлов 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
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>
E-mail редколегії: 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);
Babenko Vitalina, Dr. Sc. (Economics); PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);
Bezkorovainyi Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Gasimov Yusif, Dr. Sc. (Mathematical), 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), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Olexandr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
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);
Opanasyuk Anatoliy, Dr. Sc. (Physical and Mathematical), 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
Information site: <http://itssi-journal.com>
E-mail of the editorial board: 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 № 4 від 28 березня 2023 р.).

Свідоцтво про державну реєстрацію журналу Серія KB № 22696-12596P від 04.05.2017 р.

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Ахієзер О. Б., Дунаєвська О. І., Роговий А. І., Голотайстрова Г. О., Решетняк Ю. Б., Мехович С. А.**
Структурна модель інноваційно-інжинірингового промислового кластеру
й алгоритм його формування (eng)
- 14 **Бакурова А. В., Дівоча І. О., Кійко С. Г., Юськів О. І.**
Рекурентний аналіз енергоспоживання металургійного підприємства (eng)
- 25 **Батюк Т. М., Досин Д. Г.**
Імплементация інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій
у соціальній мережі Twitter (ua)
- 45 **Гамзаєв О. Р., Ткачук М. В.**
Розробка проблемно-орієнтованої мови моделювання
для підтримки варіабельності програмного забезпечення в системах "Розумний будинок" (eng)
- 57 **Журило О. Д., Ляшенко О. С., Аветісова К. А.**
Огляд рішень з апаратної безпеки кінцевих пристроїв туманних обчислень у Інтернеті речей (ua)
- 72 **Мамчиц О. О., Волк М. О.**
Оцінювання енергетичних витрат у процесі використання мобільних пристроїв
для хмарних обчислень. (ua)
- 83 **Матвієнко О. І., Спичак П. О.**
Метод підвищення ефективності роботи водопровідної мережі способом її зонування (ua)
- 96 **Можасєв М. О., Можасєв О. О., Гнусов Ю. В., Струков В. М., Клімушин П. С., Євстрат Д. І.**
Аналіз методів захисту акустичної інформації в системах критичного застосування (eng)
- 108 **Рубан І. В., Лебедєв В. О.**
Метод визначення раціональної чисельності флотилії БПЛА
з урахуванням надійності літального апарата (eng)
- 115 **Черняк О. М., Сороколат Н. А., Бурдейна В. М., Фатєєва Л. Ю., Багаєв І. О.**
Застосування методу середніх прямокутників
для отримання комплексного показника безпеки праці (ua)
- 123 **Шевченко Д. О., Узрюмов М. Л., Артюх С. В.**
Агрегування даних моніторингу динамічних систем із використанням інформаційних технологій (eng)

Сучасні технології управління підприємством

- 132 **Карпушенко М. Ю., Карпушенко О. О.**
Теоретико-методологічні аспекти формування системи комплаєнс-контролю (ua)
- 143 **Ходікова І. В.**
Оптимізація цільових показників портфеля проектів
транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів (ua)
- 155 **Ястремська О. О., Небилиця О. А.**
Соціальні мережі як інструмент підприємницької діяльності в умовах економіки вражень (eng)

Інженерія та промислові технології

- 164 **Баданюк І. О., Невлюдов І. Ш., Нікітін Д. О.**
Обробка технологічних зображень для комплексного аналізу дефектів і відхилень
за допомогою адаптивної бінаризації (eng)
- 174 **Голован Ю.М.**
Аерокосмічні технології визначення оцінки забруднення ґрунтів (eng)
- 184 **Невлюдов І. Ш., Слюсар А. П., Хрустальова С. В., Хрустальов К. Л.**
Автоматизована система управління ресурсами для комунального сектора
на базі бездротових сенсорних мереж (eng)
- 197 **Алфавітний показчик**

CONTENTS

Information Technology

- 5 **Akhiezer E., Dunaievska O., Rogoyi A., Holotaistrova H., Reshetnyak Y., Myehovych S.**
Economic – mathematical model of formation of innovation and engineering industrial cluster (eng)
- 14 **Bakurova A., Divocha I., Kiyko S., Yuskiv O.**
Recurrent analysis of energy consumption of a metallurgical enterprise (eng)
- 25 **Batiuk T., Dosyn D.**
Implementation of the intellectual system of sentiment analysis and clusterization of publications in the Twitter social network (ua)
- 45 **Gamzayev O., Tkachyk V.**
Development of problem-specific modeling language to support software variability in "Smart Home" systems (eng)
- 57 **Zhurylo O., Liashenko O., Avetisova K.**
Hardware security overview of fog computing end devices in the Internet of things (ua)
- 72 **Mamchych O., Volk M.**
Estimation of power consumption of mobile devices in cloud computing (ua)
- 83 **Matviienko O., Spichak P.**
Method of increasing the efficiency of the water supply network due to its zoning (ua)
- 96 **Mozhaiev M., Mozhaiev O., Gnusov Y., Strukov V., Klimushin P., Yevstrat D.**
Analysis of acoustic information protection methods in critical applications (eng)
- 108 **Ruban I., Lebediev V.**
Method for determining the rational number of UAV flotilla taking into account the reliability of the aircraft (eng)
- 115 **Cherniak O., Sorocolat N., Burdeina V., Fatieieva L., Bahaiev I.**
Application of the method of average rectangles to obtain a complex indicator of labor safety (ua)
- 123 **Shevchenko D., Ugryumov M., Artiukh S.**
Monitoring data aggregation of dynamic systems using information technologies (eng)

Modern Enterprise Management Technologies

- 132 **Karpushenko M., Karpushenko O.**
Theoretical and methodological aspects of forming a compliance control system (ua)
- 143 **Khodikova I.**
Optimisation of target indicators of the project portfolio for transport and logistics support of tourist centres (ua)
- 155 **Iastremska O., Nebylytsia H.**
Social networks as a tool for entrepreneurship in the conditions of the economy of impressions (eng)

Engineering & Industry Technology

- 164 **Badanyuk I., Nevliudov I., Nikitin D.**
Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarisation (eng)
- 174 **Golovan Yu.**
Aerospace technologies for assessing soil contamination (eng)
- 184 **Nevliudov I., Sliusar A., Khrustalova S., Khrustalev K.**
Automated resource management system for the utility sector based on wireless sensor networks (eng)
- 197 **Alphabetical index**

E. AKHIEZER, O. DUNAIEVSKA, A. ROGOVYI, H. HOLOTAISTROVA, Y. RESHETNYAK, S. MYEHOVYCH

ECONOMIC-MATHEMATICAL MODEL OF FORMATION OF INNOVATION AND ENGINEERING INDUSTRIAL CLUSTER

The subject of the article is the use of industrial clusters as tools for innovative economic growth. **The purpose** of the article is to develop an economic-mathematical model of the formation of an industrial cluster, and to create an algorithm for cluster zoning of the economy. **Tasks to be solved** – analysis of the principles of innovative growth, development of a model of an innovation-engineering industrial cluster, formulation of a methodology for the formation of a regional innovation-engineering cluster, analysis and assessment of the features that arise in clusters, use of cluster analysis for systematization, classification and reduction of the number of features. Applied **methods**: system analysis, project approach, institutional theory, clustering methods, Bartlett's sphericity criterion and Kaiser–Meyer–Olkin sampling adequacy criterion, multivariate regression analysis, Fisher's F-test. **The results obtained**: it was determined that the best approach to unification of the main components of innovative development, namely state bodies, business and development institutes, is the creation of innovation and engineering clusters. The principles of creation and functioning of such clusters are described. It is shown that the basis of the cluster construction algorithm of regions is the integration of quantitative and qualitative methods of identification and clustering of the economy. This makes it possible, in contrast to existing approaches, not only to identify cluster elements, but also to model the levels of interaction between them. It is proposed to use the synergistic effect from the use of the newly formed structure as an assessment of the efficiency of the cluster. **Conclusions**: the use of regional innovation and engineering clusters allows for the formation of an effective strategy for the development of the region's economy. The developed algorithm of cluster zoning integrates quantitative and qualitative methods of determining the clustering possibilities of the region's economy. The complex interaction of economic and political factors leads to a synergistic effect and allows modeling cluster formation with the identification of the composition of participants and the level of interaction between them.

Keywords: innovation-engineering industrial cluster, synergistic regional effect, factor analysis, cluster analysis.

Introduction

The modern innovation economy (sometimes also called the "knowledge economy") is a subtype of economy where knowledge plays a major role. In addition, an important feature of the innovation economy is the natural process of accumulating an idea and then implementing it in all areas of human activity, which leads to the growth of the knowledge-intensive sector, increased labour productivity, reduced material costs of production, its energy intensity and labour force [1].

Innovative growth is fundamentally different from other types of economic growth and has undeniable advantages. First, it is based on profound transformations of the entire production base, but without increasing the need for raw materials. Secondly, since reengineering is one of the main areas of innovative development, its use contributes to the formation of technological platforms and the connection of cluster formations of other industries to them. This will create preconditions for cooperation and compatibility of technological processes. Thirdly, the use of reengineering makes it possible to form promising production bases of enterprises, which

creates long-term opportunities for their improvement due to relatively small investments, flexibility of technologies and modular construction. Fourthly, the introduction of innovations tends to be vertical and ultimately affects the entire economy. Thus, the innovative transformation of the enterprise's production base within technological platforms through reengineering is an economic category and technological diffusion.

Analysis of recent research and publications

If we consider the restoration of Ukraine's industry after Russia's full-scale invasion and the integration of our country into the global economy, the issue of adopting European technology platforms (ETPs), which have proven their effectiveness, is once again relevant. Strategically, this means the need to create new innovative re-engineering programmes based on platforms that are aligned with the ETP. However, in the current environment and given the structure of ownership and cluster distribution of enterprises in the basic industries, it is impossible to manage and coordinate innovation processes without government involvement. The most

effective way to solve this problem is through institutional means in the regional context (this is due to the difference in economic development of regions, unequal concentration of industrial production, relocation of various enterprises due to full-scale invasion), as well as through the use of new technological platforms of a new level – European Technology Innovation Platforms (ETIPs).

European and global experience in the use of technology platforms confirms the effectiveness of the public-private partnership mechanism in the field of scientific, technical, information and industrial development. Ukraine now has the opportunity to apply the best practices in this area and avoid the mistakes made by the world's leading countries in this field. Experience has shown that the availability of technology, even if it is the most advanced, is not enough to effectively implement innovative ideas, reengineering and technological growth. The skills of business leaders to understand and create mechanisms for implementing such technologies are also important.

The issue of creating and using technology platforms has been studied by many scholars, including M. Porter, L. Anderson, O. Fedirko, I. Balanchuk, N. Chukhraeva, and others.

The aim of the article

The purpose of the study is to create a structural, economic and mathematical model of an innovation and engineering cluster, assess the synergistic effect of its use and develop an algorithm for cluster zoning of the regional economy. The paper proposes to use innovation and engineering clusters as tools for effective innovation development. In addition, it is necessary to analyse the impact of the main factors on the formation of these clusters.

Materials and methods of the study

In order for the process of recovery and further growth of industry and the economy on an innovation basis to be effective, it must involve all parties – government agencies, business and development institutions. In this regard, we propose a model of an innovation and engineering industrial cluster (Fig. 1), which demonstrates the interconnectedness of government agencies, business, investors, innovation development structures, and society. Such interaction will contribute

to the growth of industry and will allow for a synergistic effect from the use of the investment and engineering industrial cluster.

The proposed model is based on a new institutional theory, according to which the institutional environment and the government are of primary importance in ensuring innovative transformations, and the role of participants in economic interaction in the implementation of technological reengineering is considered from the point of view of the spread of innovations. We proceed from the fact that the root cause of economic problems that arise on the way to solving innovation problems is institutional imperfection.

In the course of their evolution, territorial and industrial units (predecessors of modern clusters) have gone through several stages, each of which has had a certain effect on the development of industry and regions (Table 1).

At the initial stages of their functioning, the main suppliers of innovations were state sectoral institutions that provided solutions to the tasks required at that time. However, the lack of competition and low level of motivation prevented such entities from making technological breakthroughs. In today's environment, there is a vital need to create a new model of institutional development that would meet the challenges of not only the fundamental transformations taking place in Ukraine's economy, legal framework and territorial structure, but also be able to orient the vector of the state's development towards integration with the global environment as a full-fledged European country. The Regional Innovation and Engineering Cluster (RIEC) could be used as such a model.

In the post-industrial economy, characterised by the presence of various information and technology transfer networks in the economic space, it is necessary to use an institutional approach to explaining the essence of clusters as a form of integration of capital, business, government, technology and informatics. The new institutional theory is based on the postulate that all these elements of integration exist in the form and forms that have been tested in different socio-economic conditions and environments, in regions with different levels of development and concentration of production. The new institutional theory complements the neoclassical analysis of the processes of formation and development of an innovation cluster by analysing the institutional environment of network interaction of all its actors.

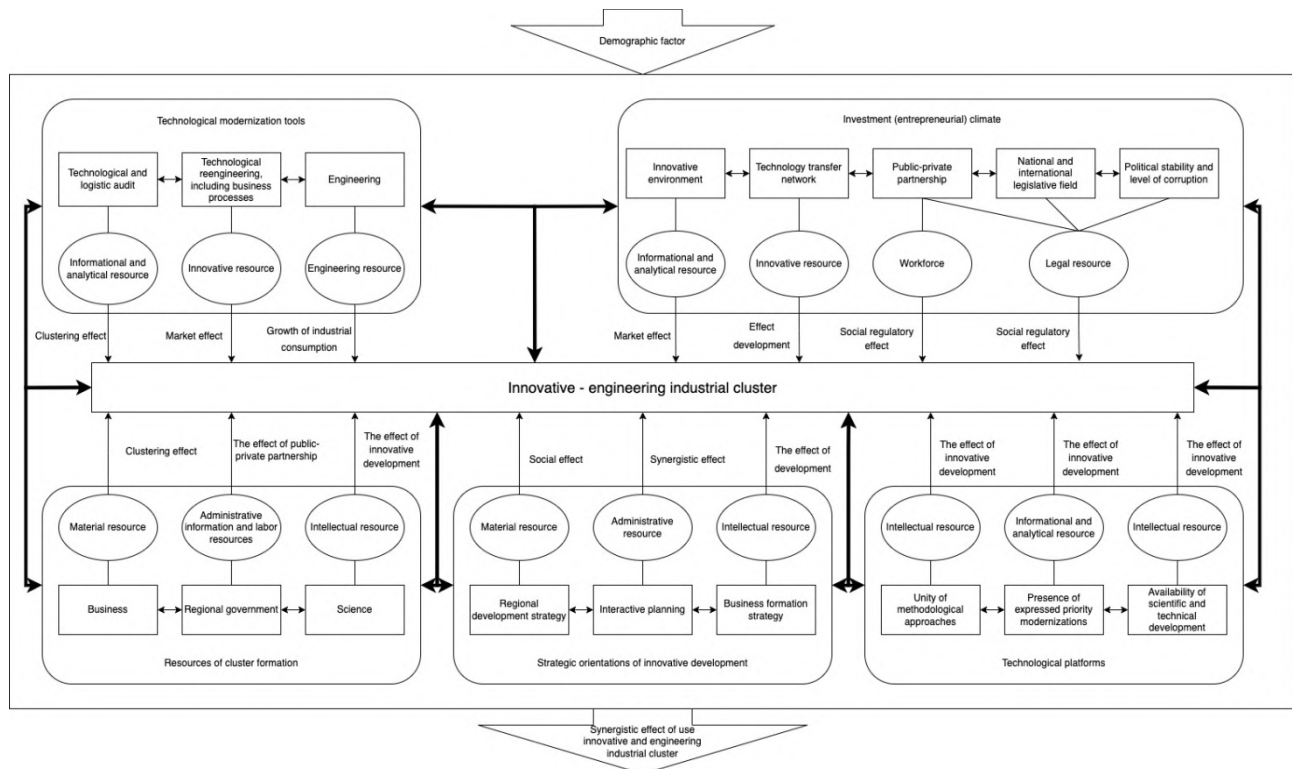


Fig. 1. Model of an innovation and engineering industrial cluster

Table 1. Factors of competitiveness of territorial-industrial units in the process of their evolution

Stages of evolution of territorial-industrial formations	Factors of competitiveness of territorial-industrial units in the process of their evolution
Territorial and industrial complexes	Advantages of cooperation, reduction of transaction costs, solving problems of socio-economic development of the region
Industrial agglomerations of industry	Transport and logistics advantages, reduced uncertainty and transaction costs in geographical concentration, quick response to competitors' innovations
Innovative industrial zones	Human and infrastructural benefits of innovative development, reduction of uncertainty and transaction costs through formal institutions and explicit contracts with participants of integrated education on cooperation (technology transfer)
Territorial innovation networks	Information benefits, reduction of uncertainty and transaction costs through the use of informal institutions (formation of social capital, diffusion of managerial innovations)
Innovative industrial clusters	Innovative advantages of joint activities within the framework of network mechanisms (formation of an institutional environment for innovative development, partnership with public authorities and the local community)
Innovative technological clusters	Innovative advantages of joint activities within network mechanisms of scientific and technical cooperation and technology transfer
Regional innovation and engineering industrial clusters	Innovative advantages of joint activities within the framework of network mechanisms of scientific and technical cooperation between business entities and regional authorities on the basis of common technological platforms and intensification of engineering activities (formation of institutional and innovative environment in the context of global technology transfer networks based on public-private partnership and new instruments of innovative development; global technological modernisation of industrial enterprises with active participation of small and medium-sized businesses; coordinated development of social programmes in the regions with programmes of technological modernisation of industrial enterprises)

Realisation of the advantages of the clustering model with the use of institutions to ensure the effective functioning of new instruments of innovative development creates preconditions for resolving contradictions in the cooperation between business, science and the

state, primarily in the processes of territorial and intra-cluster development.

The cluster approach is actively used in the current processes of transformation of the regional economy. This is due to the need to update and improve

the effectiveness of regional policy instruments in wartime, financial crisis and budget shortages to support regional enterprises and increase their competitiveness. At the same time, the most progressive regions have realised, based on an analysis of successful international experience, that the cluster approach is one of the most effective tools for modernising enterprises and ensuring the development of innovative sectors of the economy.

Socio-economic objects are usually quite complex and diverse. This is due to the fact that their formation is usually conditioned by the influence of a large number of different factors. A regional innovation and engineering cluster is a new entity whose main task is to provide organisational and economic conditions for the modernisation of industrial enterprises in order to build an export-oriented economy. The formation of such a cluster in the current conditions in Ukraine is due, on the one hand, to the realities of the existing divisional structure, currently one of the main concerns – SC "Ukroboronprom", and the urgent need for technological and innovative reengineering of the enterprises that belong to it. On the other hand, the formation of the RIEC is due to the influence of a significant number of factors not only on the process of organisational and economic formation of the cluster itself, but also on all mechanisms for managing the effectiveness of the cluster strategy.

Global corporate experience shows that there are several approaches to assessing the effectiveness of a cluster. One of the simplest but most effective approaches is to assess the synergistic effect of the cluster, when the total value of the cluster's members is greater than the sum of the values of these organisations. However, this approach is only possible in stable conditions and if there are sufficiently regular assessments of the business value of the cluster's enterprises. In modern conditions, when it is impossible to regularly assess the value of a business for various reasons, the methodology for forming the RIEC has been formulated.

At the preliminary stage, it is proposed to analyse and evaluate the following features that arise in the process of RIEC formation (except for the geographical one): V_1 – technological audit; V_2 – technology transfer network; V_3 – technological re-engineering; V_4 – engineering; V_5 – innovation environment (including regional governance institutions); V_6 – public-private partnership; V_7 – indicative planning of cluster development; V_8 – technological platforms; V_9 – regional authorities (a team of professional public managers who clearly represent and support cluster policy);

V_{10} – strategic guidelines of business formations; V_{11} – political stability and level of corruption; V_{12} – business (industrial enterprises represented by their top managers); V_{13} – scientific potential (research and design institutes, universities, technology parks, business incubators, IT hubs); V_{14} – strategic guidelines for regional development; V_{15} – national and international legislative framework.

Such a large number of factors significantly complicates the final result. Therefore, it is advisable to use a class of factor analysis methods that allow to reduce the number of variables and their generalisation [2, 3]. In our case, to systematise and classify the features, we conducted a factor analysis of the following features $V_i (i = 1, \dots, 15)$ [4, 5].

The initial data for the calculation of a number of the described indicators are aggregated official statistics. For example, such indicators of scientific potential as the Share of Industry Enterprises Engaged in Innovations and the Share of Industry Employees Engaged in R&D, indicators of the technology transfer network, and the business indicator are calculated on the basis of indicators from a sample survey of enterprises. Other indicators were built using the expert evaluation method based on statistical indicators of municipalities and processing the results of the expert survey. The expert assessment is determined on a scale from 0 to 10, where a higher value corresponds to a better value of the factor [12]. To determine the feasibility of performing factor analysis, the statistical programme for social sciences SPSS (Statistical Package for Social Sciences) was used. It was used to calculate Bartlett's criterion of sphericity and the Kaiser–Meyer–Olkin criterion of sample adequacy.

The Kaiser-Meyer-Olkin sample adequacy criterion is a value that determines the degree to which factor analysis can be applied to this sample. In our case, the value of this criterion was 0.519, which indicates low adequacy, but confirms the possibility of using factor analysis.

Bartlett's Sphericity Criterion is an indicator of multivariate normality for the distribution of variables. The criterion checks whether the correlations are different from 0. For our study, the indicator was 0.000, which indicates that the data are suitable for factor analysis.

As we can see, the value of the calculated indicators allows us to conclude that factor analysis is an acceptable method for analysing the correlation matrix [6]. According to the Kaiser criterion, we obtain five principal components (factors).

The first factor "Entrepreneurial climate" includes:

- innovation environment (including institutions);
- technology transfer network;
- public-private partnerships;
- national and international legal framework;
- political stability and the level of corruption.

The second factor "Cluster formation resources" includes the following features:

- regional authorities
- business
- science.

The third factor "Strategic guidelines for innovative development" includes:

- regional development strategy;
- strategy of business formations located in the region;
- indicative planning based on intensive ideology.

The fourth factor "Tools of technological modernisation" includes:

- technological audit;
- technological reengineering;
- engineering.

The last, fifth, factor contains only one variable – technological platforms, which will be considered as a separate factor in the further study.

Finally, we have five main factors that determine the synergistic regional effect of an industrial cluster: F1 – resources of cluster formation; F2 – technological platforms; F3 – tools of technological modernisation; F4 – entrepreneurial climate; F5 – strategic guidelines for innovative development. The values of the factors and their sequence were determined on the basis of a regression equation in the form of a linear combination of the values of the attributes and the value of the factor load.

Thus, factor analysis resulted in data reduction, after which the number of variables was reduced by three times (while maintaining their descriptive power). The calculated values of the five factors will be used in further analysis and are the basis for the formation of the RIEC in the regions. In addition to the selected five factors $F_i (i = \overline{1,5})$, the factor of geographical location was also added as a key factor, especially now. This factor influences the formation of an innovation and engineering industrial cluster.

Taking into account all these factors makes it possible to identify potential opportunities for the formation of an innovation and engineering industrial cluster in a particular territory.

The factors of RIEC influence are shown in Fig. 2 [7–9]. In the process of cluster analysis, we will take

into account that each cluster may contain a different number of enterprises. Therefore, the weighted pairwise average method was chosen as the clustering criterion. The problem of determining the most probable number of clusters was solved by hierarchical analysis with a randomly selected sample of observations [10].

Table 2 shows excerpts of the agglomeration table obtained using the aforementioned SPSS software. The columns provide an overview of the membership, which can be used to determine the order of cluster formation and the optimal number of clusters. As you can see, the first significant jump (from 4,995 to 5,475) occurred at iteration 113. Thus, the optimal number of clusters in this case is $134 - 113 = 21$. However, when analysing the table, we observe another significant jump in the coefficient – at the 123rd iteration (from 8.340 to 9.277). In this case, the rational number of clusters would be $134 - 123 = 11$.

Table 2. Data agglomerations (excerpt)

Stage	Cluster combined		Coefficients
	Cluster 1	Cluster 2	
1	20	49	0,550
2	15	37	0,693
3	11	47	0,697
4	23	41	0,700
5	20	34	0,728
6	31	44	0,811
7	19	29	0,846
8	36	48	0,931
9	10	35	0,957
10	13	24	0,984
...
110	20	71	4,536
111	10	16	4,696
112	30	130	4,879
113	39	43	4,995
114	15	31	5,475
115	23	36	5,739
116	6	14	5,957
...
121	22	73	7,456
122	2	4	7,701
123	6	10	8,340
124	20	61	9,277
125	2	6	9,402
126	12	62	9,984
127	20	22	10,030
128	7	20	10,857
129	2	7	11,706
130	17	30	13,546
131	2	17	15,625
132	2	12	16,813
133	1	2	17,368

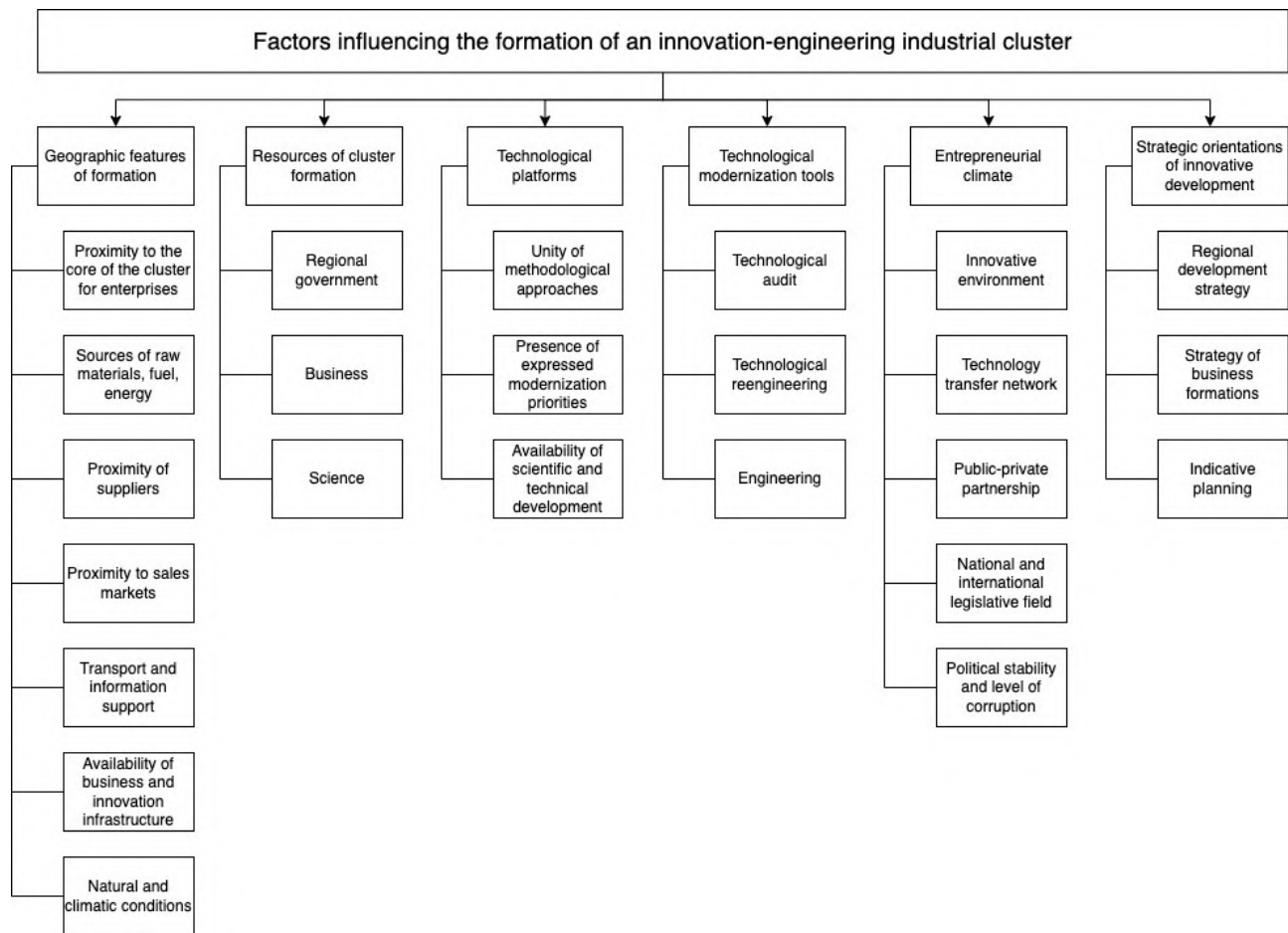


Fig. 2. Key factors influencing the formation of an innovation and engineering industrial cluster

Using the k-means method, we can see that with the number of clusters to be distributed at 21, some clusters are too small. Given the current state of the economy, this is not appropriate. When we choose the number of clusters to be 11, there are no small clusters. This suggests that it makes sense to divide the enterprises belonging to the military-industrial complex into 11 innovation and engineering clusters.

Thus, the proposed scheme of the algorithm for cluster zoning of the region integrates quantitative and qualitative methods for determining the clustering opportunities based on the enterprises of the military-industrial complex. Unlike existing approaches, the use of this algorithm allows not only to determine the clustering potential of the region, but also to model cluster formation with the identification of the composition of participants and the level of interaction between them. In addition to these tasks, the introduction of a cluster into the territory's economy requires an assessment of the actual or potential efficiency of its interaction with other economic entities in the region. In this regard, let us consider the issue of determining the level of clustering in the region.

The effectiveness of cluster formation is a fundamentally new type of effectiveness based, as it was justified earlier, on the integration of business, science and regional authorities. Cluster effects are understood as the result of the impact of a targeted and coordinated cluster policy on various performance indicators of industrial enterprises, scientific and educational institutions, indicators of socio-economic development of regions, including the standard of living and quality of life of its population. The cluster's activities are associated with the synergistic regional effect of the industrial cluster (SRE), which is due to the fact that within the cluster structures, the relations between the participants are streamlined and developed, becoming closer and more productive. As a result, firstly, clusters facilitate the exchange of resources and their joint use to increase efficiency; secondly, information circulates faster within the cluster network, which allows cluster members to respond quickly and adequately to external and internal changes, and make more informed and effective decisions; third, the developed relationships of cluster members in the production, sales,

financial, scientific and technical spheres help to implement joint projects that strengthen the position of enterprises in the occupied markets and facilitate entry into new ones. Having SREs and the ability to manage them creates a special competitive advantage.

As shown earlier, in addition to the geographical factor, five other major economic and political factors influence the formation of a cluster $F_i (i = \overline{1,5})$.

The complex interaction of these factors contributes to the emergence of the synergistic effect of SRE in the innovation and engineering industrial cluster, which allows the use of standard approaches to multivariate regression analysis [11].

Using the standard approach of calculating the determinant of the matrix of pairwise correlation coefficients between factors, it is not difficult to show the absence of multicollinearity between them. Since it is impossible to use statistical hypotheses about the density of distribution, in this case we will apply the method of group consideration of the argument, which belongs to the evolutionary algorithms of artificial intelligence [12, 13].

Let's divide the available data sample for 2009–2021 (W) into three subsamples (as proposed by O. Ivakhnenko, Academician of the Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine):

G – training subsample (data taken for 2009–2014);

C – test subsample (data taken for 2014–2019);

B – examination subsample (data taken for 2020–2021).

Using the training subsample G , we adjust the model parameters.

$$\varepsilon_G^2 = \left| (SRE)_G - W_G \times \overline{\alpha}_G \right|^2, \quad (1)$$

where W_G – subsample matrix G ;

$\overline{\alpha}_G$ – is the value of the parameter vector G , which was found by the least squares method (LSM):

$$\overline{\alpha}_G = \left[W_G^T \times W_G \right]^{-1} \times \left[W_G^T \times (SRE)_G \right]. \quad (2)$$

To determine the degree of functional range, a combined external criterion of model optimality is considered, built on the basis of combining the criterion of model consistency, as a criterion of bias and the criterion of predictability:

$$k^2 = \overline{\mu}_b \times s^2 + \Delta^2 (B/W), \quad (3)$$

where:

$$\overline{\mu}_b^2 = \left(\overline{\alpha}_G - \overline{\alpha}_C \right)^T \times W^T \times W \times \left(\overline{\alpha}_G - \overline{\alpha}_C \right), \quad (4)$$

$$\Delta^2 (B/W) = \frac{\left| (SRE)_W - W_G \times \overline{\alpha}_B \right|^2}{\left| (SRE)_W - \overline{(SRE)}_G \right|^2}. \quad (5)$$

Since the minimum of the external criterion (3) is achieved on a second-degree polynomial, we introduce a Kolmogorov–Gabor polynomial for the relationship (SRE) and the available factors, which is linear in parameters and nonlinear in factors:

$$(SRE) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^5 \alpha_i F_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \alpha_{ij} F_i F_j. \quad (6)$$

To calculate the coefficients of the regression equation (6), we use the least squares method, taking into account the orthogonality of the columns of the new matrix of elements of the orthogonal central compositional plan.

The reliability of the obtained results was assessed using Fisher's F-criterion. The obtained SREs in accordance with the data of the test sample using the proposed model (6) exceeded the real indicators provided. This suggests the existence of an effective interaction of the factors of the proposed methodology for building RIEC (Fig. 1).

Conclusions

Thus, the paper scientifically substantiates and proposes a structural model of an innovation and industrial cluster and defines the principles of functioning of its clusters, which will allow forming an effective strategy for the development of the regional economy. The approach to cluster zoning developed by the authors integrates quantitative and qualitative methods for determining the possibilities of clustering the regional economy, which creates a synergistic effect. This makes it possible not only to determine the potential for clustering in the region, but also to model cluster formation with the identification of the composition of participants and the level of interaction between them. A comprehensive indicator for assessing the importance of a cluster for the development of the territory is the increase in SRE due to the creation and development of this structure. Based on the developed model describing the SRE of RIEC, the article shows the positive role of regional clusters in identifying strategic niches of regional development, which determine the priorities and mechanisms of regional cluster policy.

References

1. Shevchuk, S. (2011). Definition of the concept of innovative economy. *Formation of market relations in Ukraine*. 2011. No. 1. P. 83–86. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/frvu_2011_1_21
2. Balanchuk, I.S., Mykhalechenkova, O.E. (2021). Technological platforms in the sphere of innovations – trends in Europe and Ukraine. *Science, technologies, innovations*. P. 14–24. DOI: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2021-2-03>
3. Fedirko O.A. (2015). European technological platforms as a mechanism of sectoral innovative development of the EU / *Scientific Bulletin of the International Humanitarian University*. URL: https://ir.kneu.edu.ua/bitstream/handle/2010/33371/Nvmgu_eim_2015_14_10.pdf
4. Voynarenko M. (2014). Clusters in the economy of Ukraine: monograph / *Khmelnytskyi: KNU*. 1085 p.
5. Jolliffe I.T. (2002) Principal Component Analysis, Series: Springer Series in Statistics, 2nd ed., Springer, NY, XXIX. 487 p. URL: [http://cda.psych.uiuc.edu/statistical_learning_course/Jolliffe%20I.T.%20Principal%20Component%20Analysis%20\(2ed.,%20Springer,%202002\)\(518s\)_MVsa_.pdf](http://cda.psych.uiuc.edu/statistical_learning_course/Jolliffe%20I.T.%20Principal%20Component%20Analysis%20(2ed.,%20Springer,%202002)(518s)_MVsa_.pdf)
6. Akhiezer E.B. (1996). The calculation of correlation matrices of some random processes. *Materials of international scientific-technical conference "Information ion technology: science, engineering, technology, education, health"*. – Kharkov. P. 15–17.
7. Zhernova P., Bodyanskiy Ye. (2018). Kernel fuzzy clustering of data streams based on the ensemble of neural networks. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. – № 4 (6). P. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.042>
8. Ryneiska L. S. Klasteri u suchasni hlobalni ekonomitsi [Clusters in today's global economy]. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua>
9. Korobova M., Lyashenko I., Stolyar A. (2006). Fundamentals of mathematical modeling of economic, ecological and social processes / *Educational book – Bohdan*, 304 p. URL: https://book-ye.com.ua/upload/iblock/7d4/c7fbefb1_dca3_11e6_80c1_000c29ae1566_b5448ce9_873d_11e7_80cf_000c29ae1566.pdf
10. Reshetnyak, O. (2020). Modeling rating of scientific and technological development of the countries. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. – 2020. № 1 (11). P. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.080>
11. Pryimak V. (2019). Mathematical methods of economic analysis // *K. Center of educational literature*. 296 p.
12. Dunaevskaya I. (2008). Multistage clustering in the traveling salesman problem of high dimension / O.V. Gray, I. Dunaevskaya // *East European journal of advanced technologies*. No. 5/5. P. 54–56.
13. Kostenko U. T., Ruskin L. G. (1996). Forecasting technical condition control systems. – *Kharkov: The Foundation*. 303 p.
14. Ivakhnenko A. G. (1975) Long-term prediction and control of complex systems. – *Kyiv: Tekhnika*. 311 p.
15. 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*, № 2 (8). P. 5–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.005>

Received 16.02.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Ахієзер Олена Борисівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувачка кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Харків, Україна; e-mail: elena_akhiezer@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>

Дунаєвська Ольга Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Харків, Україна; e-mail: dunaevskaya.olga.khpi@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0286-5991>

Роговий Антон Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри стратегічного управління, Харків, Україна; e-mail: rogoviy@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8178-4585>

Голотайстрова Галіна Олександрівна – Харківський національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Харків, Україна; e-mail: holotaistrovacmad@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8349-6571>

Решетняк Юрій Борисович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Харківський національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Харків, Україна; e-mail: reshyuri@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5597-5532>

Мехович Сергій Анатолійович – кандидат економічних наук, професор, Харківський національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри економічного аналізу та обліку, Харків, Україна; e-mail: Serhii.Mekhovich@khpi.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7080-7609>

Akhiiezer Olena – PhD, associate professor, Kharkiv national technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of The Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine.

Dunaievska Olha – PhD, associate professor Kharkiv national technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor of The Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine.

Rohovyi Anton – PhD, associate professor, Kharkiv national technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor of The Strategic Management Department, Kharkiv, Ukraine.

Holotaistrova Halyna – Kharkiv national technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor of The Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine.

Reshetniak Yurii – PhD, associate professor, Kharkiv national technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor of The Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine.

Mekhovich Serhii – PhD. Sciences, Professor, Kharkiv national technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of economic analysis and accounting, Kharkiv, Ukraine.

СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ ІННОВАЦІЙНО-ІНЖИНІРИНГОВОГО ПРОМИСЛОВОГО КЛАСТЕРУ Й АЛГОРИТМ ЙОГО ФОРМУВАННЯ

Предметом дослідження є використання промислових кластерів як інструментів для інноваційного зростання економіки. **Мета статті** – розроблення структурної, економіко-математичної моделі формування промислового кластеру та створення алгоритму кластерного зонування економіки. **Завдання**, що вирішуються: аналіз принципів інноваційного зростання; розроблення моделі інноваційно-інжинірингового промислового кластеру; опис методики формування регіонального інноваційно-інжинірингового кластеру; аналіз і оцінювання ознак, що виникають у кластерів; використання кластерного аналізу для систематизації, класифікації та зменшення кількості ознак. **Застосовані методи**: системний аналіз, проєктний підхід, інституціональна теорія, методи кластеризації, критерій сферичності Бартлетта та критерій адекватності вибірки Кайзера-Меєра-Олкіна, багатофакторний регресійний аналіз, F-критерій Фішера. **Здобуті результати**: визначено, що найкращим підходом до об'єднання основних складників інноваційного становлення, а саме державних органів, бізнесу та інститутів розвитку, є створення інноваційно-інжинірингових кластерів. Описано принципи створення та функціонування зазначених кластерів. Показано, що в основі алгоритму кластерної побудови регіонів лежить інтеграція кількісних і якісних методів ідентифікації та кластеризації економіки. Це дає змогу, на відміну від наявних підходів, не тільки ідентифікувати елементи кластеру, а й змоделювати рівні взаємодії між ними. Для оцінювання ефективності роботи кластеру запропоновано застосовувати синергетичний ефект від використання новоутвореної структури. **Висновки**: застосування регіональних інноваційно-інжинірингових кластерів дає змогу сформувати ефективну стратегію розвитку економіки регіону. Розроблений алгоритм кластерного зонування інтегрує кількісні та якісні методи визначення можливостей кластеризації економіки регіону. Комплексна взаємодія економіко-політичних чинників призводить до синергетичного ефекту й дає змогу моделювати кластерне утворення з виявленням складу учасників і рівня взаємодії між ними.

Ключові слова: інноваційно-інжиніринговий промисловий кластер; синергетичний регіональний ефект; факторний аналіз; кластерний аналіз.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ахїєзер О. Б., Дунаєвська О. І., Роговий А. І., Голотайстрова Г. О., Решетняк Ю. Б., Мехович С. А. Структурна модель інноваційно-інжинірингового промислового кластеру й алгоритм його формування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.005>

Akhiiezer, E., Dunaievska, O., Rogovyi, A., Holotaistrova, H., Reshetnyak, Y., Mykhovych, S. (2023). "Economic – mathematical model of formation of innovation and engineering industrial cluster", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.005>

A. BAKUROVA, I. DIVOCHA, S. KIYKO, O. YUSKIV

RECURRENT ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

The subject of the study is the study of models and methods for short-term forecasting of energy consumption in power systems based on recurrent analysis of time series. **The aim of the work** is a recurrent analysis of the time series of energy consumption of a metallurgical enterprise and the development of a program in the *Matlab* environment for automating calculations and experimental testing of data available for research in PJSC Electrometallurgical Plant "Dniprospetsstal" named after A. M. Kuzmin. The following **tasks** have been solved: the methodology for constructing recurrent diagrams and their quantitative analysis have been considered; a model of the time series and the phase trajectory of the time series was built to visualize the change in energy consumption during the day; software for constructing recurrent diagrams in the *Matlab* package was developed. **Methods were used:** analysis of time series based on recursive analysis to study the characteristics of the state of the system on the example of a metallurgical enterprise. **The results were obtained:** software was developed in the *Matlab* environment for short-term forecasting of energy consumption in power systems, and quantitative indicators were calculated that can be used to characterize the state of the system and analyze energy consumption in the summer and winter seasons. **Conclusions:** in the course of the study, software for constructing and quantitative analysis of recurrence diagrams in the *Matlab* package was developed, with the help of which patterns were discovered and information about the properties of the system under study was obtained. Based on the analysis of the average values of quantitative measures in the off-season for 2018–2021, it can be seen that the summer period is characterized by greater predictability, as well as a significantly higher latency indicator, which characterizes the average time when the system can spend in a more or less unchanged state. Confirmed on real data, the benefits of using the recursive analysis method for estimating electricity consumption, as well as more efficient modeling of this process, can lead to an increase in the accuracy of forecasting its future dynamics.

Keywords: recurrent diagram; energy consumption; time series; non-linear dynamics.

Introduction

Ferrous metallurgy is one of the most energy-intensive industries. It is characterized by high electricity consumption, which is a significant component of energy costs. Thus, the share of electricity in the production cost of large enterprises in the industry ranges from 11% to 16%, and in some cases its share increases to 30% [1].

The process of energy consumption in the metallurgical industry belongs to a complex dynamic system characterized by irregular behavior dynamics, which is manifested by both random and deterministic chaotic processes [2]. Observations of such systems and their experimental studies should be represented by time series – a discrete sequence of random variables, which are the values of the relevant indicators ordered by the time of their receipt. Time series also determine the state of the object of observation at certain points in time. The main purpose of time series analysis is to obtain information about the properties and mechanism of the system that generates this series. They are the basis for modeling such systems.

Planning the operating modes of the energy system is the most important task in managing it, and the

efficiency and economic profitability of a steel company depends on solving this task. For this purpose, a forecast of electricity consumption is developed, which is a basic indicator. The planning of the electricity distribution balance, as well as the modes of electricity supply, is based on the forecasted value of energy consumption. Thus, the accuracy and reliability of the forecast directly affects the technological and economic aspects of the power system. The data obtained from the system under study often demonstrate its non-stationary and complex behavior. In addition, such systems are often observed with very few measurements, providing short data series. Linear time-series analysis approaches are often insufficient for studying this kind of data, and most nonlinear analysis methods require either rather long or stationary data series. A relatively new method of studying the complexity of system dynamics is the construction of recurrent diagrams.

Recurrent analysis in the study of dynamic systems does not require a large amount of primary data, a time series of data from one measurement experiment is sufficient. Recurrent diagrams obtained in the process of time series analysis are based on a geometric structure. The main diagonal on a recurrent chart looks like a black

diagonal line – the identity line. The individual points on the chart do not contain any information, but together they allow you to reconstruct the properties of the process under study.

Recurrent analysis is based on the repeatability property of dynamic systems, which can be used to characterize the behavior of such a system in phase space. The advantage of this method is that it allows you to study the multidimensional trajectory of the phase space using a two-dimensional representation of its recurrence [3]. Using recurrent diagrams to analyze time series allows not only visualizing but also quantifying the structures hidden in the data.

Analysis of recent research and publications

Since the main method used for this study is recurrent analysis, we will provide a brief overview of the results on the development of this method. In an article published in 1987, Eckman, Kamphorst, and Ruel [4] proposed a new graphical procedure for visualizing patterns of repetition in data, which they called a recurrence chart. Thus, the way was paved for the introduction of a modern tool for nonlinear data analysis, which made it possible to overcome the difficulties in studying non-stationary and rather short time series.

Among the advantages of the developed method are simplicity of implementation and interpretation, as well as fewer preliminary data requirements. However, recurrent charts were only a visual and qualitative tool, meaning that the user had to search for and interpret the identified patterns and structures on his or her own, which meant that the results were not always convincing. Therefore, the next stage in the development of recurrent analysis was the method of quantitative analysis of structures formed in the image of a recurrent diagram. Modern research has shown that a recurrent diagram contains all the necessary information about the dynamics of a system. The works of such scientists as Joe Zbilut [5], Norbert Marwan [6], Marco Thiel [7], Carmen Romano [8], and others have significantly enriched the capabilities of this method over the past decade.

Examples of the practical application of the recurrent analysis method in the financial sector are given in [9], where the optimal values of input parameters and appropriate measures for analyzing financial time series are determined in order to build a market-monitoring tool.

Paper [10] analyzes the possibility of using recurrent analysis to detect signals and process observations.

It is shown that the presence of noise in observations worsens the quality of signal detection using the numerical characteristics of recurrent charts.

A method for quantifying the phase trajectory of the process under study using recurrent diagrams and their quantitative analysis was proposed in [11] and the results of applying this method to model and real systems are presented. For this purpose, an assessment of the possibilities of using this method is presented.

The use of recurrent analysis for modeling and predicting the nonlinear dynamic properties of complex systems is considered in [12]. The concepts of phase space reconstruction, recurrent analysis, recurrent diagrams, and their characteristics, such as topology homogeneity, drift, contrast topology, and process laminarity, are presented.

In [13], a comparative recurrence and entropy analysis of realizations of electrical bio signals with fractal properties was performed. It is shown that the information characteristics of the experimental results reflect the features of the fractal and correlation structure of bio signals. With the help of the developed decision support system, model and experimental implementations have been investigated, which have shown the feasibility of using information characteristics for the recognition and classification of fractal time series.

Among the considerable number of publications on the use of the recurrent analysis method, there is not a single example of the application of this method to the analysis of energy consumption in metallurgy. Therefore, this article is devoted to this area of research.

Statement of the problem

In the study of energy consumption in metallurgical production, there is a need to analyze short time series, which is associated with:

- a significant number of electrical equipment used in the technological process in each unit;
 - a wide variety of types and capacities of electricity receivers;
 - relatively weak links of mutual influence of electricity receivers during the technological process;
 - a significant amount of electrical equipment that ensures the technological process in each unit and creates a conditionally constant load, which also depends on the intensity of the technological process;
 - factors that accidentally affect the mode and volume of energy consumption;
-

- a large number of hours of maximum electrical power utilization;
- significant power consumption of the types of final products;
- the possibility of changing the operating modes and composition of equipment in the units, product mix and other systematic factors [2].

Therefore, the purpose of this article is to recurrently analyze short time series of energy consumption of a metallurgical enterprise and develop a program in *Matlab* to automate calculations.

To achieve this goal, the following tasks need to be accomplished

- to study the theoretical foundations of the method of building recurrent diagrams and their quantitative analysis;
- develop software for building and analyzing recurrent diagrams;
- to apply the method to real data describing a complex dynamic system of hourly electricity consumption at a metallurgical enterprise;
- to identify patterns and obtain information about the properties of the system under study;
- to draw conclusions from theoretical and practical results of the study;
- to evaluate the effectiveness of the method under consideration.

Materials and methods

The essence of recurrent diagrams is to visualize the functional activity and dynamics of systems based on the results of observation, which allows you to understand the basic properties and structures. Dynamic systems, i.e. systems in which parameters change over time, are described by observing changes in their states and indicating the functional dependence of the system's state on the values at its inputs at specific moments in time. In the mathematical sense, any dynamic system can be represented as the movement of a corresponding point in a phase space, or state space. The main characteristic of such a space is its dimension. The number of quantities that determine the state of the system determines the dimension of the phase space. Each of these quantities is a phase coordinate in this space, and their combination forms a vector that describes the state of the system. Each state of the system corresponds to a certain point in the phase space - a representation point. The sequence of these points in the phase space reflects the movement of the system or, more precisely, the change of system

states, and corresponds to a certain trajectory, which is called a phase trajectory. The projection of the phase trajectory onto the phase plane forms a phase portrait. The graphical representation of the phase trajectory characterizes the behavior of the system. In the study of complex systems, they can often be characterized even by a single observable indicator measured at discrete points in time D_i , since it is either impossible or very difficult to measure other indicators. The interval D_i can be a constant value or random, although in the latter case it creates additional and sometimes significant difficulties in processing the observed data. The interactions in complex systems are such that the resulting phase trajectory, which preserves the structure of the original phase trajectory, can be recovered, according to Tuckens' theorem [13], from a single time series by the time-delay method. That is, if we have a time series $X(t) = x(t_1 + \Delta t), x(t_2 + \Delta t), \dots, x(t_n + \Delta t)$, then, using the time delay method, for example, in our case $\Delta t = 1$, we obtain the series $\Delta t = 1$ $X(t) = x(t_1 + \Delta t), x(t_2 + \Delta t) \dots x(t_n + \Delta t)$. The pairs of values $(x(t_i); x(t_i + \Delta t))$ are the phase coordinates of the image point on the phase plane, which reproduces the phase trajectory of the system states. Graphically, the dynamics of the system in a limited area of the phase plane is represented by the image of phase trajectories. Over time, the system tends to return to a certain state, to some extent close to the past, and goes through similar states of evolution.

Let us consider in more detail the method of recurrent analysis, referring to the work of N. Marwan et al. [14].

Nonlinear data analysis is based on the study of phase space trajectories. Elements of the phase space are possible states of the system under study. Let's assume that the state of such a system at a fixed time t can be specified by d components. These parameters form a vector in the d -dimensional phase space of the system:

$$\vec{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_d(t))^T. \quad (1)$$

Thus, a vector $\vec{x}(t)$ defines a trajectory in phase space.

The recurrent diagram maps the trajectory $\vec{x}_i \in R^d$ in d -dimensional phase space to a two-dimensional square binary matrix of size $N \times M$:

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), i, j = 1, \dots, N, \quad (2)$$

where N – number of states \vec{x}_i ;

ε – threshold distance;

$\theta(\cdot)$ – Heaviside function ($\theta(x) = 0$, if $x < 0$, &
 $\theta(x) = 1$ otherwise);

$\|\cdot\|$ – norm.

The shape of the circle, characterized by the parameter ε_i , is determined by the type of selected norm and is centered on the point \vec{x}_i , that is, the radius of the circle in phase space centered at the point \vec{x}_i . In the case of a one-dimensional time series, instead of a figure's circle, there is an interval with the center at the point \vec{x}_i . If a point \vec{x}_j is in the middle of this circle, then this state \vec{x}_j is considered similar to the state \vec{x}_i , and a point $R_{i,j} = 1$ is placed on the diagram. Radius ε_i can be permanent for all \vec{x}_i , and can be determined for each point separately, so that the resulting circle always includes a certain number of similar states. The constant value of ε_i , which leads to a symmetric recurrent diagram with respect to the line $R_{i,j} = 1$, if $(i = j)$ is the main diagonal of the distance matrix.

In other words, recurrence \vec{x}_i and \vec{x}_j is defined as the closeness of a state \vec{x}_i to the state \vec{x}_j . In the process of constructing recurrence diagrams, the norm L_∞ is mainly used due to its simplicity and speed of calculation.

The recurrence diagram is obtained by constructing the recurrence matrix (2) and using different colors for its binary values (usually black for $R_{i,j} = 1$ and white for $R_{i,j} = 0$), and both coordinate axes are time axes. Since, by definition, $R_{i,j} = 1$ under the condition $i = j$, the recurrent diagram always contains a black main diagonal line – the identity line. In addition, the definition implies that the recurrence diagram is symmetric about the main diagonal, since $R_{i,j} = R_{j,i}$ for any $i, j = \overline{1, N}$.

The main purpose of recurrent diagrams is to visually analyze trajectories in multidimensional phase spaces, which gives an idea of the evolution of these trajectories over time. A recurrent diagram is characterized by large-scale and small-scale structures that are caused by the dynamic state of the system.

Large-scale structures give a general idea of the nature of the process under study. As a rule, the following large-scale structures of recurrent charts are distinguished:

- a) homogeneous, which is typical for stationary and autonomous systems;
- b) periodic, which corresponds to oscillating systems;

c) drift corresponds to systems with slowly changing parameters;

d) contrasting areas or bands correspond to systems with sharp changes in dynamics.

Small-scale structures include:

a) diagonal lines reflecting similar local evolution of different parts of the trajectory;

b) horizontal and vertical lines indicate a state that does not change for some time or changes very little;

c) separately located recurrent points, but they do not contain information about the state of the system.

Quantitative analysis allows to calculate measures of the complexity of recurrent diagram structures based on the density of recurrent points, diagonal, vertical and horizontal lines.

The recurrence rate reflects the density of recurrent points:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N RR_{i,j}. \quad (3)$$

The following measure is based on diagonal lines of length l , namely:

$$P(l) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i-1,j-1})(1 - R_{i+1,j+1}) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k}. \quad (4)$$

The ratio of the number of recurrent points that are components of diagonal lines (of minimum length l_{\min}) to the total number of recurrent points is called the rate of determinism, or predictability of the system:

$$DET = \sum_{l=l_{\min}}^N IP(l) / \sum_{l=1}^N IP(l). \quad (5)$$

Processes with stochastic or chaotic behavior generate very short diagonals or no diagonals at all, while deterministic processes produce long diagonals and a small number of separate, isolated recurrent points. That is, as the stochastic influence decreases, the value of the determinism measure will increase.

The length of the diagonal line reflects the period during which different segments of the trajectory pass close enough to each other at different times. Therefore, such lines are associated with the divergence of trajectory segments.

The average length of the diagonal lines reflects the average time during which two trajectory segments pass close to each other and can be considered as the average time of predictability:

$$L = \sum_{l=l_{\min}}^N IP(l) / \sum_{l=l_{\min}}^N P(l). \quad (6)$$

Maximum length of diagonal lines and divergence:

$$L_{\max} = \max \{l_i\}_{i=1}^{N_l}, DIV = \frac{1}{L_{\max}}, \quad (7)$$

where N_l – total number of diagonal lines.

The faster the trajectory segments diverge, the shorter are the diagonal lines and the higher is the rate DIV . The inverse of the maximum length of the diagonal lines can also be interpreted as the value directly related to the maximum positive Lyapunov exponent, if it exists for this system [15].

The entropy rate is found by the Shannon entropy, to calculate which probability $p(l) = \frac{P(l)}{N_l}$ we find

a diagonal line of length l :

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l). \quad (8)$$

This rate reflects the complexity of the recurrence diagram with respect to the diagonal lines. That is, for example, for uncorrelated noise, the ENTR value is quite small, which indicates its insignificant complexity.

The next rate was defined as the ratio between DET and RR , namely:

$$RATIO = N^2 \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP(l)}{\left(\sum_{l=l_{\min}}^N IP(l) \right)^2}. \quad (9)$$

This relation can be used to recognize phase transitions in cases where the RR rate decreases and the DET rate remains constant.

Next, consider a rate based on vertical lines of length v , namely:

$$P(v) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i,j}) (1 - R_{i,j+v}) \prod_{k=0}^{v-1} R_{i,j+k}. \quad (10)$$

The laminarity rate is determined by the ratio of the number of recurrent points that form vertical lines (of minimum length v_{\min}), to the total number of recurrent points:

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N vP(v)}{\sum_{l=l_{\min}}^N vP(v)}. \quad (11)$$

This value characterizes the presence of system stalling states, i.e. when the system's movement along the phase trajectory stops or moves very slowly.

The average length of the vertical lines, that is called the trapping time rate, reflects the average time

during which the system will be in a certain state, or how long this state will remain unchanged:

$$TT = \sum_{v=v_{\min}}^N vP(v) / \sum_{l=l_{\min}}^N vP(v). \quad (12)$$

Let us further consider the application of quantitative characteristics to the analysis of short time series of energy consumption of a metallurgical enterprise.

Research results and their discussion

The study was conducted on the basis of observations of the complex dynamic system of hourly electricity consumption at PrJSC "Dneprospetsstal" [2] during 2018–2021.

To illustrate the results of constructing recurrent diagrams, let us consider, for example, the time series of hourly energy consumption for February 04 and July 04, 2021. The recurrence of the trajectory in phase space is expressed by matrix (2). Therefore, for the studied series, we set $N = 23$, $\varepsilon = 10000$. The recurrent daily diagrams obtained in *Matlab* are shown in figs. 1 and 2.

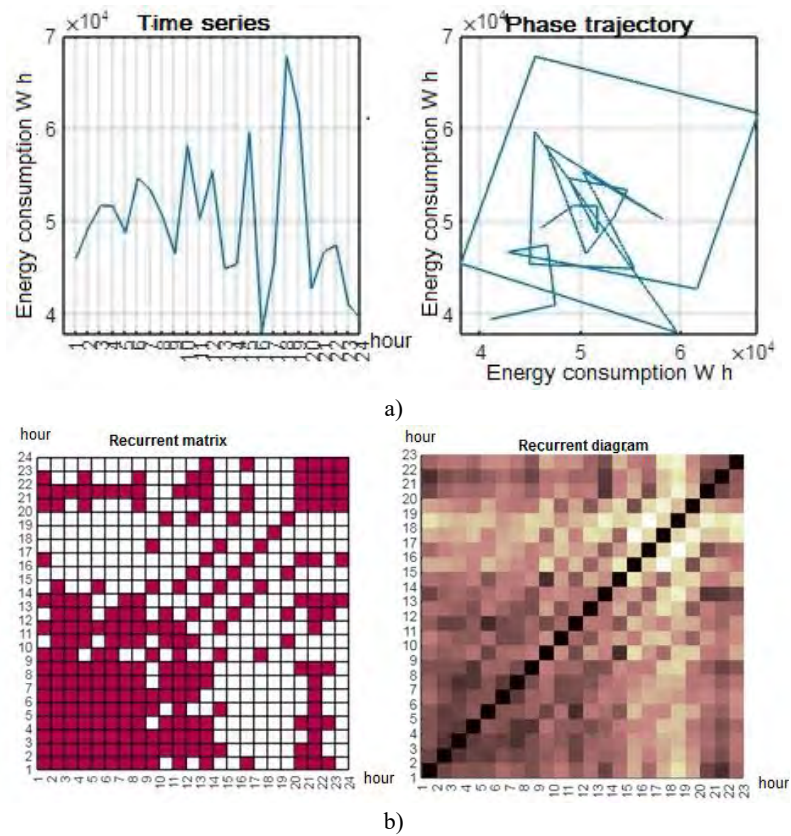
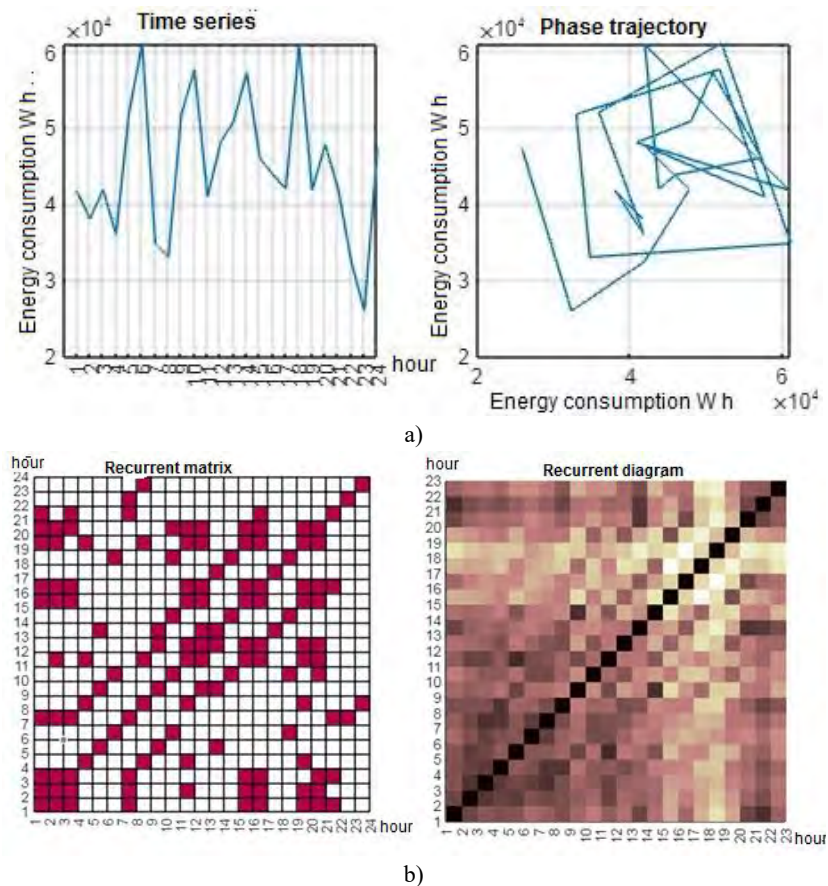
Below, in figs. 3 and 4, recurrent diagrams are shown for the time series of winter and summer seasons. They are based on the average daily energy consumption for winter and summer in 2018–2021.

The recurrent diagrams in figs. 1–4 make it possible to distinguish contrasting areas corresponding to sharp changes in the system dynamics.

For a more detailed study of the obtained recurrent diagrams, we developed *Matlab* software that automates the calculation of quantitative indicators of the formed structures of recurrent diagrams for given time series. To calculate the quantitative measures, the values of $l_{\min} = v_{\min} = 2$ are taken.

With the help of the developed software in the *Matlab* environment, the process of energy consumption at a metallurgical enterprise was analyzed and the dynamics of its quantitative indicators was evaluated (Table 1).

Given the results obtained, we also analyzed the dynamics of the quantitative indicators of the system over time, since the dynamics of the calculated complexity measures is an indicator of changes in the state of the system. The graphs shown in figs. 5 and 6 show the dynamics of quantitative measures by days of the month for the winter and summer periods, respectively.

Fig. 1. Recurrent daily diagrams built in *Matlab* for February 04, 2021Fig. 2. Recurrent daily diagrams built in *Matlab* for July 04, 2021

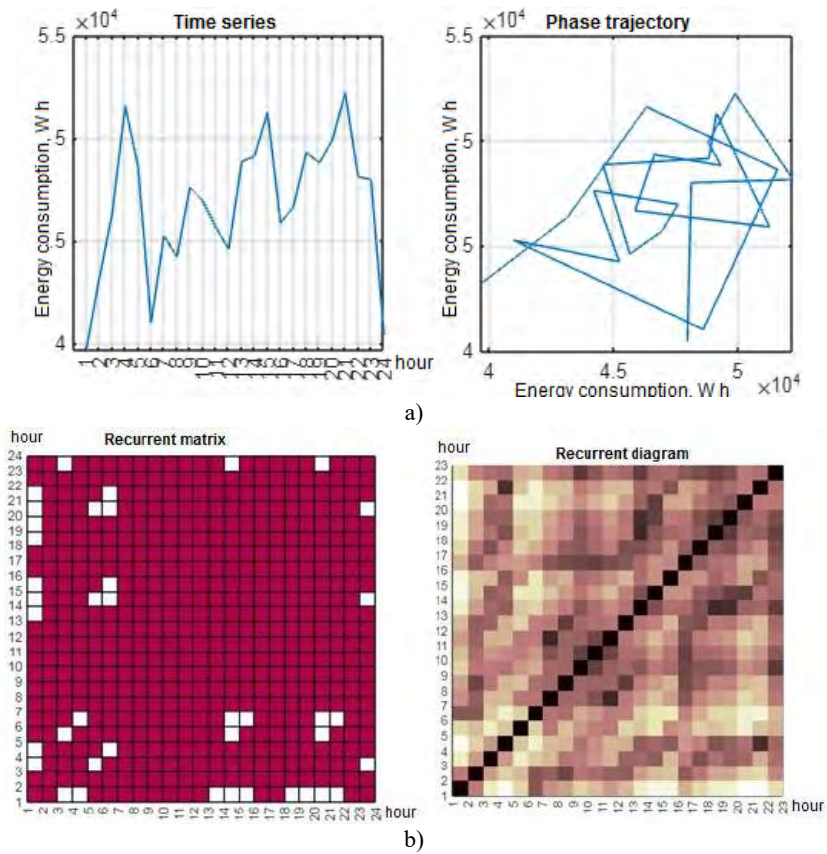


Fig. 3. Recurrent charts built in *Matlab* for the winter period (2018–2021)

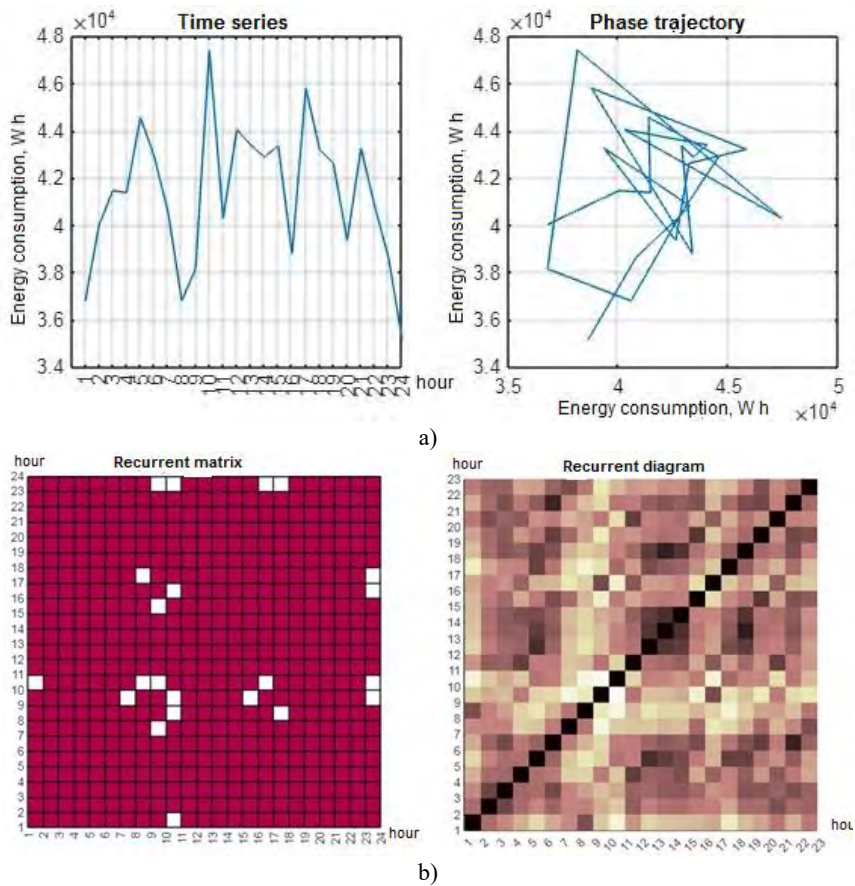
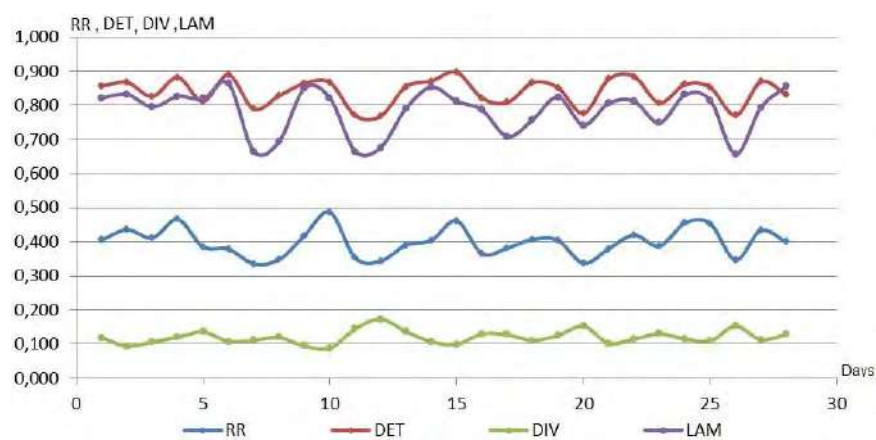
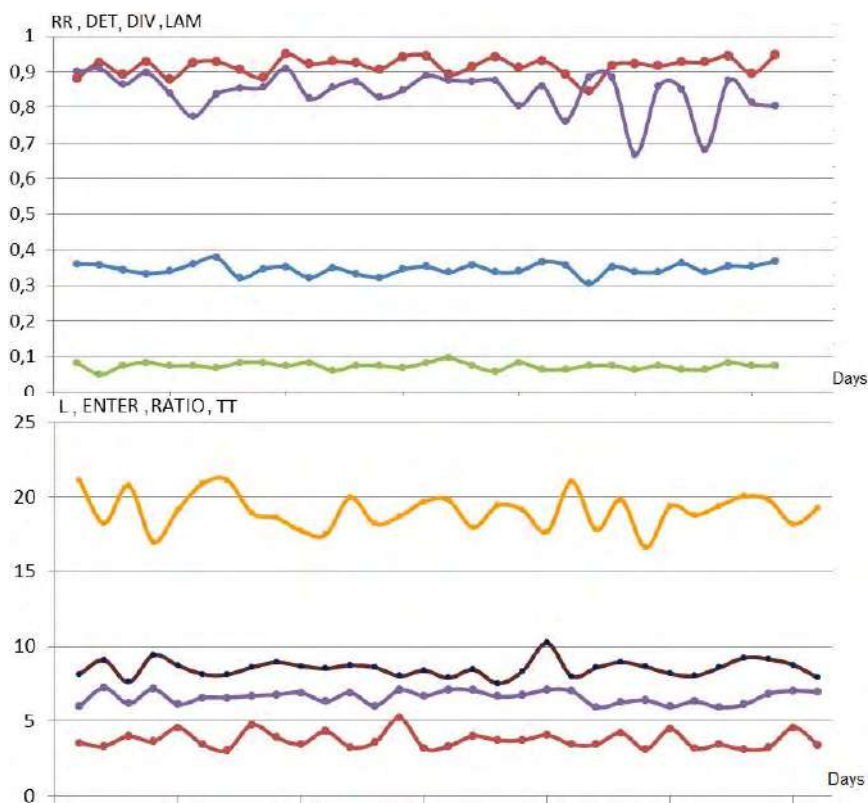


Fig. 4. Recurrent charts built in *Matlab* for the summer period (2018–2021)

Table 1. Indicators of quantitative analysis of recurrent charts

	RR	DET	L	DIV	ENTR	RATIO	LAM	TT
winter period								
2018	0,3791	0,7728	3,2907	0,1452	10,0034	4,4158	0,7141	3,2484
2019	0,4118	0,8211	3,2966	0,1467	11,898	3,7866	0,7455	3,4923
2020	0,3675	0,9543	7,6927	0,0434	23,9239	3,0806	0,9351	10,0549
2021	0,4386	0,8109	3,2660	0,1462	12,7020	3,7324	0,7369	3,4523
summer period								
2018	0,2959	0,7872	2,2999	0,1627	8,9675	5,5494	0,6606	3,1756
2019	0,3598	0,9548	7,9089	0,0435	23,1336	3,1477	0,9206	10,3593
2020	0,3770	0,9669	7,9860	0,0435	23,0838	3,013	0,9077	9,9727
2021	0,3491	0,9474	8,2313	0,0435	21,1106	3,2213	0,8812	10,5858

**Fig. 5.** Dynamics of changes in quantitative measures over the winter period**Fig. 6.** Dynamics of changes in quantitative measures over the summer period

These graphs show that the measures calculated for the set of recurrent diagrams are quite stable. This confirms the thesis about the presence of a deterministic component in the system, which is determined by the technological features of the enterprise's production processes.

Discussion

Using the developed software in the *Matlab* environment, we analyzed energy consumption based on observations of the complex dynamic system of hourly electricity consumption of PrJSC "Dneprospeksstal" for four years and evaluated the dynamics of quantitative indicators of the corresponding recurrent diagrams [16].

As noted earlier, in recurrent analysis, an essential feature characterizing deterministic processes is the presence of lines parallel to the main diagonal. The greater the number of points on the diagonal lines, the greater the deterministic component of the series. The quantitative rates *DET*, *DIV* and *ENTR*, described by equations (6), (8), and (9), respectively, are based on this fact. The average length of the diagonal lines L (16) is also a meaningful measure, because it takes into account the length of different lines, while *DET* counts all points on parallel lines regardless of their length. Thus, for purely random processes, the value *DET* will be very small (close to zero), while processes with some deterministic component will correspond to values of this rate that are much larger than zero (close to one). Similarly, the higher the value of L , the higher the probability that the process is deterministic.

The average values of the entropy rate and (*ENTR*) are also quite high, which indicates the complexity of the obtained recurrence diagrams with respect to diagonal lines. Thus, we can conclude that the studied series contain a certain deterministic component, which is determined by the technological features of the enterprise's production processes. Deterministic processes result in long diagonals and a small number of individual recurrent points. The average length of the diagonal lines, which is related to the time of predictability of the dynamic system, corresponds to the value of 5.4. The average length of the vertical lines, which reflects

the time during which the system remains in a certain state, corresponds to 3.8.

The average value of the laminarity rate (*LAM*) is also quite high, which indicates the presence of system laminarity states, i.e., when the system's movement along the phase trajectory stops or moves very slowly.

The recurrence rate (*RR*) is close to 0.35 on average. That is, the probability of repeating a certain state of electricity consumption during a period (month) is 35%.

Taking into account the analysis of the average values of quantitative measures in the off-season, we can see that greater predictability, as well as a much higher delay indicator, which characterizes the average time when the system can remain in a more or less unchanged state, characterize the summer period.

The application of the recurrence analysis method to the time series of electricity consumption can contribute to a positive economic effect in the future by improving the energy efficiency of a metallurgical enterprise.

Conclusion

The scientific and applied novelty of this work is the application of the method of building recurrent diagrams to the analysis of a complex dynamic system of hourly electricity consumption by a metallurgical enterprise. The method was applied to real data represented by short time series. In the course of the study, software for the construction and quantitative analysis of recurrent diagrams in the *Matlab* environment was also developed, which helped to identify patterns and obtain information about the properties of the system under study.

The practical significance of this work is the benefit of applying the recurrent analysis method to the assessment of electricity consumption, as well as modeling this process, which will help to improve the accuracy of forecasting its future dynamics.

In further research, it is planned to analyze the impact of noise in energy consumption observations on the quality of signal detection using the numerical characteristics of recurrent diagrams.

References

1. Mazur V. L. (2010), Metallurgy of Ukraine: camp, competitiveness, prospects, *Metallurgical and mining industry*, Vol. 2, P. 12–16.
2. Kiyko S. G. (2021), Methodology of predictive adaptation of energy saving project portfolio management at metallurgical enterprises. – Qualification of scientific work on the rights of a manuscript. Dissertation for the degree of doctor of technical sciences for the specialty 05.13.22 – project management and programs. – Private joint-stock company "Electrometallurgical plant "Dniprospeksstal" named after A. M. Kuzmin", Zaporizhzhya, 420 p.
3. *New methods of analysis and forecasting of hourly series in financial markets*, available at: // http://www.rusnauka.com/13_EISN_2013/Economics/4_136384.doc.htm (last accessed: 11.04.2022).
4. Eckmann, J., Kamphorst, S., Ruelle (1987), Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters*, No. 4 (9), P. 973 – 977.
5. Butko M. (2021), Model of thematic interpretation of view images, *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2(16), P. 5 – 11. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.005>
6. Zou Y., Romano MC., Thiel M., Marwan M., Kurths J. (2011), Inferring direct coupling by means of recurrences, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 21, No. 21 (4), P. 1099 – 1111. DOI: 10.1142/S0218127411029033
7. Thiel M., Romano MC., Kurths J., Rolfes M., Klieg R. (2008), Generating surrogates from recurrences. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, No. 366, P. 545 – 557.
8. Piskun O.V. (2011), Peculiarities of using recurrent charts and recurrent quantitative analysis for the study of financial time series, *Financial space*, No. 3 (4), P. 111 – 118.
9. Vasyuta K. S., Tansyura O. B., Revin O. V. (2013), Development of radio signal detection methods in radio engineering systems using recurrent analysis, *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, No. 2 (11), P. 135 – 139.
10. Kiselev V. B. (2007), Determining the stability of the process trajectory in the phase space with the help of recurrent analysis, *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics of SPbSU ITMO*, No. 6 (40), P. 121 – 130.
11. Kaminsky R.M., Runner G.V. (2015), Construction of recurrent charts of short time series using MS Excel, *Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, No. 2 (82), P. 152 – 161.
12. Takens F. (1981), Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*, edited by D.A. Rand L.S. Young. Heidelberg: Springer-Verlag, 366 p.
13. Kirichenko L.O., Kobyt'skaya Yu.A., Demyna N.A. (2015), Analysis and recognition of realizations of signals possessing fractal properties, *Bionics of intelligence*, No. 1 (84), P. 49 – 56.
14. Marwan N., Romano M. C., Thiel M., Kurths J. (2007), Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems, *Physics Reports*, 438 p.
15. Choi J. M., Bae B. H., Kim S. Y. (1999), Divergence in perpendicular recurrence plot; quantification of dynamical divergence from short chaotic time series, *Physics Letters A*, No. 26 (4 – 6), P. 299 – 306.
16. Bakurova A.V., Divocha I.O., Kiyko S.G., Yuskiv O.I., Recurrent analysis of energy consumption of a metallurgical enterprise, *Science Week 2022: annual scientific-practical conf. teachers, scientists, young scientists, post-graduate students and students of higher education of Zaporizhzhya Polytechnic National University, April 18–22, 2022*, P. 884 – 886.

Received 16.01.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Бакурова Анна Володимирівна – доктор економічних наук, професор, Національний університет "Запорізька політехніка", професор кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; e-mail: abaka111060@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6986-3769>

Дівоча Ірина Олександрівна – магістр системного аналізу, Національний університет "Запорізька політехніка", магістр кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; e-mail: abaka111060@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2259-6952>

Кійко Сергій Геннадійович – доктор технічних наук, голова правління ПрАТ "Електрометалургійний завод "Дніпроспецсталь" ім. А. М. Кузьміна", Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4676-5722>

Юськів Олесь Ігорівна – Національний університет "Запорізька політехніка", аспірант кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; e-mail: yuskivolesya66@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7669-7647>

Bakurova Anna – Doctor of Sciences (Economics), Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Professor of the Department of Systems Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia, Ukraine.

Divocha Iryna – Master of Systems Analysis, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Master of the Department of Systems Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia, Ukraine.

Kiyko Sergiy – Candidate of Technical Sciences, Chairman of the Board PJSC Electrometallurgical Plant "Dniprospestal" named after A. M. Kuzmin, Zaporizhzhia, Ukraine.

Yuskiv Olesia – National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Postgraduate Student of the Department of Systems Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia, Ukraine.

РЕКУРЕНТНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Предметом дослідження є моделі та методи для короткострокового прогнозування енергоспоживання в енергосистемах на основі рекурентного аналізу часових рядів. **Мета роботи** – рекурентний аналіз часових рядів енергоспоживання металургійного підприємства та розроблення програми в середовищі *Matlab* для автоматизації обчислень і експериментальне випробування доступної інформації ПрАТ "Електрометалургійний завод "Дніпроспецсталь" ім. А. М. Кузьміна". **Виконані такі завдання:** розглянуто метод побудови рекурентних діаграм та їхній кількісний аналіз; побудовано модель часового ряду та фазової траєкторії часового ряду для візуалізації зміни енергоспоживання протягом доби; розроблено програмне забезпечення для побудови рекурентних діаграм у пакеті *Matlab*. **Використано метод** аналізу часових рядів на основі рекурентного аналізу для дослідження характеристик стану системи на прикладі металургійного підприємства. **Здобуті результати:** розроблено програмне забезпечення в середовищі *Matlab* для короткострокового прогнозування енергоспоживання в енергосистемах; розраховано кількісні показники, що можна застосовувати для характеристики стану системи й аналізу енергоспоживання в міжсезоння. **Висновки:** у процесі дослідження розроблено програмне забезпечення для побудови та кількісного аналізу рекурентних діаграм у пакеті *Matlab*, за допомогою якого виявлено закономірності та отримано інформацію про властивості досліджуваної системи. З огляду на аналіз середніх значень кількісних мір у міжсезоння за 2018–2021 рр. можна бачити, що літній період визначається більшою передбачуваністю, а також значно вищим показником затримки, який характеризує середній час, коли система може залишитися в більш-менш незмінному стані. Реальними результатами підтверджено користь застосування методу рекурентного аналізу для оцінювання споживання електроенергії, а також ефективнішого моделювання цього процесу, що може сприяти більш точному прогнозуванню його майбутньої динаміки.

Ключові слова: рекурентна діаграма; енергоспоживання; часовий ряд; нелінійна динаміка.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бакурова А. В., Дівоча І. О., Кійко С. Г., Юськів О. І. Рекурентний аналіз енергоспоживання металургійного підприємства. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.014>

Bakurova, A., Divocha, I., Kiyko, S., Yuskiv, O. (2023), "Recurrent analysis of energy consumption of a metallurgical enterprise", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.014>

Т. БАТЮК, Д. ДОСИН

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ТОНАЛЬНОСТІ ТА КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ПУБЛІКАЦІЙ У СОЦІАЛЬНІЙ МЕРЕЖІ TWITTER

Завдяки інтенсивному розвитку соціальних мереж постійно зростає популярність обміну короткими текстовими повідомленнями, тональність яких може бути чутливим індикатором суспільних настроїв і важливих соціальних явищ, цікавих для соціологів, політиків, економістів і фахівців інших галузей. У зв'язку з цим завдання автоматизації опрацювання таких природномовних повідомлень має вагомий науковий і практичний інтерес. **Об'єктом** дослідження є тональність користувацьких публікацій у соціальній мережі *Twitter*. Завдяки широкій популярності цієї соціальної мережі та великій кількості повідомлень, лаконічних за своєю сутністю, можна зручно визначати настрої користувацьких публікацій та об'єднувати їх у кластери відповідно до заданих параметрів інтелектуальної системи. **Предметом** дослідження є методи й алгоритми аналізу тональності великих масивів повідомлень, що містять необхідні ключові слова та стосуються конкретної теми, визначення факторів та розподілів тональності повідомлень, з огляду на вхідний масив даних системи, поділ повідомлень на основні групи та надання оцінок у визначених межах кожній групі, поділ на кластери відповідно до отриманої точки пошуку та відображення отриманих результатів у потрібному форматі. **Мета роботи** – реалізація інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій на основі рекурентної нейронної мережі довгої короткочасної пам'яті (LSTM) та алгоритму кластеризації *k-means*. У статті передбачається вирішити такі основні **завдання**: проаналізувати найбільш уживані та найновіші алгоритми, методи, підходи та засоби імплементації завдань аналізу тональності й кластеризації публікацій у соціальних мережах; розробити концептуальну структуру інтелектуальної системи аналізу тональності й кластеризації публікацій; сформулювати функціональні завдання до ключових модулів створюваної інтелектуальної системи аналізу тональності й кластеризації публікацій у соціальній мережі *Twitter*; реалізувати інтелектуальну систему аналізу тональності й кластеризації публікацій на основі рекурентної нейронної мережі та алгоритму кластеризації *k-means* і експериментально її перевірити. У роботі застосовано **методи**: рекурентна нейронна мережа довгої короткочасної пам'яті; алгоритм кластеризації *k-means*. Здобуто такі **результати**: проаналізовано, спроектовано й побудовано загальну структуру інтелектуальної системи аналізу тональності й кластеризації публікацій. Основним завданням створення системи насамперед було покращення рекурентної нейронної мережі довгої короткочасної пам'яті, що, завдяки вдосконаленому алгоритму, суттєво полегшує опрацювання повідомлення обробниками природної мови відповідно до текстових даних певного розміру. Також одночасно використано особливий алгоритм кластеризації, а саме *k-means*, завдяки чому вдалося змінити загальний підхід до кластеризації та створення фінальних кластерів, відповідно до здобутих результатів роботи рекурентної нейронної мережі. **Висновки**: унаслідок застосування комбінації LSTM нейронної мережі та алгоритму кластеризації *k-means* вдалося прискорити процес аналізу тональності й кластеризації публікацій у соціальній мережі *Twitter* на 10...15% порівняно з аналогічними згортковими нейронними мережами та ієрархічною кластеризацією.

Ключові слова: нейронна мережа; LSTM; аналіз тональності публікацій; кластерний аналіз; соціальна мережа *Twitter*.

Вступ

Створення та імплементація інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій є актуальним та перспективним завданням, оскільки сьогодні більшість комунікацій між людьми відбувається саме в соціальних мережах. Кожне повідомлення користувача соціальної мережі має конкретну семантику, відображає певні думки автора й аналіз відповідної ситуації та/або є реакцією на певну подію. Сучасні алгоритми та підходи до аналізу даних дають змогу ефективно та відносно просто здійснювати аналіз значних обсягів текстових даних, завдяки чому можна визначити середню

тональність реакцій користувачів на певні події і, як наслідок, робити висновки щодо проаналізованого контенту. Таким чином можна зрозуміти відношення різних груп користувачів до певного виду контенту, товарів та інших ринкових пропозицій, і великі бренди та корпорації активно застосовують ці підходи до аналізу інформації шляхом визначення тональності користувацького тексту й подальшого поділу цього тексту й, відповідно, самих користувачів на кластери для подальшої роботи з отриманими кластерами.

Для реалізації такого роду алгоритмів насамперед необхідно визначити, яких саме користувачів ми хочемо дослідити, тобто необхідно мати певні ключові слова, за якими буде здійснюватися пошук,

геолокація, установлюватися теги тощо. Саме це є початковою точкою поточного дослідження, далі необхідно завантажити потрібний датасет, тобто пул користувацьких повідомлень, збережених відповідно до заданого предиката. Коли надійшов файл зі збереженими повідомленнями, необхідно виконати загальну перевірку файлу на коректність даних і після цього програмно структурувати дані таким чином, щоб можна було оперувати ними максимально точно, тобто потрібно дані відформатувати та привести до єдиної структури. Після цього здійснюється аналіз користувацьких повідомлень. Загальний алгоритм можна поділити на два основні алгоритми: аналіз тональності користувацьких повідомлень, з огляду на певний підход, де кожне повідомлення має свій рівень тональності та рейтинг, і також здійснити кластеризацію повідомлень для поділу користувачів та їхніх повідомлень на визначену в процесі роботи інтелектуальної системи кількість кластерів. Здобуту інформацію найзручніше показувати у вигляді графіків та діаграм для наочності й розуміння загальної ситуації в результатах аналізу користувацьких публікацій. Ці алгоритми є не новими і містять широкі можливості для модифікації та оптимізації, що й буде здійснено в подальшій роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нейронні мережі вже практично стали незамінною частиною роботи різноманітних компаній та корпорацій. У статті [1] визначено, яку саме роль виконує *deep learning* в електронній комерції та принципи роботи з користувачами на прикладі мереж онлайн-магазинів. Авторами досліджено відгуки людей щодо певних товарів різної якості та вплив поточних відгуків на продаж товарів іншими користувачами системи в майбутньому. З'ясовано, коли саме й за яких умов люди найбільше чи найменше звертають увагу на відгуки про товар і, відповідно, як саме складений позитивний чи негативний відгук може вплинути на купівельну привабливість товару. У статті [2] автори дослідили коментарі користувачів під відеозаписами в соціальній мережі *YouTube*, був обраний датасет з відеозаписами про вірус COVID-19 і коментарі, досліджено тональність написаних повідомлень, їхню частоту й активність написання користувачами. Відповідно припущено, що люди, які писали негативні коментарі, є ботами. Це пояснюється дуже схожими шаблонами повідомлень і майже однаковим рівнем негативної

тональності. Навпаки, автори статті [3] розглянули коментарі відомих особистостей у соціальних мережах і знайшли значну кількість коментарів, що написані в певні моменти часу й мали практично однакову позитивну тональність у межах від 0 до 1. Це також доводило неприродний стан цих повідомлень.

У статті [4] досліджено декілька типів моделей персоніфікації користувачів *Twitter* за допомогою нейронних мереж LSTM. З відкритого API було взято декілька ключових параметрів щодо кожного користувача й розглянуто у вигляді окремого датасету з подальшим поділом користувачів на групи відповідно до їхньої локації, опису та аватара профілю, було навчено відповідну нейронну мережу, що розподіляє користувачів на певні груп. Також створено систему [5], що опрацьовує цитування в статтях і надає змогу аналізувати правильність і коректність поточного тексту й виправляти його за допомогою рекурентної нейронної мережі, основним завданням якої є опрацювання текстових даних і аналіз наступних даних на основі навчання з вчителем. У роботі [6] розглянуто машинне навчання на основі відгуків клієнтів на готелі для розуміння ситуації на цьому ринку та подальшого складання плану розвитку готелів завдяки позитивним і негативним відгукам клієнтів. Для роботи використовувалися згорткові нейронні мережі, оскільки кількість даних була відносно невеликою. Авторами статті [7] розглянули інформаційну систему аналізу тональності тексту, розміщеного в оголошеннях товарів електронної комерції. За допомогою згорткової нейронної мережі досліджено оголошення товарів, на яких навчалася нейронна мережа, і визначено, які саме сучасні оголошення викликають найбільш позитивні й, навпаки, негативні враження в потенційних клієнтів. У роботі [8] вивчено основні аспекти ментального здоров'я людей на основі їхньої реакції на конкретні події та явища, залишені під публікаціями в соціальних мережах. Завдяки навчанню з учителем створено дві різні моделі аналізу користувацьких даних, на основі яких в подальшому опрацьовувалися коментарі й публікації людей і визначалися особливості їхнього ментального здоров'я шляхом аналізу тональності тексту з використанням згорткової нейронної мережі.

Виокремлення невирішених частин загальної проблеми. Мета роботи

Метою цієї статті є впровадження інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації

публікацій у соціальній мережі *Twitter*. Ідея аналізувати тональність користувацьких повідомлень чи публікацій у соціальних мережах не є новою, адже існує низка практично реалізованих систем, що виконують подібне завдання. На сьогодні важливим завданням є оптимізація та максимально ефективно використання наявних технологій і правильний вибір моделей та алгоритмів для виконання конкретного завдання, що може залежати як від розміру вхідного датасету, так і від розмірів окремих текстових токенів [9] усередині датасету, або навіть параметрів пошуку текстової інформації для користувачів, що застосовують певну систему, або лише її часткового функціоналу для дослідження тексту.

Сам процес аналітики текстових публікацій або коментарів користувачів можна чітко поділити на дві важливі частини: це аналіз тональності тексту й кластеризація текстових даних. Це завдання є нетривіальним і досить складним, оскільки існує безліч параметрів, які потрібно враховувати перед створенням такої інтелектуальної системи для аналізу текстових даних: це і розмір вибірки, і текстові дані, і контекст, якому ці дані належать. Це також користувачі, які пишуть публікації чи повідомлення як реакцію на певну подію чи сукупність подій, що відбувається в певний момент часу. Усе це означає, що створити унікальну інтелектуальну систему, яка зможе врахувати всі параметри й приблизно однаково ефективно аналізувати будь-які текстові дані, не можливо. Так чи інакше, існують завдання, що кожна конкретна система зможе виконувати ефективно та з максимальною точністю, але й завдання, які ефективно чи точно виконати тим самим набором алгоритмів просто не вдасться. Так, найчастіше для аналізу тональності тексту використовують згорткові нейронні мережі, а для кластерного аналізу – ієрархічну кластеризацію. Ці алгоритми є ефективними й перевіреними часом, але можуть виконувати лише аналіз невеликих і середніх за обсягом датасетів чи вибірок даних. Ці алгоритми можна без проблем використовувати і для досить значних обсягів даних, але такий аналіз буде неефективний і менш точний, особливо якщо кількість текстових одиниць даних є великою, а сам токенизований об'єкт не великий [10]. Яскравим прикладом є соціальна мережа *Twitter*, де одне користувацьке повідомлення може мати максимально 280 символів для створення публікації.

Для того щоб найбільш ефективно аналізувати тональність повідомлень та їхню кластеризацію, будемо використовувати нейронну мережу LSTM та алгоритм кластеризації *k-means*, завдяки чому можна досягти на 10...15% більшу ефективність порівняно зі згортковими нейронними мережами та ієрархічною кластеризацією. Перед тим як описувати функціонал системи та основні алгоритми *long-short-term memory* нейронної мережі та алгоритм кластеризації *k-means*, варто звернути увагу на не вирішені проблеми, а саме на те, чому в контексті користувацьких публікацій і коментарів у соціальній мережі *Twitter* згорткові нейронні мережі та звичайна ієрархічна кластеризація є неефективними та можуть унаслідок аналізу тональності тексту й подальшої кластеризації показувати неочікувані результати [11]. Це відбувається саме через особливості реалізації цих алгоритмів роботи з текстом та через властивості ваг, що надає згорткова нейронна мережа та які є важливими для врахування, оскільки в разі помилкового прорахунку ваг згенерована модель може бути спотвореною та, відповідно, не дійсною.

Згорткову нейронну мережу, або CNN, можна уявити як сукупність матриць, що складаються в одну велику матрицю, у якій векторами можна обирати для навчання як горизонтальні, так і вертикальні множини елементів, сформовані в процесі навчання нейронної мережі для побудови моделі. Під час роботи здійснюється накладання сукупності слів одне на одного за допомогою векторів, оскільки кожне слово є окремим вектором букв, що разом формують певне зображення. За допомогою створених системних предикатів відбувається фільтрація сформованого зображення векторів, що є сукупністю текстових даних, або слів. Оскільки предикат має однакову ширину та довжину перевірки значень, то можна проаналізувати лише частину вектора. Тому для ефективності роботи вектори найчастіше складають у тимчасові матриці для коректної та більш ефективної фільтрації за допомогою заданого предиката [12]. Оскільки це є завданням оброблення природної мови, потрібно зауважити, що фільтри, які ми використовуємо в процесі роботи, стандартно мають ту саму ширину, що й довжина досліджуваного текстового елемента, або окремого слова. Висота ж є більш статичною та зазвичай може змінювати свій розмір від 0 до 5. Оскільки з отриманої текстової інформації потрібно формувати певні послідовності значень, що в подальшому будуть записані в списки значень, відповідно необхідно обмежити кількість

списків до 5 штук для того, щоб можна було здійснювати ефективне паралельне оброблення текстової інформації та навчання моделі із заданими обмеженнями роботи поточної нейронної мережі [13]. Через ці алгоритмічні обмеження виникає основна проблема – неможливість точного навчання й подальшого аналізу тексту за допомогою згорткових нейронних мереж. Текст з обмеженнями буде проаналізований і результат аналізу його тональності буде коректний, але через обмеження висоти вектора нейронна мережа може навчатися лише на публікаціях і повідомленнях із полярними значеннями тональності, тобто -1 , 0 або 1 [14], відповідно, явно негативні, нейтральні чи позитивні коментарі без можливості їхнього розподілу за певним діапазоном, що, з одного боку, не є критичним і може бути корисним для загального розуміння тональності повідомлень, але, з іншого, з допомогою такої згорткової нейронної мережі неможливо здійснювати точний аналіз тональності. Також виникають застереження щодо швидкості роботи, адже така нейронна мережа має невисокі швидкість та ефективність, оскільки для збереження полярних значень векторів використовується алгоритм мемоізації повторюваних даних.

Якщо говорити про ієрархічну кластеризацію, то вона теж має недоліки у використанні. Зокрема найбільший із них схожий на той, що був описаний раніше щодо згорткової нейронної мережі, а саме – неможливість виконувати складні завдання, а також проблема недостатньої швидкості та ефективності роботи такого алгоритму кластеризації. Для початку варто зазначити, що ієрархічна кластеризація формується на основі деревоподібного графа, який ще відомий під назвою "дендрограма" і, відповідно, у процесі побудови цього графа використовуємо агрегативний підхід роботи з вхідними даними [15]. Маючи дендрограму й застосовуючи агрегативний підхід, спостерігаємо відносно однотонні кластери й паралельно шукаємо можливі зв'язки між ними, на другому кроці послідовно здійснюємо об'єднання кластерів в окремі "зв'язок" на основі необхідних предикатів. Основною перевагою є простота й наочність у використанні, тобто наявність зручної деревоподібної структури, в якій кластери найчастіше за умови правильної генерації моделі можна побачити навіть "на око" [16]. На жаль, недолік цієї простоти полягає в тому, що найчастіше це можна використати лише для незначних обсягів даних і невеликих датасетів. Одним з основних недоліків є складність деревоподібної ієрархії, що кластеризується в часі

з алгоритмічною складністю $O(n^2 \log n)$, де n – кількість загальних точок даних. Якщо ж на противагу взяти алгоритм *k-means*, у ньому будемо використовувати оптимізацію конкретної цільової функції, наприклад, у межах певного діапазону значень від k до l , тобто ми не маємо фактично цільової функції, а тому набагато ефективніше буде виконання через складність алгоритму $O(nKm)$, де K – це кількість кластерів, а m – кількість середніх значень [17]. Також проблемою ієрархічної кластеризації є певна статичність, а саме неможливість скасовувати попередні кроки виконання алгоритму. Тобто, якщо ми здійснимо кластеризацію $n-l$ точок, а після цього виявиться, що з'єднання між кластерами було неправильним або виникли проблеми у створенні деревоподібного графа на одному із рівнів ієрархії, то ми не можемо скасувати цей крок на програмному рівні під час виконання, адже буде отримано фінальну дендрограму зі спотвореними значеннями або потрібно буде зупинити роботу програми й запускати систему від початку, що теж є великим недоліком порівняно з роботою алгоритму *k-means*, де є змога перевіряти правильність середніх значень за допомогою заданої умови виконання [18].

З огляду на наведену вище інформацію, можна зробити висновок, що використання згорткової нейронної мережі та ієрархічної кластеризації є неоптимальним для аналізу тональності користувацьких публікацій і повідомлень у соціальній мережі *Twitter*. Натомість для оптимізації та пришвидшення роботи інтелектуальної системи доцільніше використовувати нейронну мережу з архітектурою LSTM та алгоритм кластеризації *k-means*.

Функціонал системи

Говорячи про функціонал створюваної інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій у соціальній мережі *Twitter* насамперед варто звернути увагу на два основні алгоритми, що й будуть виконувати основний обсяг роботи в середині системи. Насамперед це нейронна мережа LSTM, за допомогою якої буде здійснюватися ефективний та швидкий аналіз тональності публікацій і коментарів користувачів *Twitter*, й алгоритм кластеризації *k-means*, за допомогою якого будуть виділятися основні кластери та розподілятися користувацький текст за цими кластерами.

Для початку варто розкрити сутність нейронної мережі, яку було побудовано. Однією з найпопулярніших і найефективніших моделей нейромереж, орієнтованих на опрацювання часових рядів, є модель *Long Short-Term Memory* (LSTM). Вона є ефективною у використанні й набагато точнішою, ніж згадана раніше згортова нейронна мережа, але водночас вона є складною в реалізації, оскільки це рекурентна нейронна мережа, основна функція якої полягає в прогнозуванні послідовності даних за вхідним датасетом і відповідної проблеми, яку необхідно вирішити. Для кращого розуміння контексту застосування нейронної мережі варто сформулювати, що мається на увазі під аналізом часових рядів, для виконання якого будується нейронна мережа. Сутність полягає в тому, що вхідні дані є конкретними точками інформації, що аналізуються у певних часових проміжках, завдяки чому можна створювати та аналізувати закономірності процесів, що відбуваються у конкретних часових проміжках. Оскільки є певні пов'язані між собою точки даних, використовуємо рекурентну нейронну мережу (RNN). В основі рекурентних мереж лежить концепція комірок пам'яті, у яких зберігаються певні точки подання даних. У традиційних RNN є недолік, який полягає в тому, що в якийсь момент роботи мережі кількість точок подання даних може збільшитися настільки, що нові дані неможливо буде запам'ятати, через що ймовірно спотворення кінцевих результатів, адже зрештою нейронна мережа пропускатиме важливий текст і не створить для нього точку подання. На рис. 1 зображено загальну структуру рекурентної нейронної мережі.

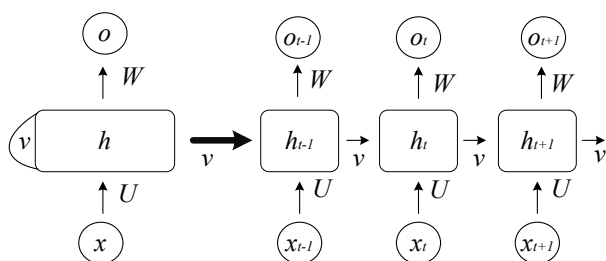


Рис. 1. Загальна структура рекурентної нейронної мережі

Нейронна мережа *Long Short-Term Memory*, або LSTM, – це окремий і особливий випадок рекурентних нейронних мереж, оскільки ця модель є ще ефективнішою, адже може зберігати сукупність інформації протягом тривалішого часу. У нейронній мережі LSTM подолано дві основні рекурентні

проблеми: це градієнти, що зникають, і градієнти, які деформуються в процесі роботи інтелектуальної системи. Модель LSTM містить стан комірки пам'яті та три основних проходи. Стан комірки пам'яті зберігає значення комірки протягом певного проміжку часу та є стрічкою, що рухається й лінійно передає дані далі по конвеєру практично без додаткових деформацій. У моделі мережі LSTM є змога додавати, змінювати й видаляти інформацію за допомогою вже згаданих раніше трьох проходів. Проходи допомагають здійснювати регуляцію інформації та є ключовими в архітектурі нейронної мережі LSTM, оскільки завдяки стану комірки пам'яті потік даних формується в певну лінійну структуру й дозволяє здійснювати рівномірний розподіл пам'яті протягом всього часу роботи нейронної мережі в інтелектуальній системі. Нейронна мережа перебуває в трьох основних станах: або дані подаються на вхід, або на вихід, або забуваються через спотвореність чи непотрібність інформації.

Відповідно, робота нейронної мережі реалізована за допомогою згаданих раніше трьох проходів. Першим виконується прохід "забування", що відповідає за видалення інформації, яка через спотвореність чи використаність більше не потрібна для аналізу тональності тексту, отже, її можна видалити та звільнити місце для наступної інформації на вході. Завдяки цьому на кожному кроці роботи нейронної мережі модель стає ефективнішою. Цей прохід має два основні входи: це прихований стан попередньої комірки пам'яті та поточне введення інформації на певному кроці. Ці дані перемножуються зі створеними раніше матрицями ваг, після чого до них додається певний коефіцієнт зміщення. Далі застосовується сигмоїдна функція, що продукує результат від 0 до 1, завдяки чому нейронна мережа "знає", яку інформацію можна "забути", а яку передати далі. Якщо ми маємо значення 0, інформацію про такий стан комірки пам'яті можна видалити, якщо значення наближається до 1, то всю інформацію про комірку потрібно зберегти й передати далі. Векторний вихід сигмоїдної функції, отриманий унаслідок відпрацювання частини моделі нейронної мережі, потрібно перемножити на стан комірок пам'яті, які не було видалено в процесі роботи, а результат передати далі, унаслідок чого формується перший прохід, що виконує важливий функціонал видалення всіх непотрібних для аналізу тональності тексту комірок пам'яті. На рис. 2 зображено основні аспекти архітектури LSTM нейронної мережі.

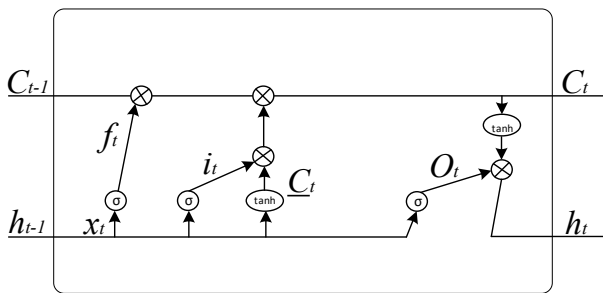


Рис. 2. Архітектура Long Short-Term Memory нейронної мережі

Другим іде "вхідний" прохід, який використовується для того, щоб додавати інформацію до стану комірки пам'яті. Спочатку виділені значення, які необхідно додати до комірки регулюються за допомогою сигмоїдної функції, вхідними даними все ще є прихований стан попередньої комірки пам'яті та поточне введення інформації на кроці роботи алгоритму. У процесі роботи створюється вектор, що містить всі або майже всі можливі значення, які необхідно додати до стану комірки пам'яті. Це відбувається з використанням функції \tanh , відповідно тангенс виводить значення від -1 до 1 . Далі необхідно визначити значення сигмоїдної функції, що є регуляторною. Найявні значення регуляторної функції необхідно помножити на створений раніше вектор значень. Уся важлива для інтелектуальної системи інформація з метою аналізу тональності певного тексту додається до стану комірки пам'яті за допомогою операції додавання даних. Завдяки цьому можна бути впевненим, що ще через "вхідний" прохід було додано лише корисну та потрібну інформацію, яка була попередньо відфільтрована та перевірена в процесі роботи мережі.

Останнім іде "вихідний" прохід, який необхідний для того, щоб використовувати поточну інформацію, яка є доступною в конкретний момент часу, й відображати найбільш релевантні результати. Спочатку створюється окремий вектор після застосування функції \tanh до стану комірки пам'яті, де значення виходу коливається від -1 до 1 . Сама ж сигмоїдна функція знову виконує роль регуляторної функції, тобто використовується для регулювання саме тих значень, що далі потрібно вивести з вектора за допомогою двох згаданих раніше входів, а саме прихованого стану попередньої комірки пам'яті та поточного введення інформації на певному кроці. Значення сигмоїдної функції необхідно перемножити

на вектор і отриманий результат операції йде як вихідне значення. Також нейронна мережа надсилає результат у прихований стан наступної комірки пам'яті, що відповідно є сучасним рішенням, завдяки чому нейронна мережа LSTM є найефективнішою та найзручнішою в прогнозуванні послідовностей і особливо добре себе показала, виконуючи завдання аналізу тональності публікацій у соціальній мережі *Twitter*.

Також варто уточнити важливість сигмоїдної функції активації саме під час роботи проходу "забування", оскільки замість того, щоб розподіляти значення між -1 та 1 , здійснюється розподілення вхідних значень між 0 та 1 . Це допомагає вчасно оновлювати змінені дані або "забувати" спотворені, тобто ті, що більше не матимуть жодної користі в процесі аналізу тональності тексту. Розподіл здійснюється саме між 0 та 1 через математичне множення, оскільки будь-яке число, яке помножимо на 0 , унаслідок буде 0 , так і навпаки, будь-яке число, помножене на 1 , залишиться незмінним. Завдяки цьому сигмоїдна функція допомагає ефективно визначити, які дані необхідно "забути" або видалити, які лише оновити на поточне значення тональності, а які зберігаються й передаються в наступний "вхідний" прохід. Отже, на рис. 3 зображено покроковий алгоритм роботи Long Short-Term Memory нейронної мережі.

Окрім реалізації нейронної мережі LSTM, важливою частиною інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій у соціальній мережі *Twitter* є правильна імплементація кластеризації з використанням алгоритму *k-means*. Як вже було описано раніше, звичайна ієрархічна кластеризація, хоч і є досить популярною та має чітко виражені переваги, все ж не відповідає нашому завданню, а саме для оброблення точних значень тональності тексту й, відповідно, виділення необхідних кластерів. Для початку варто уточнити, що кластеризація – це процес поділу обсягу даних певного розміру на декілька чітко визначених аналогічних за своєю структурою груп таким чином, щоб значення точок даних в одній групі були більш схожими на значення інших точок даних у тій самій групі, ніж інші точки даних, що належать до інших груп. Також варто зазначити, що кластеризація – це алгоритм навчання без учителя через свої особливості роботи.

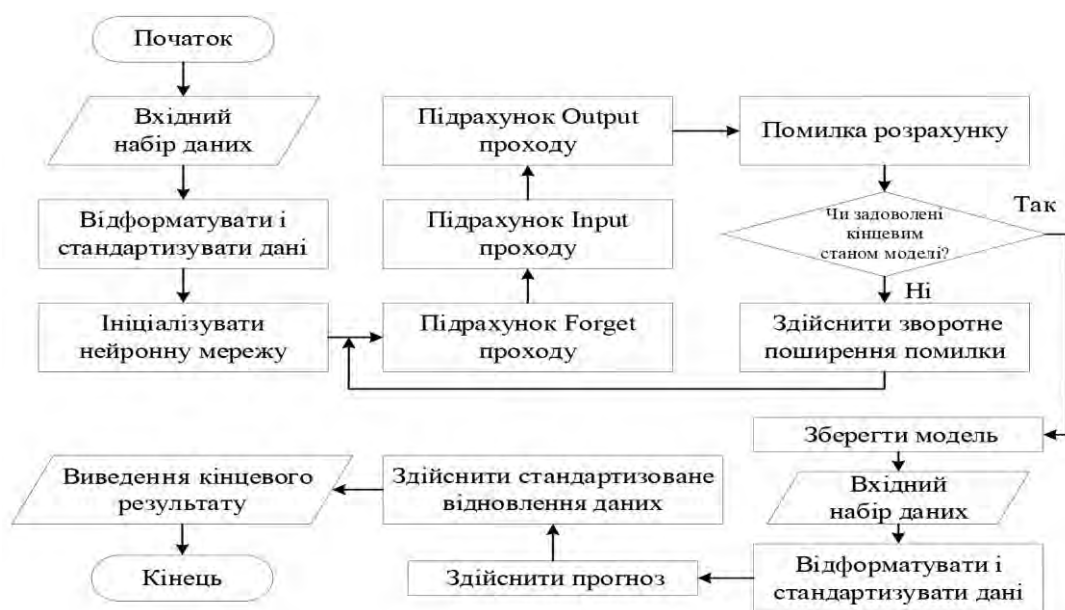


Рис. 3. Алгоритм роботи нейронної мережі LSTM

Кластеризація *k-means* – це алгоритм, що в процесі навчання не потребує позначки вхідних даних, на відміну від алгоритмів навчання з учителем. Кластеризація *k-means* поділяє об'єкти на кластери таким чином, щоб усі об'єкти всередині кластера були схожі один на одній і не схожі на об'єкти в інших кластерах. Латинська літера *k* є позначкою числа, що вказує на кількість кластерів, які необхідно створити. Також сутність алгоритму полягає в тому, щоб знайти, яке найкраще чи оптимальне значення кластерів необхідно використати для ефективної роботи з аналізом тональності. Сама процедура кластеризації *k-means* є досить простою та зрозумілою математичною задачею. Для початку необхідно визначитися із загальною нотацією. Наприклад, у нас є від C_1 до C_k наборів, що мають індекси спостереження в кожному кластері, ці набори задовольняють дві основні властивості: по-перше, кожне спостереження належить хоча б до одного з *k* наявних кластерів, по-друге, кластери не можуть перекрити один одного, тобто один набір спостережень може належати лише одному унікальному кластеру. В основі кластеризації *k-means* лежить ідея, що найкраща кластеризація – це та, де варіація значень усередині кластеру є мінімальною, тобто варіація в межах певного кластеру C_k є мірою величини спостереження кластеру, де один кластер відрізняється від іншого. Це і є проблема, що вирішує кластеризація *k-means* у межах інтелектуальної системи.

Варто наголосити на важливості параметра *k*, що визначає кількість кластерів. Часто його можна визначити певним приблизним значенням, просто прикинувши розмір датасету й дані, які він містить. Для нашого завдання – аналізу тональності тексту – обрано "ліктьовий" метод, що дає змогу точніше визначити необхідну для роботи кількість кластерів за допомогою запуску алгоритму *k-means* із різним набором кластерів з метою емпіричного визначення оптимального значення. "Ліктьовий" метод передбачає пошук певної метрики, щоб оцінити, наскільки результат кластеризації є хорошим для різних *k* значень за допомогою знаходження "ліктьової" точки, щоб відділити всі непотрібні подальші значення й обрати оптимальне до визначеної точки. Різкий спад значень на відповідному графіку означає, що значення кластеризації оптимізується, але є момент, коли різкий спад значень припиняє падати й стабілізується. Це і є та сама "ліктьова" точка. Тобто всі значення після "ліктьової" точки потрібно відкинути й залишити лише ті, де є спад середньої суми квадратів значень спостережень усередині кожного кластеру, там, де спад найбільший. Ця точка скоріше за все й буде оптимальним числом кластерів.

Алгоритм кластеризації є, власне, методом поділу індексів спостереження в кожному кластері таким чином, що ціль останнього рівняння виділення *k* кластерів є мінімізованою. Проблема є досить складною, оскільки є k^n способів розділити *n* спостережень на кластери, але існує алгоритм,

за допомогою якого можна знайти локальний оптимум для проблеми оптимізації k -means. Сам алгоритм кластеризації k -means має два глобальних кроки. Для початку необхідно обрати випадкове значення від 1 до k кожному зі спостережень даних, що були окремо виділені з датасету. Вони є певними початковими значеннями для кластерів. Цю процедуру необхідно повторювати доти, доки значення кластерів не перестануть змінюватися. Для кожного з k кластерів необхідно обчислити центроїд кластера.

Отриманий центроїд k -го кластера є окремим вектором середніх значень індексів спостережень у k -му кластері. Кожному кластеру необхідно призначити ідентифікатор спостереження, центроїд якого розташований найближче. Потрібно переконатися, що всі кластери є стабільними і не містять невизначеностей, оскільки це може завадити здійсненню коректного розподілу індексів спостереження щодо кластерів. Алгоритм роботи кластеризації k -means зображено на рис. 4.

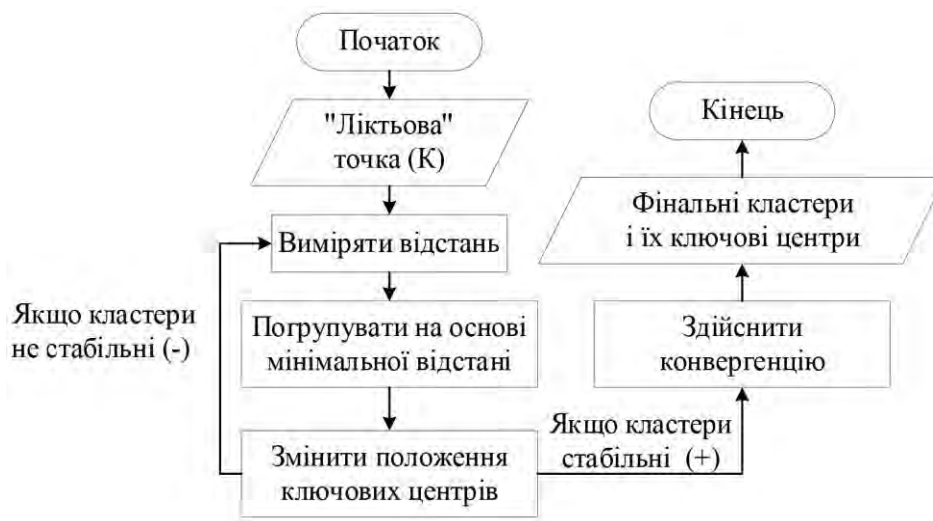


Рис. 4. Алгоритм роботи кластеризації k -means

Окресливши логіку та функціонал нейронної мережі LSTM та алгоритму кластеризації k -means, стає зрозуміло, як усередині системи буде відбуватися процес аналізу тональності та кластеризації публікацій і повідомлень користувачів соціальної мережі *Twitter*. Крім того, необхідно зрозуміти, як виглядає логіка інтелектуальної системи загалом. Нейронна мережа й алгоритми кластеризації самі по собі виконують лише певну функцію в системі. Сама система містить велику кількість процесів, що не дивно, оскільки ми взаємодіємо з реальним користувачем та відштовхуємося від заданих користувачем параметрів у певний момент часу, коли цей користувач працює із системою.

Найбільш зручною діаграмою для відображення загальної концепції взаємодії користувача, системи та інших елементів структури є діаграма варіантів використання, оскільки здебільшого вона складається з акторів та варіантів використання, які вони здійснюють. В цій інтелектуальній системі аналізу тональності та кластеризації текстової інформації є єдиний актор – "Користувач" – окрема

сутність щодо системи й зображений окремо від інших варіантів використання, що є основними аспектами роботи системи. Саму діаграму варіантів використання зображено на рис. 5. На діаграмі інтелектуальну систему зображено всередині прямокутника. Вона містить декілька основних варіантів використання, що відповідають за збереження твітів – публікацій та коментарів користувачів соціальної мережі *Twitter*. Крім того, є варіанти використання, які відповідають за форматування текстової інформації до потрібного вигляду, здійснення LSTM-аналізу тональності текстових даних, виконання кластерного аналізу, виведення всіх необхідних отриманих результатів у форматі, що найбільше відповідає отриманим даним і завершенню роботи системи.

Окрім звичайних варіантів використання, що виконують ключові функції інтелектуальної системи, на діаграмі відображено варіанти включення та розширення, які більш детально пояснюють сутність роботи основних варіантів використання. Так, наприклад, варіант використання, що описує

збереження твітів, містить варіанти включення, які описують задавання параметрів у певному форматі та збереження сформованого датасету в .csv файл. Також міститься варіант розширення, який відтворює процес вибору основних ключових слів пошуку. Варіант використання, що описує форматування текстових даних, має лише варіанти розширення, які відтворюють видалення зайвих символів із тексту, стандартизування наявної інформації та видалення обробників тексту, що були завантажені за замовчуванням. Також інший варіант використання, який відповідає за LSTM-аналіз тональності

текстових даних, має лише варіанти розширення можливостей, такі як здійснення підрахунку всіх поточних шарів мережі та стану комірки пам'яті і три основних проходи, здійснення прогнозу тональності текстової інформації, тобто публікацій і коментарів користувача *Twitter*, і кінцеве збереження створеної моделі. Далі йде варіант використання кластерного аналізу, який також містить варіанти розширення й включення, такі як пошук "ліктьової" точки, визначення фінальних кластерів і їхніх ключових центрів та імплементація конвергенції.

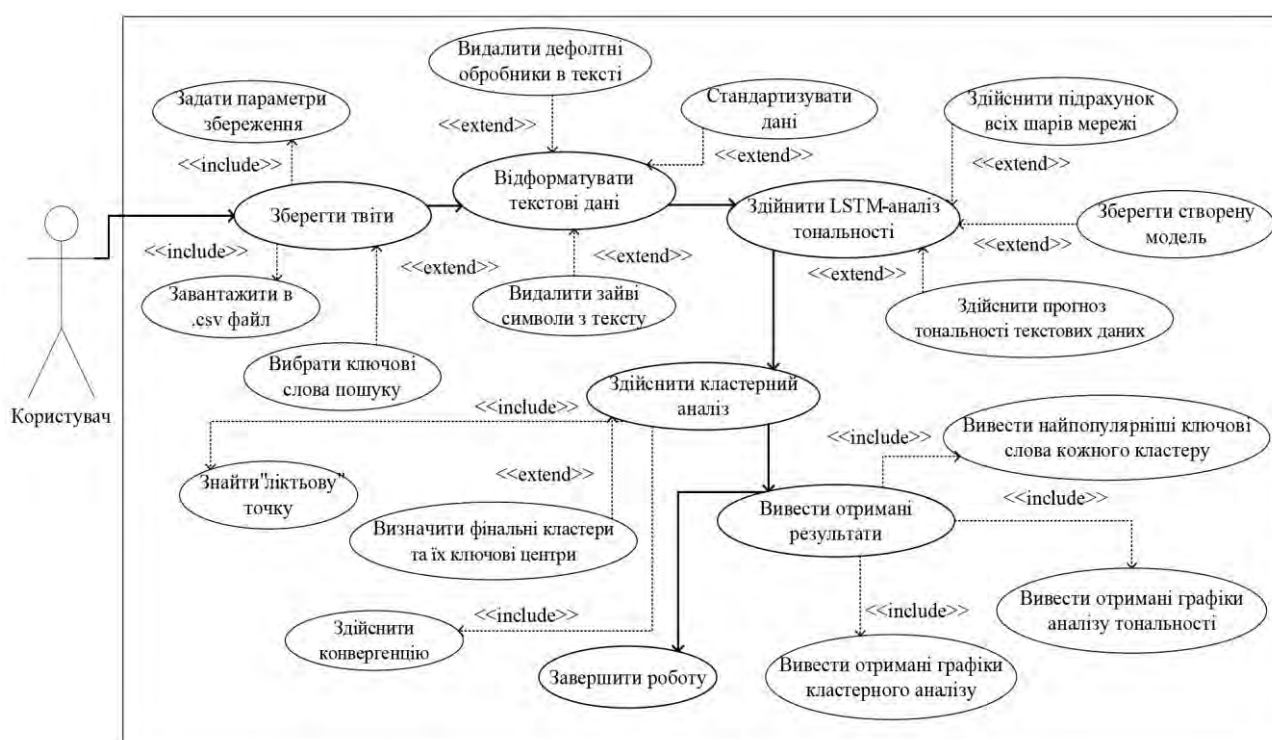


Рис. 5. Діаграма варіантів використання інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій

Також варто наголосити на двох останніх варіантах використання, зокрема виведення результатів і завершення роботи інтелектуальної системи. Виведення результатів має лише варіанти включення, зокрема виведення результатів аналізу тональності користувацьких публікацій і коментарів та виведення результатів кластерного аналізу у вигляді текстової інформації, а також графіків і діаграм для більш детального пояснення отриманих даних відповідно до ключових слів пошуку.

Описавши загальну структуру інтелектуальної системи за допомогою діаграми варіантів використання, необхідно більш конкретно описати

структуру створеної системи та її функціонал, для цього ідеально підходить діаграма діяльності. Вона дає змогу чітко виділити сутності системи за допомогою доріжок, умови виконання обчислень та розрахунків, чітко показати стан дії та його взаємодію з іншими станами в межах початкового й кінцевого стану інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій у соціальній мережі *Twitter*. Також зручно відобразити всі наявні розгалуження потоків у процесі роботи та їхні результати. Побудована діаграма діяльності зображена на рис. 6.



Рис. 6. Діаграма діяльності інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій

Для початку варто виокремити дві основні сутності, а саме "Користувач" і "Сервер". На діаграмі діяльності вони подані у вигляді окремих доріжок, відповідно можна описати їхній контекст не лише в просторі, але й у часі, тобто зрозуміти, які процеси в інтелектуальній системі відбуватимуться в конкретний момент часу та яким чином будуть взаємодіяти між собою. Першим іде початковий стан, який описує функціональний початок роботи системи, далі послідовно між собою взаємодіють стани дій, що належать користувачу системи, тобто введення параметрів збереження, задання ключових слів та інші дії, або стани дій, які є повністю інкапсульовані в межах логіки окремого екземпляра класу виконання задачі, тобто кожен стан дії можна розглядати незалежно від інших. Також сутність "Сервер" у процесі роботи перевіряє умову на допустимість збереження створеної моделі чи на необхідність здійснення процесу зворотного поширення помилки. Окрім умов, сутність "Сервер" містить розпаралелення станів дій, де одночасно під час виконання двох різних предикатів зміна ключових центрів може розділитися як на вимір відстаней між кластерами, так і на здійснення конвергенції з уже наявними кластерами внаслідок обчислення центроїда кластеру, що містить розділені індекси спостереження в інтелектуальній системі.

Отже, описавши функціонал системи за допомогою об'єктно орієнтованих діаграм потрібно для більшого розуміння контексту роботи системи описати її основні елементи та взаємозв'язки за допомогою функціональної діаграми. Найбільш зручною для виконання цього завдання є діаграма потоків даних,

оскільки вона додатково показує систему як сукупність процесів, що взаємодіють між собою під час усього циклу життя системи. Діаграма потоків даних інтелектуальної системи зображена на рис. 7.

Діаграма складається із семи послідовних потоків даних, де кожен потік переходить у наступний і передає певну інформацію в межах запиту. Кожен потік виконує всі необхідні вимоги до транзакцій, тобто інтелектуальна система передає дані без ризику їхньої втрати: якщо транзакція не відбудеться або в процесі роботи буде втрачено чи спотворено інформацію, транзакція просто зупинить роботу поточного потоку й поверне керування минулому потоку, який завершився штатно без спотворення наявної користувацької інформації. Також під номером 1 та під назвою R на діаграмі подані сховища даних, у нашому випадку це текстовий файл із розширенням `.csv` для збереження датасету й сервер для динамічного збереження даних між запитами. Бази даних як такої не створюються, оскільки сутність створення інтелектуальної системи полягає в імплементації алгоритмів поточного аналізу тональності та кластеризації публікацій і коментарів у соціальній мережі *Twitter* відповідно до заданих ключових слів.

На підставі виконаного опису основної сутності створеної системи, її функціоналу, реалізації нейронної мережі LSTM та алгоритму кластеризації *k-means* було проведено експеримент зі створення повноцінного датасету з публікацій і коментарів у соціальній мережі *Twitter* за ключовими словами, заданими користувачем, і проаналізовано тональності окремих повідомлень і відповідний поділ на фінальні кластери.

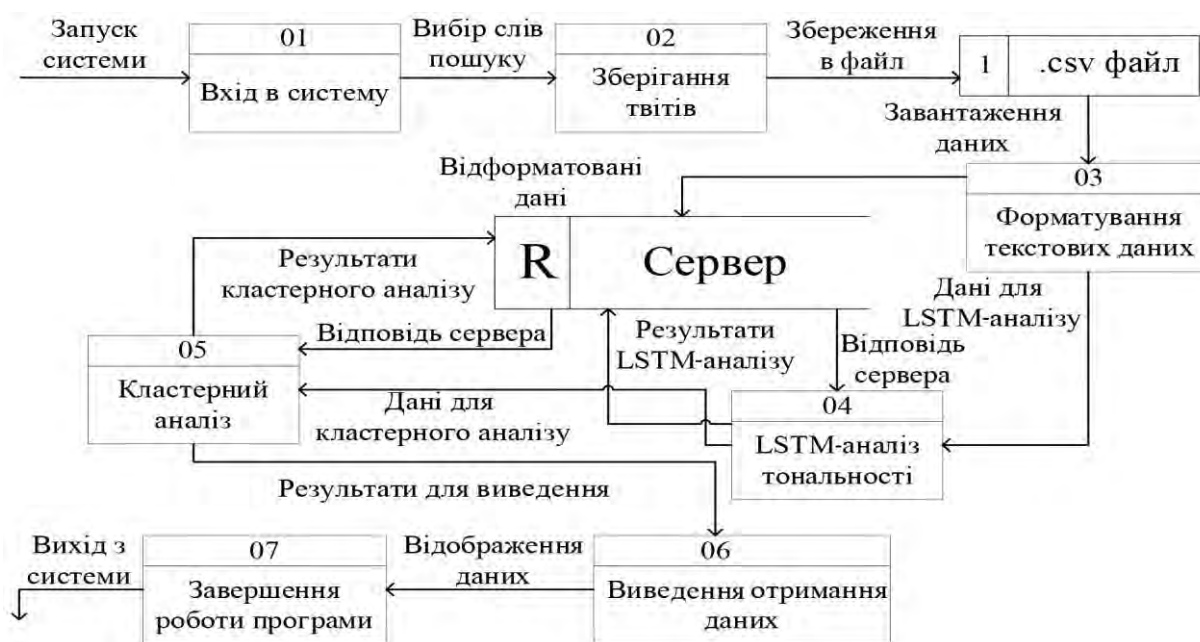


Рис. 7. Діаграма потоків даних інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій

Результати досліджень та їхнє обговорення

Проведено експеримент із застосування імплементованої інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій в соціальній мережі *Twitter*, перевірено роботу створеної нейронної мережі LSTM і алгоритму кластеризації *k-means*. Для початку потрібно знайти дані для аналізу. Для максимальної актуальності прийнято рішення зробити окремий датасет і завантажити всі користувацькі коментарі та публікації в *Twitter* за останні декілька місяців. Перед тим як завантажувати дані, необхідно було зареєструвати акаунт *Twitter*-розробника та отримати чотири ключі, а саме *consumer key*, *consumer secret key*, *access token* та *access token secret*. Усі вони необхідні для використання офіційного API *Twitter* з метою збереження публікацій.

Оскільки в лютому 2022 р. Росія напала на Україну, це стало подією, що викликала відповідну реакцію, як в нашій країні, так і за кордоном. Люди в соціальних мережах, зокрема в *Twitter*, починаючи з лютого і дотепер, активно обговорюють війну та всі теми, пов'язані з нею. Отже, було прийнято рішення проаналізувати тональність публікацій і коментарів українських користувачів щодо сучасних подій. Пошук твітів було здійснено за останні пів року з допомогою геотегу "Ukraine". Пошук почався з липня 2022 р. за публікаціями

й коментарями, що містять обов'язкові ключові слова "Ukraine" та "war", а також опціональні слова "missile", "offensive" та "invasion". Ураховуючи обмеження API на завантаження екземплярів публікацій, було вирішено завантажити 2 тис. твітів відповідно до вказаних ключових слів. Для формування датасету необхідні лише конкретні параметри завантажених твітів, тобто потрібно відкинути ті, що не використовуються, за допомогою проходу циклом по всіх завантажених твітах і збереження нікнейму користувача, опису профілю, кількості твітів, підписок і підписників і, що найголовніше, – тексту публікації чи коментаря. Усі дані для початку зберігаються в data-словнику й обробляються до необхідного формату з використанням *DataFrame*-функції для опрацювання даних. З огляду на особливість створеної інтелектуальної системи, визначено, що найбільш зручним форматом для роботи з текстовими даними такого типу за допомогою нейронної мережі та алгоритму кластеризації буде формат *.csv*, оскільки він є універсальним і практично кожна мова програмування чи засіб опрацювання даних має функціонал для роботи з файлами такого типу. Отже, було створено датасет, що опрацьовувався в процесі навчання моделі нейромережі LSTM, і розподілялися дані на кластери. Перед тим виникла необхідність опрацювати всі текстові дані, тобто надати їм одного вигляду для максимально ефективного обробки.

Оскільки ми маємо готовий датасет, можемо здійснювати аналіз тональності, але перед тим необхідно відформатувати й стандартизувати весь текст таким чином, щоб його можна було зручно аналізувати. З тексту було видалено всі хеш-теги, оскільки вони спотворювали зміст публікації чи коментаря. Також було приведено всі слова до нижнього регістру й видалено всі URL-посилання

та всі спеціальні символи, не потрібні для визначення тональності тексту. Під кінець було вилучено всі зайві пропуски та одинарні символи в тексті, а також усі системні символи, додані засобами соціальної мережі *Twitter*. Після цього було здійснено LSTM-аналіз тональності повідомлень, приклад результатів роботи якого зображено на рис. 8.

	text	Sentiment Score	\ Overall Sentiment
0	rt mtracey this woman literally works for us go...	0.000000	Neutral
1	rt smelyansky_igor 6000 branches of ukrposhta ...	0.000000	Neutral
2	snekotron fine with me we all knew they were c...	0.208333	Positive
3	rt euromaidanpress vilnius lithuania protest i...	0.000000	Neutral
4	rt andrew__roth putin is losing the war facing...	0.000000	Neutral

Рис. 8. Приклад результатів визначення тональності тексту засобами LSTM-аналізу

У процесі роботи досить точно визначено значення не тільки загальної тональності слів, а й полярність емоції. Тобто користувач може виявляти певну емоцію з різною силою та інтенсивністю відповідно до ситуації та написаної публікації чи коментаря. Відповідно, ми визначили й тональність текстового екземпляра даних, і емоційний діапазон від -1.0 – максимально негативний текст, до 1.0 – максимально позитивний. Усе що між ними – текст із конкретною тональністю та діапазоном, також є значення 0 , що вказує на середньостатистичний нейтральний текст. Аналіз тексту відбувався відповідно до описаного раніше алгоритму запам'ятовування в часі певних моментів з тестової вибірки, на якій навчалася нейронна мережа. Для початку визначаємо мову, якою було написано повідомлення, для зручності обрано лише твіти англійською. Після цього виконуються дві функції *spellcheck* і *correct*, де ми за допомогою базових алгоритмів роботи з текстом перевіряємо правильність написаних слів. Далі відповідно до алгоритму проводимо стематизацію слів, тобто за допомогою методу *definitions* отримуємо список можливих значень до слова згідно з навченою моделлю й обираємо найближче значення. Було згенеровано нейронну мережу, що містить два рівні на 100 елементів, тобто по 50 елементів на кожен рівень. Ми встановлюємо значення просторового спуску, беремо 500 епох для коректного оброблення 2000 повідомлень, 0.5 – значення просторового спуску й, відповідно, аналогічне значення 0.5 задаємо

для градієнтного спуску. Було додано значення щільності, що дорівнює 1 та сигмоїдну функцію активації для LSTM-алгоритму й коректного оброблення станів комірок пам'яті. Унаслідок цього наша рекурентна модель складається з вбудованого шару, LSTM-шару й шару щільності, саме в якому сигмоїдна функція відповідає за процес нативної активації. Безпосередньо навчання здійснюється з розміром навчальної партії в 20 елементів і фактором розподілу зі значенням 0.2. Наступним кроком було виділення рівня емоційності тональності тексту для більш широкого аналізу текстової вибірки. Але спочатку було здійснено загальний експеримент на тестовій вибірці з 2000 слів, результати якого наведені на рис. 9.

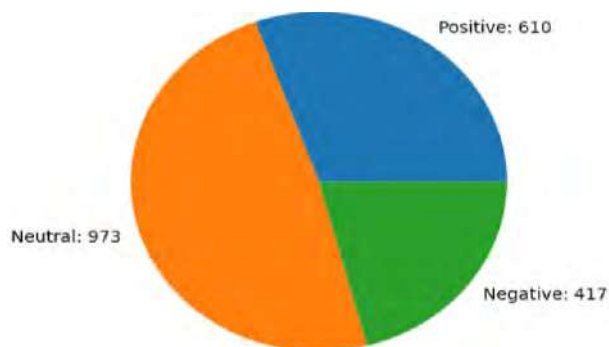


Рис. 9. Загальні результати аналізу тональності тексту

Після отриманого значення початкової тональності здійснюється аналіз, за допомогою якого дізнаємося про ступінь емоційності слів. Сам аналіз певною мірою є складнішим, оскільки

містить одночасно три LSTM-шари. Відповідно, для кожного з них необхідно було запускати свою функцію активації. Для більшої ефективності вся робота виконуватиметься асинхронно, оскільки ми задіяли зовнішні ресурси для виконання коду й очікування результату, що повернеться з функції. Сама модель продовжує виконуватися в межах 500 епох, але замість одного блоку пам'яті маємо три різні, що називають функціональними осередками. Кожен осередок має певний стан, який може змінюватися з огляду на процес навчання й переносити стан моделі. Відповідно, є прихований стан, що є унікальним для кожного осередка й недоступний з інших, так і розподілений шар, який є загальним для всіх трьох осередків і може змінюватися, обираючи оптимальне значення, що здійснюється підбором максимального значення на кожному з кроків навчання суб'єктивної моделі.

Ми здійснимо не тільки загальний аналіз тональності, а й аналіз емоційної суб'єктивної тональності в межах від -1 до 1 . У такий спосіб можна зрозуміти, наскільки сильно користувачі соціальної мережі *Twitter* висловили позитивну чи негативну емоцію в межах публікації чи коментаря, тобто реакцію на воєнні дії. На рис. 10 зображено міру тональності проаналізованих текстових екземплярів. Як бачимо, переважну більшість становлять саме публікації та коментарі, що мають нейтральний контекст. Фіолетовим кольором зображено нейтральні текстові екземпляри, оранжевим – позитивні і зеленим – негативні, що добре видно на сформованому графіку. Також спостерігаємо, що оцінка тональності позитивних коментарів коливається в плані значень від 0.1 до 0.4 , а оцінка негативного розподілу чисел – від 0.1 до 0.2 .

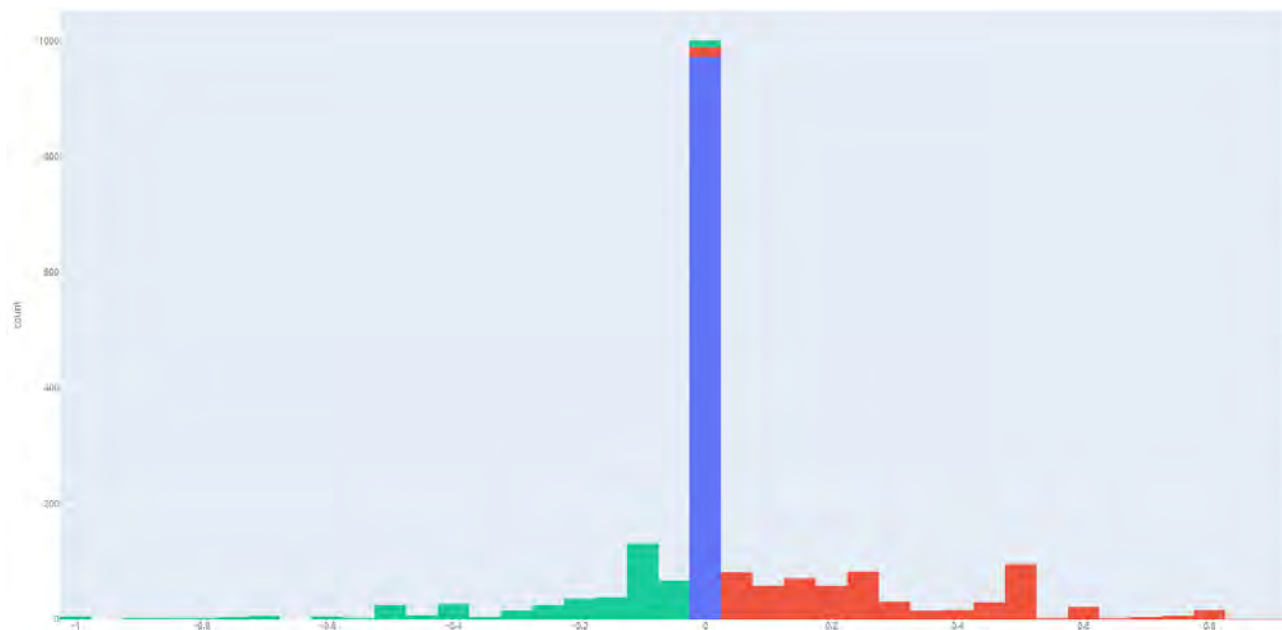


Рис. 10. Міра тональності

Такий нерівномірний розподіл можна пояснити тим, що люди реагують на хороші новини під час війни більш емоційно й імпульсивно. Як видно, на графіку частина коментарів і публікацій сягає 0.8 значення емоційності й, навпаки, негативні коментарі, що пишуть люди після декількох місяців війни, значно менш емоційні. Отже, публікацій, рівень емоційності яких понад 0.4 , практично відсутні. Також було сформовано графік суб'єктивності тональності (рис. 11). Завдяки цьому графіку зручно визначити, де саме є найбільша щільність розподілу суб'єктивності публікацій

і коментарів з обраного датасету. Як бачимо, найбільша щільність позитивних і негативних емоцій у текстових екземплярах має однакове значення 0.5 .

Отже, проаналізувавши тональність користувацьких публікацій і коментарів, чітко побачили, скільки за визначений період часу і з використанням тематичних ключових слів написано позитивних, негативних і нейтральних твітів і який між ними розподіл. Окрім того, у дослідженні здійснено глибший аналіз і визначено розподіл значень тональності тексту та її суб'єктивність.

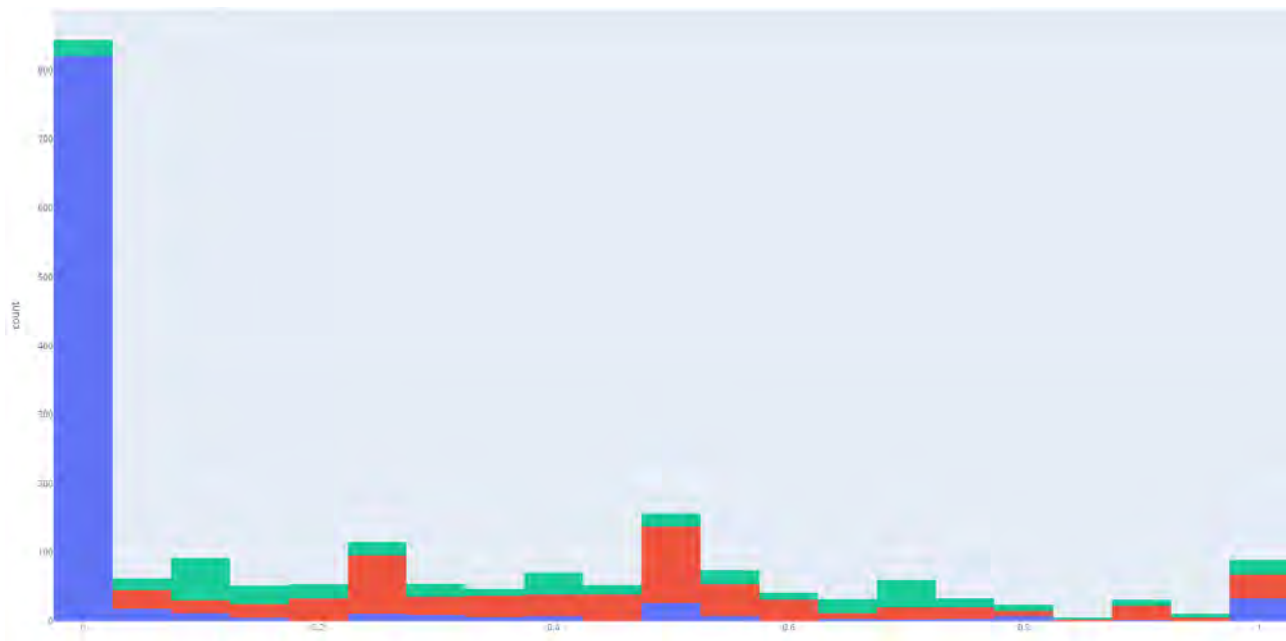


Рис. 11. Суб'єктивність тональності

Далі було здійснено кластеризацію методом *k-means* для того, щоб чітко бачити розподіл текстових повідомлень різних тональностей по кластерах. Сам процес кластеризації має три основних кроки: ініціалізація моделі, налаштування *fit*-параметрів моделі та прогноз для подальшого оброблення й поділу на кластери. Для початку було задано *n* – кількість кластерів, що може становити від 3 до 5, відповідно до кількості текстових елементів, та *random state* – стан процесу кластеризації, що є випадковим числом, необхідним для ініціалізації моделі даних. Для коректної роботи інтелектуальної системи було задано параметри кластеризації, такі як *model.fit* – налаштування моделі, *max iteration* – кількість змін положення центру кластерів, у нашому випадку це 300 змін, *n_init value* – значення, що позначає, скільки разів відбуватиметься кластеризація, і залежить від вибору центрів кластерів, *tol* або *tolerance* – перевірка щодо того, чи центри кластерів рухаються в процесі навчання моделі. Якщо рух менший за одну тисячну, то кластеризація завершується та параметр *verbose*, що позначає проміжну інформацію про процес кластеризації та можливі помилки. Також було задано такі параметри, як *model.labels*, що позначає номер кластеру, якому належить об'єкт, *model.cluster_centers*, що позначає координати центрів кластерів, і *model.predict*, який, відповідно, позначає додавання нового об'єкта до кластеру з найбільшим центром, щоб не робити заново кластеризацію, а використовувати готову модель.

Для визначення кількості кластерів було використано "ліктвовий" метод, що зображено на рис. 12, відповідно до результатів на найбільшому спаді було обрано три кластери.

Після визначення кількості кластерів настав час розподілити текстові екземпляри по цих кластерах. Оскільки їх всього три, то зручно розподілити на позитивні, нейтральні й негативні. Щоб це зробити, була використана функція *groupby.mean*, сутність якої полягає у визначенні середнього значення за кожним кластером. Далі здійснюється стандартизація, для якої потрібно від середнього значення вибірки відняти значення кластеру й поділити на середнє відхилення, після чого видаляється середнє значення та масштабується дисперсія одиниць. Розподіл текстових даних користувачів по кластерах зображено на рис. 13 та 14 за допомогою різних типів графіків. Отже, PCA-графік відтворює загальну структуру даних, а TSNE-графік найкраще демонструє відносини між сусідами. Для більш зручного відображення даних, замість усіх можливих об'єктів, на PCA-графік було виведено 40, а на TSNE – 400 текстових екземплярів. Також для зручного об'єднання в кластери текстові одиниці даних на рис. 13 і 14 розміщено в декартовій системі координат, оскільки в ній є змога однозначно визначити кожную точку на площині з використанням пари числових координат та осей абсцис і ординат. Маючи всі точки, у процесі роботи система визначає відстані між ними й розділяє на кластери за схожістю.

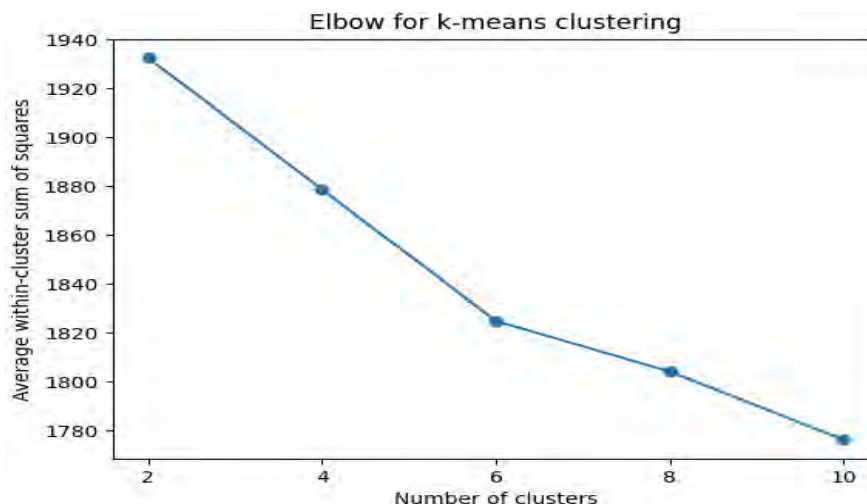


Рис. 12. Результат "ліктьового" методу

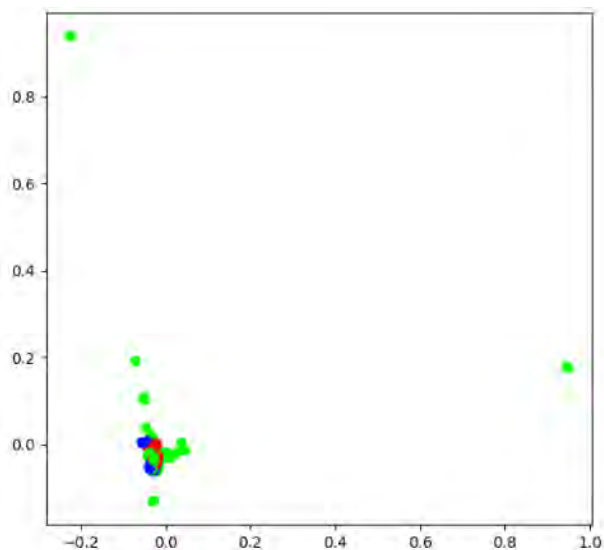


Рис. 13. Графік розподілу кластерів типу PCA

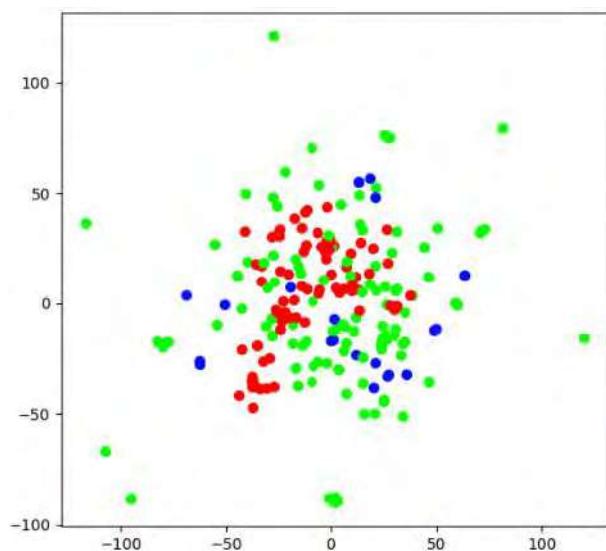


Рис. 14. Графік розподілу кластерів типу TSNE

На останок було виведено найбільш популярні ключові слова до кожного кластеру, з яких можна зробити певні висновки або помітити тенденції. З цією метою було обчислено середнє значення для всіх вимірів створеної моделі, які були розподілені в кожному кластері. Наступним кроком було сортування масивів середніх значень кожного кластеру за спаданням і обрані перші десять елементів, що зображені на рис. 15, де нульовий кластер містить негативні користувачські публікації та коментарі, перший кластер – позитивні й другий – нейтральні. Також для кращої візуалізації створено об'ємний 3D-графік, що зображений на рис. 16, де кожна точка показує певну текстову одиницю даних і, відповідно, визначаються координати точок x , y та z , що згодом будуть об'єднані в один із трьох кластерів. Інформація, яка раніше була зображена в декартовому просторі, зараз зображена в тривимірному, з чого можна зробити висновок про правильність створених кластерів. На основі наведеного графіка можна підсумувати щодо належності всіх обраних текстових екземплярів до певного кластеру в тривимірному просторі.

Провівши експеримент, можна дійти висновку, що використана комбінація алгоритмів, а саме нейронна мережа для аналізу тональності LSTM та алгоритм кластеризації *k-means*, працює ефективно й дає змогу точніше аналізувати датасети, ніж аналоги, особливо коли датасети сягають значних розмірів і необхідно точно проаналізувати тональність тексту разом із рівнем емоційності й ефективно розподілити на необхідну для подальших досліджень кількість кластерів. На рис. 17, де

на осі абсцис показано кількість поданих текстових одиниць, а на осі ординат – час у мілісекундах, відображено порівняння роботи комбінацій нейронної мережі CNN та алгоритму ієрархічної кластеризації, які мають складність алгоритму $O(n^2)$, та створеної в інтелектуальній системі нейронної мережі LSTM і алгоритму кластеризації k -means, що

мають складність алгоритму $O(n \log n)$. Відповідно, імплементовані алгоритми в інтелектуальній системі працюють як мінімум на 10...15% швидше та ефективніше, ніж описані раніше згорткова нейронна мережа та ієрархічна кластеризація, а також мають великі обсяги даних і ефективність роботи становить до 20%.

```
Cluster 0
one, country, nato, stop, people, putin, rt, russia, war, ukraine

Cluster 1
apmassaro3, attack, supporter, russia, civilian, today, russian, military, ukraine, rt

Cluster 2
monday, ukraine, oct, 10, defense, pic, russian, air, rt, missile
```

Рис. 15. Найпопулярніші ключові слова

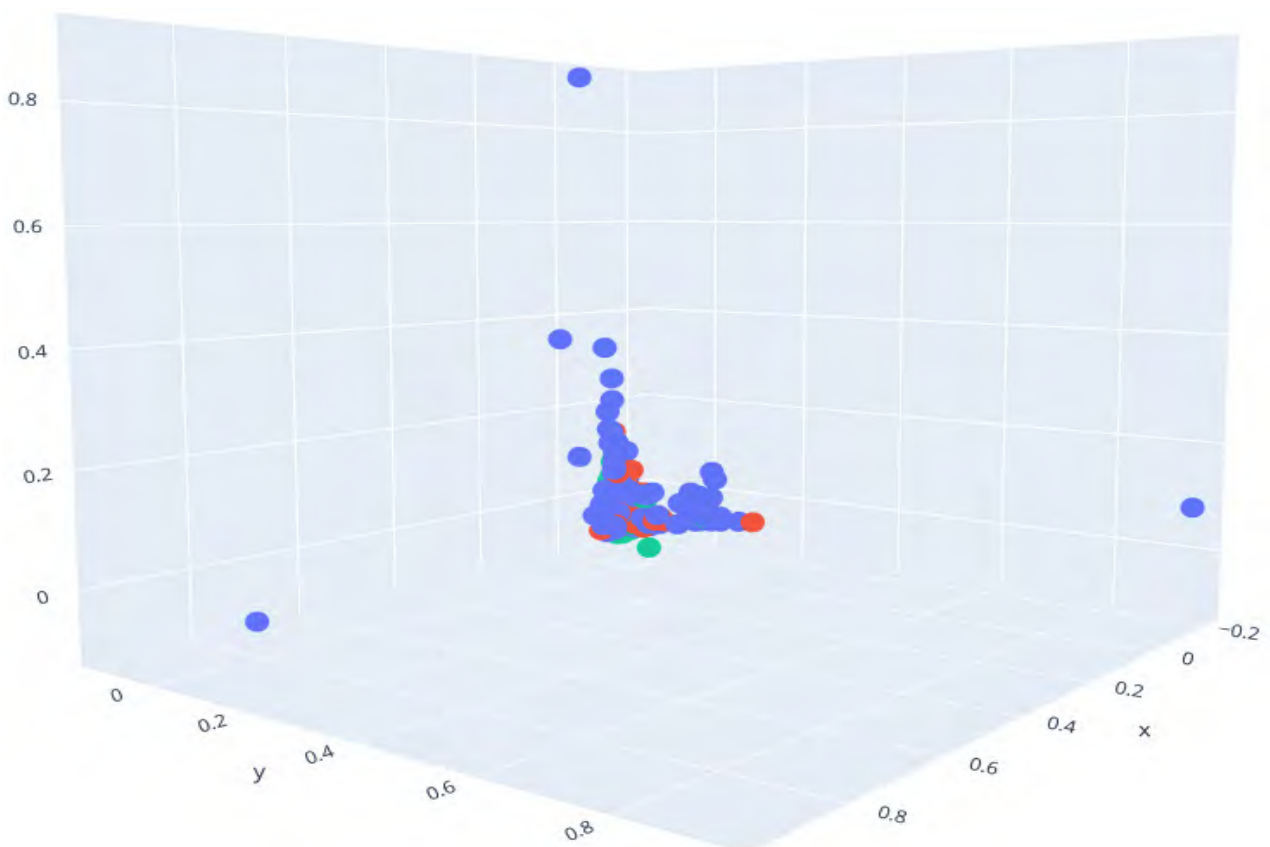


Рис. 16. Об'ємний графік розподілу кластерів

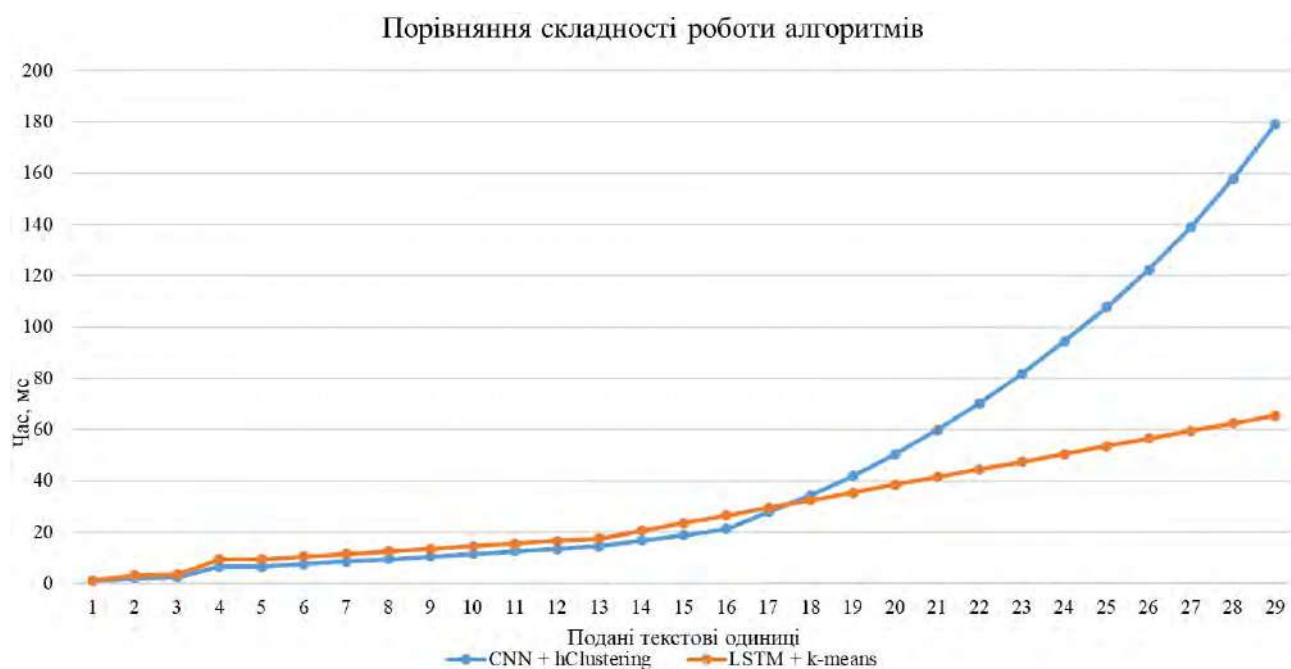


Рис. 17. Порівняння складності роботи алгоритмів

Висновки та перспективи подальшого розвитку

У процесі роботи імплементовано інтелектуальну систему аналізу тональності та кластеризації публікацій у соціальній мережі *Twitter*, за допомогою якої користувач може вводити конкретні параметри й ключові слова, завдяки яким здійснюватиметься завантаження публікацій і коментарів із *Twitter* для аналізу тональності повідомлень, їхньої емоційної оцінки та поділу на кластери. Описано важливість створення такої інтелектуальної системи й проаналізовано останні дослідження для розуміння, що на сьогодні вже реалізовано, а що ще потрібно зробити й, відповідно, повторити переваги й уникнути недоліків. Розглянуто застосування нейронних мереж різного спрямування та алгоритмів кластеризації. Визначено мету роботи та обґрунтовано, чому реалізація сучасної нейронної мережі LSTM та алгоритму кластеризації *k-means* є актуальним завданням для підвищення ефективності роботи системи й покращення точності фінальних результатів. Також описано функціонал системи, а саме сутність роботи її основних алгоритмів і загальну реалізацію ключових функціональних компонентів, і подано за допомогою діаграм, на яких зображено і блок-схеми роботи алгоритмів, і варіанти використання, і взаємодію всіх створених потоків даних інтелектуальної системи загалом.

Здійснено реальний експеримент із використанням створеної інтелектуальної системи, під час якого було задано ключові слова й параметри пошуку публікацій і коментарів у соціальній мережі *Twitter* та завантажено сукупність твітів, які збережені та сформовані в датасет. Після цього виконано форматизацію, лематизацію та стандартизацію текстових екземплярів для коректної роботи алгоритмів. Щодо певного тексту навчено й використано нейронну мережу *Long Short-Term Memory*, за допомогою якої здійснено як і загальний аналіз тональності з розділом тексту на негативний, нейтральний і позитивний, так і аналіз емоційного значення тексту, а саме розподіл від -1.0 , тобто максимально можливого негативного, до 1.0 – максимально можливого позитивного, відображено значення і суб'єктивність тональності. Аналогічно здійснено кластерний аналіз тексту з використанням алгоритму кластеризації *k-means*, створено й навчено модель і за допомогою "ліктвового" методу обрано оптимальну кількість кластерів для завантаженого датасету. Після розподілу текстових даних на кластери було графічно зображено сформовані кластери за допомогою PCA- та TSNE-графіків. Обчислено середнє значення для поточних вимірів створеної моделі й відображено по 10 найбільш популярних слів у кожному кластері, виведено зображення текстових елементів кожного кластеру за допомогою тривимірного графіка. Показано

різницю в ефективності та складності між, з одного боку, нейронною мережею CNN та ієрархічною кластеризацією і, з іншого боку, нейронною мережею LSTM і алгоритмом кластеризації *k-means*, що були реалізовані в інтелектуальній системі. Здобути результати можна порівняти із статтею [15], де автори аналізували коментарі користувачів у соціальній мережі *Twitter* щодо вірусу COVID-19. Автори використовували комбінацію нейронної мережі CNN та алгоритму ієрархічної кластеризації, унаслідок цього аналіз тональності через значну кількість даних є неточним і містить прогалини на графіках, також

кластеризація здійснювалася лише з окремими виділеними наборами даних, а не з усім датасетом, щоб провести коректну кластеризацію за не дуже тривалий проміжок часу. Створені в інтелектуальній системі нейронна мережа LSTM та алгоритм кластеризації *k-means* вирішують ці проблеми, оскільки вони можуть працювати як і з середніми, так і з великими за обсягом датасетами без втрат у точності отриманих результатів. Також створені алгоритми працюють на 10...15% швидше й, відповідно, дають змогу аналізувати всю наявну вибірку даних за один раз.

Список літератури

1. Almahmood R. J. K., Tekerek A. Issues and Solutions in Deep Learning-Enabled Recommendation Systems within the E-Commerce Field. *Applied Sciences*. 2022. № 12 (21). P. 256–264. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122111256>
2. Xie W., Damiano L., Jong C.-H. Emotional appeals and social support in organizational YouTube videos during COVID-19. *Telematics and Informatics reports*. 2022. № 8 (1). P. 100–128.
3. Abbas A. F., Jusoh A., Mas'od A., Alsharif A. H., Ali J. Bibliometric analysis of information sharing in social media. *Cogent Business & Management*. 2022. № 9 (1). P. 521–543. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311975.2021.2016556>
4. Villegas-Ch. W., Erazo D. M., Ortiz-Garcés I., Gaibor-Naranjo W., Palacios-Pacheco X. Artificial Intelligence Model for the Identification of the Personality of Twitter Users through the Analysis of Their Behavior in the Social Network. *Electronics*. 2022. № 11 (22). P. 381–399. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11223811>
5. Malkawi R., Daradkeh M., El-Hassan A., Petrov P. A Semantic Similarity-Based Identification Method for Implicit Citation Functions and Sentiments Information. *Information*. 2022. № 13 (11). P. 546–561. DOI: <https://doi.org/10.3390/info13110546>
6. Yuan Y., You T., Xu T., Yu X. Customer-Oriented Strategic Planning for Hotel Competitiveness Improvement Based on Online Reviews. *Sustainability*. 2022. № 14 (22). P. 152–199.
7. Yin J. Y. B., Saad N. H. M., Yaacob Z. Exploring Sentiment Analysis on E-Commerce Business: Lazada and Shopee. *Tem journal*. 2022. № 11 (4). P. 1508–1519. DOI: <https://doi.org/10.18421/TEM114-11>
8. Hinduja S., Afrin M., Mistry S., Krishna A. Machine learning-based proactive social-sensor service for mental health monitoring using twitter data. *International journal of Information Management Data insights*. 2022. № 2 (2). P. 103–124.
9. Bhadamkar A., Bhattacharya S. Tesla Inc. Stock Prediction Using Sentiment Analysis. *Australasian Accounting, Business and Finance journal*. 2022. № 16 (5). P. 52–66. DOI: <https://doi.org/10.14453/aabfj.v16i5.05>
10. Alhakiem H. R., Setiawan E. B. Aspect-Basled Sentiment Analysis on Twitter Using Logistic Regression with FastText Feature Expansion. *Jurnal resti (Rekayasa sistem dan Teknologi Informasi)*. 2022. № 6 (5). P. 840–846. DOI: <https://doi.org/10.29207/resti.v6i5.4429>
11. Pawelozzek I. Towards a Smart City—The Study of Car-Sharing Services in Poland. *Energies*. 2022. № 15 (22). P. 845–859. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228459>
12. Huang X., Gong P., Wang S., White M., Zhang B. Machine Learning Modeling of Vitality Characteristics in Historical Preservation Zones with Multi-Source Data. *Buildings*. 2022. № 12 (11). P. 1978–1989. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12111978>
13. Li C., Renda M., Yusuf F., Geller J., Chun S. A. Public Health Policy Monitoring through Public Perceptions: A Case of COVID-19 Tweet Analysis. *Information*. 2022. № 13 (11). P. 443–457. DOI: <https://doi.org/10.3390/info13110543>
14. Vysotska V. Information Technology for Internet Resources Promotion in Search Systems Based on Content Analysis of Web-Page Keywords. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2021. № 3. P. 133–151.
15. Corti L., Zanetti M., Tricella G., Bonati M. Social media analysis of Twitter tweets related to ASD in 2019–2020, with particular attention to COVID-19: topic modelling and sentiment analysis. *Journal of Big Data*. 2022. № 9 (1). P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00666-4>
16. Lampropoulos G., Keramopoulos E. Virtual Reality in Education: A Comparative Social Media Data and Sentiment Analysis Study. *International journal of recent contributions from Engineering, Science & IT*. 2007. № 10 (3). P. 221–235. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijes.v10i03.34057>
17. Liu H. Online review analysis on various networks' consumer feedback using deep learning. *IET networks*. 2022. № 11 (6). P. 234–244. DOI: <https://doi.org/10.1049/ntw2.12045>
18. Wang Y., Chen Z., Fu C. Synergy Masks of Domain Attribute Model DaBERT: Emotional Tracking on Time-Varying Virtual Space Communication. *Sensors*. 2022. № 22 (21). P. 450–471. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218450>

References

1. Almahmood R. J. K., Tekerek A. Issues and Solutions in Deep Learning-Enabled Recommendation Systems within the E-Commerce Field. *Applied Sciences*. 2022. № 12 (21). P. 256–264. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122111256>
2. Xie W., Damiano L., Jong C.-H. Emotional appeals and social support in organizational YouTube videos during COVID-19. *Telematics and Informatics reports*. 2022. № 8 (1). P. 100–128.
3. Abbas A. F., Jusoh A., Mas'od A., Alsharif A. H., Ali J. Bibliometric analysis of information sharing in social media. *Cogent Business & Management*. 2022. № 9 (1). P. 521–543. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311975.2021.2016556>
4. Villegas-Ch. W., Erazo D. M., Ortiz-Garces I., Gaibor-Naranjo W., Palacios-Pacheco X. Artificial Intelligence Model for the Identification of the Personality of Twitter Users through the Analysis of Their Behavior in the Social Network. *Electronics*. 2022. № 11 (22). P. 381–399. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11223811>
5. Malkawi R., Daradkeh M., El-Hassan A., Petrov P. A Semantic Similarity-Based Identification Method for Implicit Citation Functions and Sentiments Information. *Information*. 2022. № 13 (11). P. 546–561. DOI: <https://doi.org/10.3390/info13110546>
6. Yuan Y., You T., Xu T., Yu X. Customer-Oriented Strategic Planning for Hotel Competitiveness Improvement Based on Online Reviews. *Sustainability*. 2022. № 14 (22). P. 152–199.
7. Yin J. Y. B., Saad N. H. M., Yaacob Z. Exploring Sentiment Analysis on E-Commerce Business: Lazada and Shopee. *Tem journal*. 2022. № 11 (4). P. 1508–1519. DOI: <https://doi.org/10.18421/TEM114-11>
8. Hinduja S., Afrin M., Mistry S., Krishna A. Machine learning-based proactive social-sensor service for mental health monitoring using twitter data. *International journal of Information Management Data insights*. 2022. № 2 (2). P. 103–124.
9. Bhadamkar A., Bhattacharya S. Tesla Inc. Stock Prediction Using Sentiment Analysis. *Australasian Accounting, Business and Finance journal*. 2022. № 16 (5). P. 52–66. DOI: <https://doi.org/10.14453/aabfj.v16i5.05>
10. Alhakiem H. R., Setiawan E. B. Aspect-Based Sentiment Analysis on Twitter Using Logistic Regression with FastText Feature Expansion. *Jurnal resti (Rekayasa sistem dan Teknologi Informasi)*. 2022. № 6 (5). P. 840–846. DOI: <https://doi.org/10.29207/resti.v6i5.4429>
11. Pawełozek I. Towards a Smart City—The Study of Car-Sharing Services in Poland. *Energies*. 2022. № 15 (22). P. 845–859. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228459>
12. Huang X., Gong P., Wang S., White M., Zhang B. Machine Learning Modeling of Vitality Characteristics in Historical Preservation Zones with Multi-Source Data. *Buildings*. 2022. № 12 (11). P. 1978–1989. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12111978>
13. Li C., Renda M., Yusuf F., Geller J., Chun S. A. Public Health Policy Monitoring through Public Perceptions: A Case of COVID-19 Tweet Analysis. *Information*. 2022. № 13 (11). P. 443–457. DOI: <https://doi.org/10.3390/info13110543>
14. Vysotska V. Information Technology for Internet Resources Promotion in Search Systems Based on Content Analysis of Web-Page Keywords. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2021. № 3. P. 133–151.
15. Corti L., Zanetti M., Tricella G., Bonati M. Social media analysis of Twitter tweets related to ASD in 2019–2020, with particular attention to COVID-19: topic modelling and sentiment analysis. *Journal of Big Data*. 2022. № 9 (1). P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00666-4>
16. Lampropoulos G., Keramopoulos E. Virtual Reality in Education: A Comparative Social Media Data and Sentiment Analysis Study. *International journal of recent contributions from Engineering, Science & IT*. 2007. № 10 (3). P. 221–235. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijes.v10i03.34057>
17. Liu H. Online review analysis on various networks' consumer feedback using deep learning. *IET networks*. 2022. № 11 (6). P. 234–244. DOI: <https://doi.org/10.1049/ntw2.12045>
18. Wang Y., Chen Z., Fu C. Synergy Masks of Domain Attribute Model DaBERT: Emotional Tracking on Time-Varying Virtual Space Communication. *Sensors*. 2022. № 22 (21). P. 450–471. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218450>

Received 16.01.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Батиук Тарас Миронович – Національний університет "Львівська політехніка", аспірант кафедри "Інформаційні системи та мережі", вул. Степана Бандери, 12, Львів, Україна; e-mail: taras.m.batiuk@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5797-594X>

Досин Дмитро Григорович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний університет "Львівська політехніка", професор кафедри "Інформаційні системи та мережі", вул. Степана Бандери, 12, Львів, Україна; e-mail: dmytro.h.dosyn@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4040-4467>

Batiuk Taras – Lviv Polytechnic National University, Postgraduate Student of the Information Systems and Networks Department, Lviv, Ukraine.

Dosyn Dmytro – Doctor of Sciences (Engineering), Lviv Polytechnic National University, Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv, Ukraine.

IMPLEMENTATION OF THE INTELLECTUAL SYSTEM OF SENTIMENT ANALYSIS AND CLUSTERIZATION OF PUBLICATIONS IN THE TWITTER SOCIAL NETWORK

Thanks to the intensive development of social networks, the intensity of exchange of short electronic text messages is constantly increasing, the tone of which can serve as a sensitive indicator of public mood and important social phenomena, interesting for sociologists, politicians, economists, and specialists in other fields. In this regard, the task of automating the processing of such natural language messages is of significant scientific and practical interest. The **object** of this study is the sentiment of user publications in the Twitter social network. Due to the great popularity of the social network itself and the large number of user messages, which are short in nature, it is possible to conveniently determine the mood of user posts and combine them into clusters according to the given parameters of the intelligent system. The **subject** of the study is methods and algorithms for analysing the sentiment of large arrays of messages containing the necessary keywords and relating to a certain specific topic, determining the factors and distributions of the sentiment of messages based on the input array of system data, dividing messages into main groups and providing estimates within certain defined limits in to each group, division into clusters according to the obtained search point and display of the obtained results in the desired format. The **purpose** of the work is to implement an intelligent system of sentiment analysis and clustering of publications based on a recurrent neural network of long short-term memory (LSTM) and the k-means clustering algorithm. The following main **tasks** are solved in the work: 1. To analyse the most used and newest algorithms, methods, approaches and means of implementing tasks of sentiment analysis and clustering of publications in social networks. 2. To develop a conceptual structure of an intellectual system of sentiment analysis and clustering of publications. 3. To form functional tasks for the key modules of the created intelligent system of sentiment analysis and clustering of publications in the Twitter social network. 4. Implement an intelligent system of sentiment analysis and clustering of publications based on a recurrent neural network and the *k-means* clustering algorithm and conduct experimental verification. Among the **methods** used for this purpose are the recurrent neural network of long short-term memory; k-means clustering algorithm. The following **results** were obtained: the general structure of the intellectual system of sentiment analysis and clustering of publications was analyzed, designed and built. The main task of creating the system, first of all, was to improve the recurrent neural network of long-short-term memory, which, thanks to the improved algorithm, significantly facilitates text processing by natural language processors according to text data of a certain size. Also, a special clustering algorithm, namely k-means, was used in parallel, thanks to which it was possible to change the general approach to clustering and the creation of final clusters, in accordance with the obtained results of the work of the recurrent neural network. **Conclusions:** As a result of applying a combination of LSTM neural network and k-means clustering algorithm, it was possible to speed up the process of sentiment analysis and clustering of posts in the Twitter social network by 10...15% compared to similar convolutional neural networks and hierarchical clustering.

Keywords: neural network; LSTM; sentiment analysis of publications; cluster analysis; social network Twitter.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Батиук Т. М., Досин Д. Г. Імплементация інтелектуальної системи аналізу тональності та кластеризації публікацій у соціальній мережі Twitter. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 25–44. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.025>

Batiuk, T., Dosyn, D. (2023), "Implementation of the intellectual system of sentiment analysis and clusterization of publications in the Twitter social network", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No.1 (23), P. 25–44. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.025>

R. GAMZAYEV, M. TKACHUK

DEVELOPMENT OF PROBLEM-SPECIFIC MODELING LANGUAGE TO SUPPORT SOFTWARE VARIABILITY IN "SMART HOME" SYSTEMS

Building conceptual models for software design, in particular for high-tech applications such as smart home systems, is a complex task that significantly affects the efficiency of their development processes. One of the innovative methods of solving this problem is the use of domain-specific modeling languages (DSMLs), which can reduce the time and other project resources required to create such systems. **The subject** of research in this paper is approaches to the development of DSML for Smart Home systems as a separate class of *Internet of Things* systems. **The purpose** of this work is to propose an approach to the development of DSMLs based on a model of variability of the properties of such a system. The following **tasks** are being solved: analysis of some existing approaches to the creation of DSMLs; construction of a multifaceted classification of requirements for them, application of these requirements to the design of the syntax of a specific DSML-V for the creation of variable software in smart home systems; development of a technological scheme and quantitative metrics for experimental evaluation of the effectiveness of the proposed approach. The following **methods** are used: variability modeling based on the property model, formal notations for describing the syntax of the DSML-V language, and the use of the open CASE tool metaDepth. **Results:** a multifaceted classification of requirements for a broad class of DSML languages is built; the basic syntactic constructions of the DSML-V language are developed to support the properties of software variability of "Smart Home" systems; a formal description of such syntax in the Backus-Naur notation is given; a technological scheme for compiling DSML-V specifications into the syntax of the language of the open CASE tool metaDepth is created; the effectiveness of the proposed approach using quantitative metrics is experimentally investigated. **Conclusions:** the proposed method of developing a specialized problem-oriented language for smart home systems allows for multilevel modeling of the variability properties of its software components and provides an increase in the efficiency of programming such models by about 14% compared to existing approaches.

Keywords: domain-specific language; software; modeling; variability; Smart-home.

Introduction

Research actuality and motivation

In high-tech areas of IT development, such as Smart-home systems, mobile applications [1], and distributed information systems based on cloud platforms [2], innovative approaches to software development are required. This, in turn, involves the use of the latest design methods and technologies: domain-driven development, model-driven architecture, and the use of knowledge-based software tools and technologies [3]. The main practical goal of applying such approaches to software development is to reduce the time and other project resources required to meet the requirements of different groups of future users. To achieve this goal, methods and technologies for building domain-specific programming languages (DSLs) [4] and domain-specific modeling languages (DSMLs) [5] for a particular domain of software development have been successfully used recently, which makes it possible to ensure more efficient software development and maintenance processes. Another significant advantage of using DSL and DSML is the ability to support the

variability and adaptability of relevant software solutions consistently and effectively, which in modern software engineering has acquired a common definition – "variability" of software [6]. It is the provision of software variability properties that is a critical factor in automating the process of creating software product lines (SPL), which are complex software applications that have a common and manageable set of functions to meet the requirements of users of a particular segment of the IT market and are built from a common set of project assets (components) in a predetermined manner [7]. Thus, the above confirms the scientific relevance and practical focus of this study.

Brief review of some related publications

A considerable number of recent publications are devoted to the problems of developing approaches to the creation and application of DSL and DSML. In the course of the study, a brief review of works is made and special attention is paid to the issues of ensuring software variability in SPL.

Thus, work [8] analyzes and summarizes the features of such modern software applications as Internet

of Things systems, Smart Home systems, Embedded Control Software and some others at a fairly high methodological level. The authors of this paper propose to designate them as smart service systems (SSS). It is also shown that it is to automate the development and subsequent software implementation of SSS systems that it is advisable to use appropriate subject-oriented modeling languages (DSML), which also ensures the achievement of a certain level of software variability in such systems. The authors propose an approach to creating a syntax, grammatical rules and a compilation mechanism for such a language. The effectiveness of this approach has been tested on the example of an intelligent system for controlling thermostats in a Smart Home.

Paper [9] considers an original approach to creating sets of semantically related DSML languages for a particular domain, which are considered as a special type of software product lines (SPL) and for the development of which well-known domain engineering methods and technologies can be applied. In particular, the authors propose an appropriate metamodel for describing the entire DSML family of languages, which also provides support for the properties of variability in design decisions in the process of developing the target software system, and also offers an appropriate CASE tool for automating the proposed approach.

Study [10] focuses on how the use of DSML can increase the level of variability of SPLs at the stage of generating the source code of their individual components. The authors propose to apply the Model Driven Engineering (MDE) software development methodology consistently. To do this, the paper introduces a methodology for building a DSML using the concept of a metamodel, which is then transformed into an equivalent set of feature diagrams, which then allows the use of a well-known and effective method of analyzing and modeling various domain models FODA (Feature-oriented Domain Analysis) (for example, in [11]). This approach is illustrated by the development of software for a learning management system, where it is the support of a sufficient level of variability that allows you to customize flexibly its functionality to the needs of different groups of students and teachers. The study [12] also shows positive results of creating and applying SPL construction methods and MDE principles to develop a multi-level information system for the purpose of communication among university students.

And finally, a new publication [13] (published in 2022), which addresses an important methodological problem of ensuring the possibility of transforming

a domain model built using a particular DSML into a set of corresponding property models, i.e., FODA models, in the process of developing any SPL, attracts special attention. The authors propose to use a set of specific tags to annotate the text of the description of the origin model in DSML and a system of rules for its transformation to obtain the corresponding property models that can be represented in the form of XML specifications.

It should be noted that, despite a considerable number of publications on the development and application of DSML, the following issues remain insufficiently developed: analysis and structuring of the set of requirements for creating DSML, use of formalized notations to describe DSML syntax, selection and methodology of applying certain quantitative metrics to assess the effectiveness of using a particular DSML in a particular subject area.

The purpose of this research is to study some of the existing approaches to creating promising DSMLs; to build one of the possible generalized classifications of requirements for them; to apply the identified requirements to design the syntax of a specific DSML to support the processes of creating variable software in Smart Home systems; to develop a technological scheme and quantitative metrics for experimentally evaluating the effectiveness of the proposed approach.

Materials and methods

To achieve the research objective, it was first necessary to formulate the basic requirements for creating an effective DSML in any problem domain. Based on the analysis of the well-known work [14], as well as our own positive experience [15, 16], such requirements are presented in a structured form in Figure 1.

The Formal requirements define the basic rules for choosing the notation and forms of describing the syntax and grammar of the target DSML, namely (see Figure 1):

requirement F1 – it is necessary that the notation for a modeling language have the means for accurate and complete specification of its syntax and corresponding formal grammar (e.g., Backus-Naur notation, etc.);

requirement F2 – the concepts used to define DSML should be consistent with the general concepts used in modern software development, such as object-oriented approach, domain-driven design, model-driven architectures, etc.;

requirement F3 – the modeling language should allow building models at different levels of abstraction,

i.e., support hierarchical sets of such models with the possibility of their step-by-step detailing, i.e., support mechanisms for building metamodels and meta-metamodels;

requirement F4 – the modeling language should contain concepts of the system's domain of application to maintain the integrity of models created with the help of DSML and ensure their reusability.

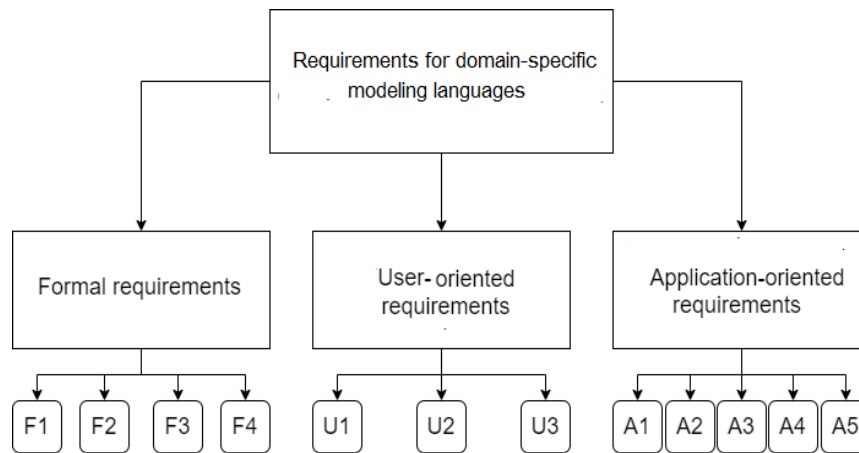


Fig. 1. Classification of requirements for domain-specific modeling languages DSML

The next group of requirements in Figure 1 are User-oriented requirements: these are domain experts, system analysts, and software developers. These requirements include:

requirement U1 – the syntax and grammatical constructions of the target DSML should correspond to the semantic concepts and business processes that its future users already work with to the maximum extent possible;

requirement U2 – the modeling language should provide a manageable set of basic functionalities sufficient to create domain models with regard to the variability of their properties, for example, in the form of models in the FODA notation;

requirement U3 – grammatical rules for defining the semantics of the target DSML must meet the functional requirements of its future end users (see above).

Finally, the last group of requirements is focused on supporting the ability to configure and adapt the target DSML to the specifics of the relevant subject area (Application-oriented requirements), and they can be formulated as follows (see figure 1):

requirement A1 – the modeling language should provide opportunities for describing additional objects and bindings that are specific to certain user groups, i.e., support certain mechanisms for extending language structures and rules for their construction;

requirement A2 – based on the correct specification of the problem task performed in DSML,

it should be possible to generate source code in one of the common programming languages: Java, C#, C++, etc.;

requirement A3 – to support the effective work of end users for the practical application of DSML, it is necessary to have appropriate CASE tools with a friendly user interface;

requirement A4 – for further programmatic implementation of components in the target software based on the obtained domain model (see above), it is necessary to be able to use DSML compatibly with the functionality of the corresponding DSL compiler;

requirement A5 – appropriate quantitative and/or qualitative metrics should be developed and applied to evaluate the effectiveness of the DSML in a particular domain.

In creating the syntax (grammar) of the proposed DSML, the main requirements of the above were met: **F1–F4, U1–U3, A1–A5**.

The next important concept in the context of this study is the concept of software variability [6]. In the design of SPL, an appropriate variability model of its properties is developed [7], which can reflect the ability to change them flexibly at different phases of the life cycle: domain analysis, architectural design, coding, and maintenance; for different project assets: variability of software requirements, variability of design options, variability of software components, and variability of test artifacts. Figure 2 shows a generic UML entity diagram, which is a metamodel of project asset variability in some SPL development process [17].

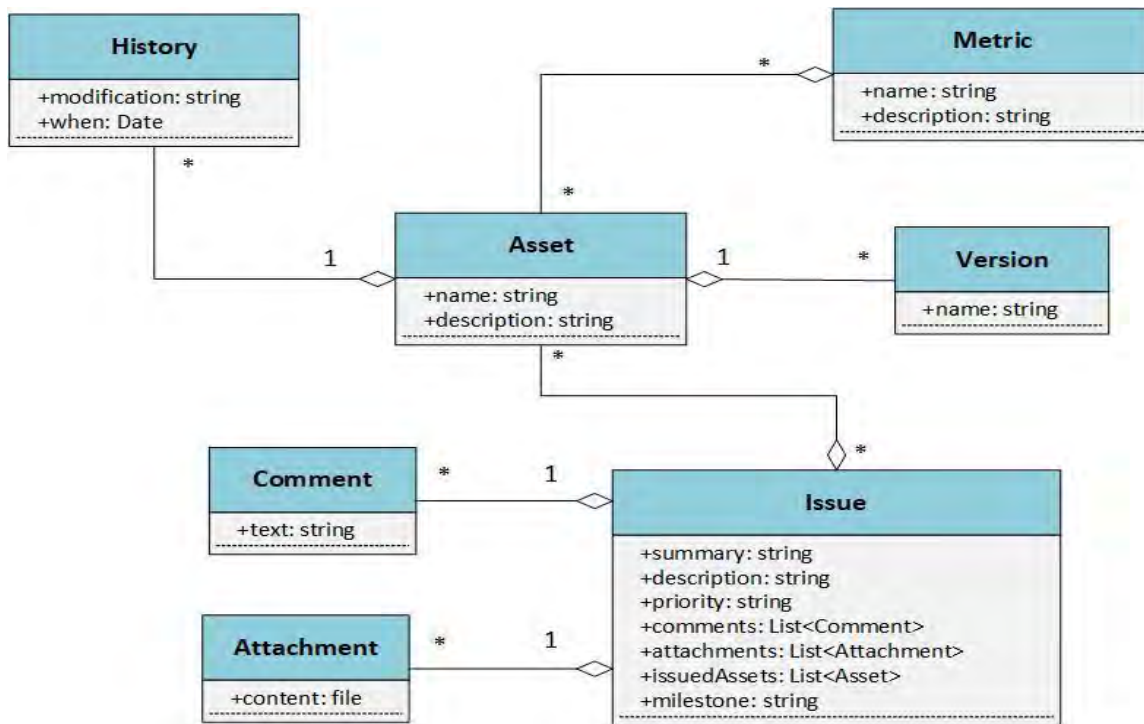


Fig. 2. Metamodel of project asset variability in SPL development

Figure 2 shows the main Asset entity, which summarizes all possible artifacts in the development of the LSP, and it is linked to the History entity, which is responsible for tracking changes made to some Asset objects, and the Issue entity, which contains information about what specific changes were made, in which object, and by whom. The "Asset" entity is linked to the "Metric" entity, which contains metrics for describing and defining the parameters of individual assets, as well as to the "Version" entity, which stores the current versions for each modification of the "Asset" objects. The information contained in the above-mentioned basic entities of the variability metamodel can be expanded by defining records in additional entities, such as Comment and Attachment.

For a better understanding of the principles of variability, let us consider more specifically the task of modeling variability in the development of a hardware and software system such as Smart Home Systems (SHS). Paper [16] states that the variability of Smart Home Systems can manifest itself in the following features (in general):

1) variability of the user interface; a typical set of options may, for example, include a graphical interface via a control panel, via a web interface on a personal computer or via an interface on a smartphone, and

in some cases, voice control (Amazon Alexa, Apple HomePod, etc.)

2) variability of hardware and software components; this feature implies the presence of different groups of connected smart devices: lighting, water and heat supply, control of electronic devices (e.g., TV or audio speakers), various motion sensors, sensors responsible for opening/closing objects (doors/windows), etc.;

3) variability of the level of controllability and reliability of operation; the home automation system can support different levels of these indicators, for example, the basic level can provide self-diagnostics and error reports. Higher levels can contain redundant system components for the most important functions (light, water, gas, opening and closing doors), perform tasks for backing up and updating components through cloud services (Google Cloud, Microsoft Azure, etc.).

Figure 3 shows a FODA model that represents the variable components of a Smart Home system [15] and can be used to comply with the above-mentioned variability features in the development of a corresponding DSML (see requirements A1–A5 above).

Based on this FODA model, a syntax and grammar for the DSML language with variability support (hereinafter referred to as DSML-V) can be created in the process of designing a LSP for Smart Home tasks. Due to the complexity of this task, we decided to apply

a bottom-up rather than top-down approach to this development [16], i.e., first, it is necessary to develop the most important individual language constructs

at the lower logical levels of modeling, which then need to be generalized at the upper level of description of the corresponding formal grammar.

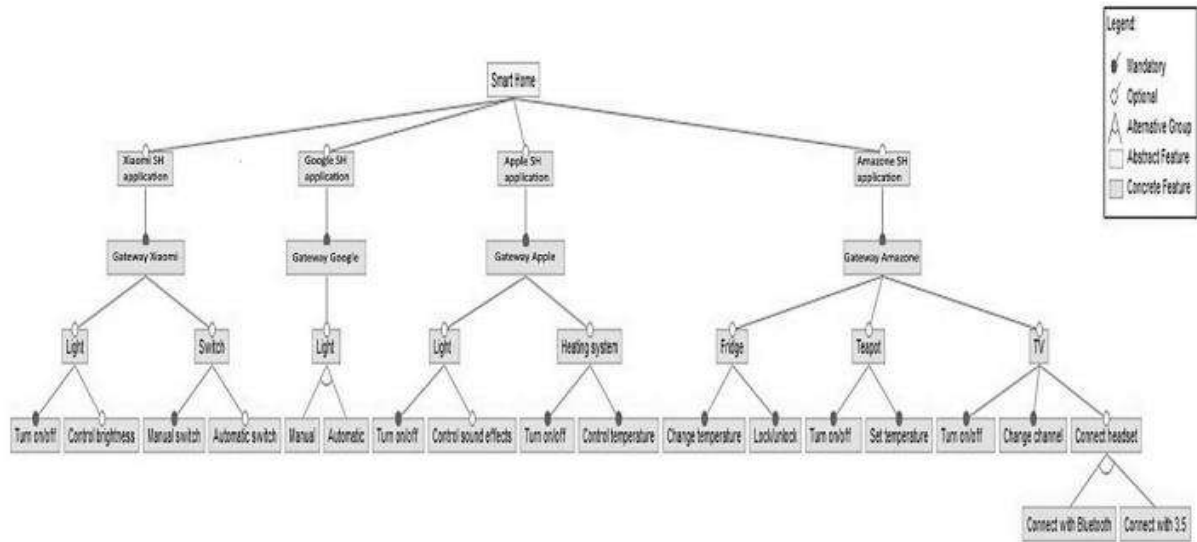


Fig. 3. Variable FODA-model of Smart Home system features

The first task is to determine how the proposed DSML-V language will be used and extended by its users, taking into account the list of requirements F1–F4. For this purpose, special tags were used to identify language elements that should be extensible and to introduce restrictions on a certain degree of extensibility. The list of possible tags was taken from the syntax of the open source metaDepth toolkit [18]. Figure 4 shows the definition of the textual syntax of the DSML-V language for the Smart Home system:

```
01) strict Model SmartHome@1 {
02)   strict Node Device {
03)     variability@1: double = 0;
04)     isTurnedOn: boolean = false;
05)     positiveVar: $self.variability > 0$
06)   }
07)}
```

Fig. 4. Code snippet to describe the basic syntax of DSML-V

The *SmartHome* model does not have an ontological type (that is, it is not an instance of another model), so it is declared using the *Model* keyword (code line 1). This model defines the *Device* class using the *Node* keyword (line 2), which has certain attributes (lines 3, 4). It is in *Device* that the key attribute *variability* is introduced, which will help solve the problem of supporting and ensuring variability.

The level of model variability is indicated by the "@" symbol. The "\$" symbol should be used to define certain constraints on model attributes. For example, the *positiveVar* constraint requires that the *\$variability* attribute be more than 0 (code line 5). Figure 5 (code line numbering continued) shows an instance of creating the *XiaomiShApplication* model and a *LightSwitcher* instance of this model:

```
08)SmartHome XiaomiShApplication {
09)  Device GatewayXiaomi {
10)    variability = 0.4;
11)  }
12)}
13)14)XiaomiShApplication LightSwitcher {
14)  GatewayXiaomi light {
15)    isTurnedOn = true;
16)  }
17)}
```

Fig. 5. Example of extending the basic DSML-V syntax

The *XiaomiShApplication* model created in lines 8–12 has the *SmartHome* ontological type used instead of the *Model* keyword. Line 10 sets the initial variability for this model. If the value of the attribute is negative, this will lead to a model verification error, because the corresponding constraint was set in Figure 4 (line 5). Lines 13–17 create an instance

of *LightSwitcher* of the *XiaomiShApplication* model, as well as an instance of light of the *GatewayXiaomi* model, and set the value of its *isTurnedOn* attribute.

Figure 6 shows an instance of creating a *XiaomiShApplication* model (lines 01–03) and a *LightSwitcher* instance (lines 04–06) using the developed text syntax:

```
01)XiaomiShApplication {
02)GatewayXiaomi(0.4)
03)}
04)XiaomiShApplication LightSwitcher {
05)GatewayXiaomi light(true)
06)}
```

Fig. 6. An instance of creating a *XiaomiShApplication* model

Now, summarizing the above particular examples of the proposed syntax of the DSML-V language, we can describe the corresponding formal grammar for this language in the Backus-Naur notation [19], which is shown in Figure 7.

```
01)<metamodel> ::= <model lvl 1> <EOL> <model lvl 0>
02)<model lvl 1> ::= <identifier> "{" <identifier> "("
    <variability> ")" "}"
03)<identifier> ::= <letter> | <identifier> <letter> |
    <identifier> <decimal digit>
04)<letter> ::= [A-Za-z]
05)<decimal digit> ::= [0-9]
06)<variability> ::= <decimal digit> | <decimal digit> "."
    <decimal digit>
07)<model lvl 0> ::= <identifier> <identifier> "{"
    <identifier> <identifier> "(" <boolean> ")" "}"
08)<boolean> ::= "true" | "false"
```

Fig. 7. Syntax of the DSML-V language in the Backus-Naur notation

As you can see from Figure 7, the metamodel (line 1) consists of two models: the level 1 model (line 2) and the level 0 model (line 7), whose syntax pattern is defined in Figure 4. The models of each level contain identifiers (line 3) and other auxiliary syntactic constructs. It is important to note that the variability (line 6) in this case corresponds to a fractional number.

We propose to extend the templates to customize the allowed extensions for a specific syntax. To do this, let's introduce new keywords: *flingext* – to allow the declaration of new attributes without an ontological type; *lingext* – to allow the addition of new object classes

without an ontological type; *constraints* – to declare constraints; *super* – to define new inheritance relationships for object classes. In addition, two additional keywords allow you to define how these extensions should be created at meta-level 0: *flinginst* for field instances and *linginst* for object class instances.

Figure 8 shows the definition of a specific extensible text syntax with the addition of suggested keywords:

```
01)Syntax for SmartHome["smarthome"] {
02)  template@1 TSmartHome for Model SmartHome:
03)    "id '{' (&TDevice | lingext)* '}'"
04)  template@1 TDevice for Node Device:05)  "id
    ('#variability ')? ('extends' supers)?
05)    (';' | '{' (flingext ';' | constraint)* '}'")
06)  template@2 DeepDevs for Model SmartHome:
07)    "typename id '{' &DeepDev* '}'"
08)  template@2 DeepDev for Node Device:
09)    "typename id '(' isTurnedOn flinginst* ')'"
```

Fig. 8. Code fragment for defining extensible syntax

The use of *lingext* (line 03) allows you to define new object classes at meta-level 1. The expression on line 04 enables inheritance between *Device* instances, and the expression on line 07 allows you to define new fields and constraints in *Device* instances. In addition, line 09 allows you to create instances of these additional fields in indirect *Device* instances.

Figure 9 shows an example of creating the *GatewayXiaomi* model using the inheritance mechanism:

```
01)GatewayXiaomi {
02)  BaseController(0.25) {
03)    isTurnedOn: boolean = false;
04)  }
05)  PressureController extends BaseController;
06)  LightController extends BaseController {
07)    light: Light;
08)  }
09)  Node Light {
10)    brightness: double;
11)  }
12)}
```

Fig. 9. An example of creating a *GatewayXiaomi* model

For the possible software implementation of the proposed DSML-V language, an appropriate tool environment is required, a fairly complete

overview of which can be found, for example, in [18]. We have analyzed the functionality of several tools for creating DSML.

- *Clooca* – is a development environment that allows you to create DSML and their code generators (JavaScript, Python, PHP, Ruby, etc.), is used according to the Software as a Service (SaaS) architectural model,

allows you to create a description of the syntax of the corresponding DSML in JSON text format using a visual graphical interface where the user works with tabular forms and diagrams to describe objects, relationships and properties in a particular domain. Figure 10 shows an example of such an interface, which is quite typical for other similar CASE tools (see below).

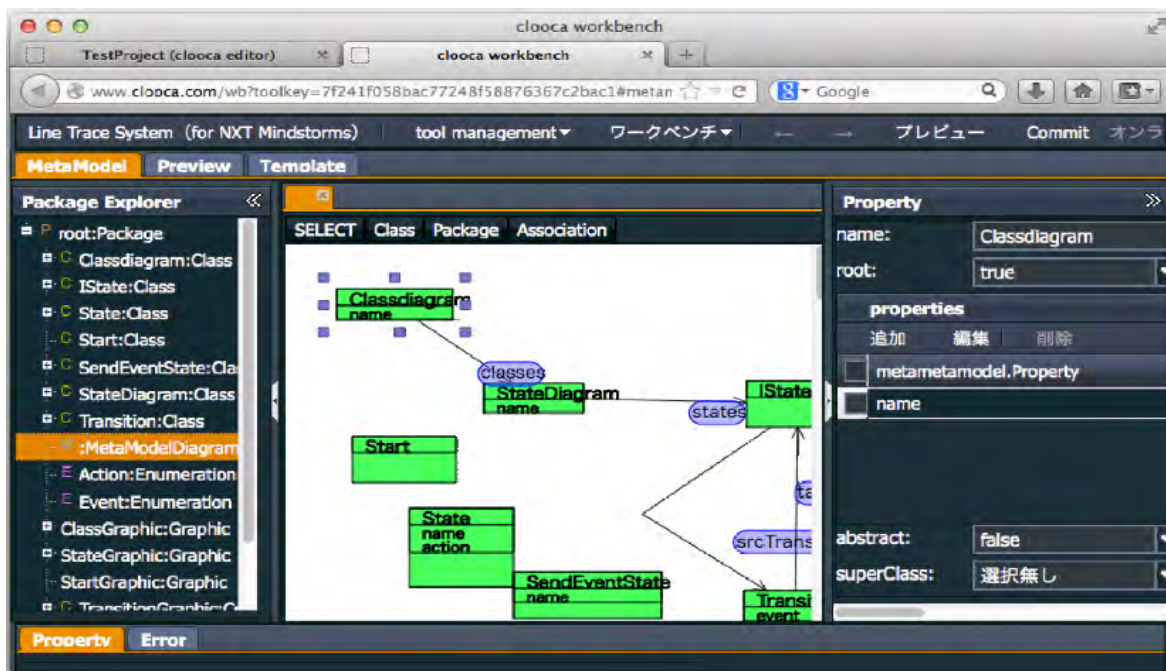


Fig. 10. An example of a developer interface in the Clooca CASE tool

- *Generic Modeling Environment* (GME) is a software tool in the form of a web-based application for creating DSMLs for various purposes, which can be further extended by adding new properties that are specific to the selected domain. GME has a well-developed visual user editor in which you can create appropriate metamodels, which can be further exported in XML format or stored in external distributed noSQL databases [20] for reuse.

- *Eclipse Modeling Framework* (EMF) – is an open-source, extensible, Java-based domain modeling platform that offers advanced functionality in the form of its own IDE. EMF allows you to create or import a suitable domain data model, as well as tables and XMI schema for such a model. The Java source code generated from this model can be edited by the user to develop the target application.

Along with the above tools for creating DSML, we have considered the MetaDepth toolkit [21], which uses ontological specifications to describe syntax and grammatical rules, has functionality that is largely

similar to the already analyzed Clooca, GME, and EMF environments, but, unlike them, allows building systems with an arbitrary number of meta-levels of modeling a particular domain that meets the requirements of F1–F4 (see the above diagram at Figure 1).

That is why this tool was chosen to develop a technological scheme for the implementation of the proposed DSML-V language, shown in IDEF0 notation at Figure 11.

In this diagram, the first functional block (FB), designated as A0, compiles a program created by experts in a particular subject area using the proposed DSML-V syntax, as well as taking into account the variable FODA model of the Smart Home system (see Figure 3). The output of this FB is the corresponding metamodel in the .mdepth format [21]. The second FB A1 processes the resulting metamodel for a subject-oriented metamodeling language using the metaDepth API and Multi-Level Language tools. The output of FB A1 is a specific specification of a subject-oriented metamodeling language.

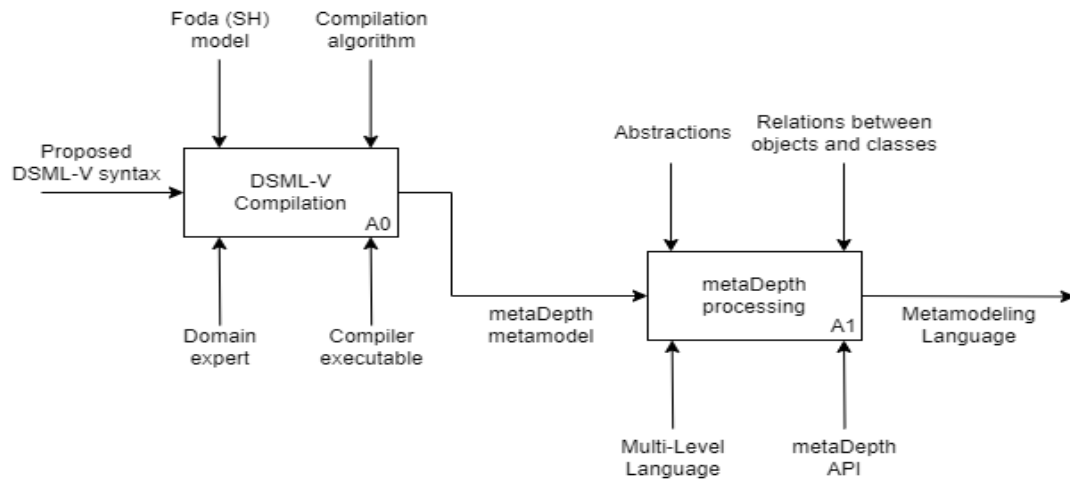


Fig. 11. Compilation flowchart for DSML-V language

Experimental results and their discussions

To investigate the effectiveness of using the DSML-V language, it is proposed to compare its syntax with the built-in syntax of the metaDepth tool [21] to build a conditional model in the Smart Home domain based on the variable FODA model of such a system shown in Figure 3.

As an example, let's consider the task of creating a model of variable software for controlling the equipment of one room, which is part of the Smart Home system. A variety of sensors can be installed in such a room: light, pressure, air, motion, etc. They can be

controlled by a common control mechanism – a specific gateway. Each such gateway has its own variability index, as well as special attributes. A light sensor, for example, should turn on the night light and turn off the daylight depending on the time of day. Accordingly, there can be several devices using such a gateway. To illustrate the user interface for managing the configurations of hardware and software resources in such a system, you can use the functionality of the open CASE tool LabView with the built-in visual modeling environment Home I/O [22]. The example of a possible interface is shown in Figure 12.



Fig. 12. An example of a fragment of the user interface of the Smart Home system

Figure 13 shows the code snippet required to create the described model using the built-in metaDepth syntax:

```

01) strict Model SmartHome@2 {
02)   strict Node Device {
03)     variability@1: double;
04)     isTurnedOn: boolean = false;
05)     positiveVar: $self.variability > 0$
06)     extid@1: $self.newFields().exists(f | f.isId())$
07)   }
08) }
09) SmartHome XiaomiShApplication {
10)   Device GatewayXiaomi {
11)     variability = 0.4;
12)   }
13) }
14) XiaomiShApplication LightSwitcher {
15)   GatewayXiaomi light {
16)     isTurnedOn = false;
17)   }
18)   GatewayXiaomi switch {
19)     isTurnedOn = true;
20)   }
21) }

```

Fig. 13. Code fragment for creating a model in the metaDepth language

Figure 14 shows the code fragment necessary to create the described model using the proposed syntax of the DSML-V language, which is presented in Figure 7 and Figure 8.

```

01)Syntax for SmartHome[".smarthome"] {
02)  template@1 TSmartHome for Model SmartHome:
03)    "id '{ (&TDevice | lingext)* }'"
04)  template@1 TDevice for Node Device:05)  "id
(' '#Variability ')? ('extends' supers)?
06)    ('| '{ (flingext '| constraint)* }')'"
07)  template@2 DeepDevs for Model SmartHome:
08)    "typename id '{ &DeepDev* }'"
09)  template@2 DeepDev for Node Device:
10)    "typename id '{ action flinginst* }'"
11)
12)XiaomiShApplication {
13)  GatewayXiaomi(0.4)
14)}
15)XiaomiShApplication LightSwitcher {
16)  GatewayXiaomi light(false)
17)  GatewayXiaomi switch(true)
18)}

```

Fig. 14. Code snippet for creating a model in DSML-V

To compare the code snippets in Figure 13 and Figure 14, you can use such an efficiency indicator as the number of lines of code (LOC). Then the corresponding efficiency factor for the proposed DSML-V syntax, $K_{ef}(1)$, can be calculated using the following formula:

$$K_{ef}(1) = \frac{LOC_{MD} - LOC_{DSML}}{LOC_{MD}} \times 100\%, \quad (1)$$

where LOC_{MD} – number of code in the metaDepth; LOC_{DSML} – number of code lines in the DSML-V language.

The indicator $K_{ef}(1)$ determines the advantage of using the appropriate DSLM-V syntax to reduce the clinesost of describing the model of the Smart Home system. The calculation of this indicator by formula (1) is

$$K_{ef}(1) = \frac{21-18}{22} \times 100\% = 14.28\%.$$

As you increase the number of model instances created, the efficiency of using the proposed syntax also increases, since the number of lines required to create each subsequent model instance decreases. For example, in Figure 13, the 8 lines of code are required to create instances of the *GatewayXiaomi* light, switch model (lines 14–21), and to create the same instances in Figure 14 using the proposed syntax, the 7 lines are required (lines 12–18).

Then the second possible performance indicator, $K_{ef}(2)$, can be calculated using the following formula:

$$K_{ef}(2) = \frac{LOC_{E_MD} - LOC_{E_DSML}}{LOC_{E_MD}} \times 100\%, \quad (2)$$

where LOC_{E_MD} is the number of code lines required to create model instances (lines 14–21 in Figure 13) using the built-in metaDepth syntax; LOC_{E_DSML} is the number of code lines required to create model instances (lines 12–18 in Figure 14) using the proposed syntax.

For the described case, this indicator, calculated by formula (2), is:

$$K_{ef}(2) = \frac{8-7}{8} \times 100\% = 12.5\%.$$

In order to obtain a weighted average estimate of the final effectiveness of the proposed DSML-V syntax K_{avg} , the assessment described by the following formula can be applied:

$$K_{avg} = \frac{K_{ef}(1) + K_{ef}(2)}{2}, \quad (3)$$

where $K_{ef}(1)$ is the efficiency indicator from formula (1); $K_{ef}(2)$ is the efficiency indicator from formula (2).

The value of the weighted average estimate of the final efficiency, calculated using formula (3), is

$$K_{avg} = \frac{14.28 + 12.5}{2} = 13.39\%.$$

Thus, the approximate weighted average efficiency estimate (13.39%) of the use of the developed problem-oriented variability modeling language DSML-V obtained in this study basing on the formulas (1)–(3) proves its superiority over such a common open tool for general DSML language development as metaDepth [21].

Conclusions and further work

The proposed work substantiates the relevance of solving the scientific and technical problem of building conceptual models for the design of high-tech applications such as Smart Home systems, in particular, using domain-specific modeling languages (DSML), which can significantly reduce the time and other project resources required to create these systems. To this end, the authors have identified and accomplished the following tasks Analyzing some existing approaches to the development

of DSML, proposing a multifaceted classification of requirements for them, based on which the basic syntactic structures of the target DSML-V language were created, which provides support for the variability properties of Smart Home systems; formally describing such a syntax in the Backus-Naur notation; developing a technological scheme for compiling metamodels in DSML-V into the syntax of the language of the open CASE-tool metaDepth. A study of the effectiveness of this approach using selected quantitative metrics was conducted, which proved that the proposed method of developing a specialized problem-oriented language for Smart Home systems allows for multilevel modeling of the variability properties of its software components and provides an increase in the efficiency of programming such models by about 14% compared to some existing approaches.

To continue this research, it is planned to extend the proposed DSML-V syntax with the addition of more complex, comprehensive, and subject-oriented constructs, as well as to implement fully programmatically a prototype compiler for this language for modeling Smart Home systems.

References

1. Joanna, F., DeFranco, a, Mohamad, Kassab. (2021), "Smart Home Research Themes: An Analysis and Taxonomy", *Procedia Computer Science*, Vol. 185. P. 91–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.05.010>
2. Davydov, V., & Hrebenuk, D. (2020), "Development of the methods for resource reallocation in cloud computing systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 3 (13), P. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.13.025>
3. Gamzayev R.O., Tkachuk M.V., Shevkoplias D.O. (2020), "Knowledge-oriented Information Technology to Variability Management on Domain Analysis Stage in Software Development", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 4, P. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.06>
4. D. Karagiannis, H.C. Mayr, J. Mylopoulos. (2016), "Domain-Specific Conceptual Modeling: Concepts, Methods and Tools", *Springer, Berlin*, 606 p.
5. Tomaž Kos, Marjan Mernik and Tomaž Kosar. (2022), "Evolution of Domain-Specific Modeling Language: An Example of an Industrial Case Study on an RT-Sequencer", *Appl. Sci.*, 12 (23), 12286. <https://doi.org/10.3390/app122312286>
6. Berger, Th., Chechik, M., Kehrer, T. (2019), "Software Evolution in Time and Space: Unifying Version and Variability Management", *Dagstuhl Seminar Reports*, Vol. 9, Issue 5, P. 1–31.
7. Jaffari, A., Lee, J., Kim, E. (2021), "Variability Modeling in Software Product Line: A Systematic Literature Review", *Studies in Computational Intelligence*, vol 930. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64773-5_1
8. Huber, R., Pueschel, L., Roeglinger, M. (2019), "Capturing smart service systems: Development of a domain-specific modelling language", *Inf. Systems Journal*, Volume 29, Issue 6, P. 1207–1255.
9. Leila Samimi-Dehkordi, Bahman Zamani, Shekoufeh Kolehdoz-Rahimi. (2019), "Leveraging product line engineering for the development of domain-specific metamodelling languages", *Journal of Computer Languages*, Volume 51, P. 193–213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cola.2019.02.006>
10. Maouaheb Belarbi (2018), "A methodological framework to enable the generation of code from DSML in SPL", *Proceedings of the 22nd International Systems and Software Product Line Conference (SPLC 2018)* – Vol. 2, P. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.1145/3236405.3236426>

11. Eko K. Budiardjo, Elviawaty M. Zamzami. (2014), "Feature Modeling and Variability Modeling Syntactic Notation Comparison and Mapping", *Journal of Computer and Communications*, Vol. 2, No. 2, P. 102–108. DOI: 10.4236/jcc.2014.22018
12. Vale, A., Fernandes, S., Magalhães, A. P. (2019), "Towards a customizable Student Information System integrating MDD and SPL (S)", *Proceedings of the 31st International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE 2019)*, Lisbon, Portugal, July 10–12 2019, P. 98–106. DOI: <https://doi.org/10.18293/SEKE2019-089>
13. Cunha, A., Fernandes, S. and Magalhães, A. (2019), "Integrating SPL and MDD to Improve the Development of Student Information Systems", *Proceedings of the 21st International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2019)*, P. 197–204. DOI: <https://doi.org/10.5220/0007711201970204>
14. Maouaheb Belarbi and Vincent Englebert (2022), "Transforming Domain Specific Modeling Languages into Feature Models", *Proceedings of the 10th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development (MODELSWARD 2022)*, P. 137–146. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010772000003119>
15. Frank, U., (2010), "Outline of a method for designing domain-specific modelling languages", *Research Reports, Institut für Informatik und Wirtschaftsinformatik (ICB)*, Universität Duisburg-Essen, Germany, P. 1–76.
16. Rustam Gamzayev, Mykola Tkachuk and Oleksandr Nelipa. (2021), "Domain-Specific Language for Adaptive Development of "Smart-Home" Applications", *Proceedings of the 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2021 (ITTAP-2021)* Ternopil, Ukraine, November 16-18, 2021, CEUR-WS.org/Vol-3039, P. 154–165.
17. Rustam Gamzayev, (2023), "A Methodology for Development and Usage of Problem-oriented Modeling Languages in "Internet Of Things" Systems", *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference Stockholm, Sweden (February 07–10, 2023)*, P. 603–608. DOI: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.5>
18. Cavalcanti Y.C., Machado I.C., Lobato L.L. et al. (2011), "Towards Metamodel Support for Variability and Traceability in Software Product Lines", *Proceedings of the 5th International Workshop on Variability Modelling of Software-Intensive Systems, Namur, Belgium (January 27–29, 2011)*, P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1145/1944892.1944898>.
19. Bashroush R., Garba M., Rabiser E. et al. (2017), "CASE Tool Support for Variability Management in Software Product Lines", *ACM Computing Surveys*, 50 (1), P. 1–45. DOI: <https://doi.org/10.1145/3034827>
20. Quinlan, D, Wells, JB & Kamareddine, F., (2019), "BNF-Style Notation as It Is Actually Used", *Proceedings of the 12th Conference on Intelligent Computer Mathematics 2019*, Prague, Czech Republic, P. 187–204. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23250-413>
21. Mazurova, O., Naboka, A., Shirokopetleva, M. (2021), "Research of ACID transaction implementation methods for distributed databases using replication technology", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Sndustries*, № 2 (16), P. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.019>
22. Juan de Lara, Esther Guerra, Jesús Sánchez Cuadrado. (2015), "Model-driven engineering with domain-specific meta-modelling languages", *Software and Systems Modeling (Springer)*, Vol 14(1). P. 429–459.
23. A. Philippot, B. Riera, M. Koza, et al. (2017). "HOME I/O and FACTORY I/O: 2 Pieces of innovative PO simulation software for automation education", *European Association for Education in Electrical and Information Engineering Annual Conference (EAEEIE)*, Grenoble, France, P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EAEEIE.2017.8768639>

Received 22.02.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Гамзаєв Рустам Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, доцент кафедри моделювання систем і технологій, Харків, Україна; e-mail: rustam.gamzayev@karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>

Ткачук Микола В'ячеславович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, завідувач кафедри моделювання систем і технологій, Харків, Україна; e-mail: mykola.tkachuk@karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>

Gamzayev Rustam – PhD, associate professor, Kharkiv National University named after V. N. Karazina, associate professor of the Department of Systems and Technologies Modeling Kharkiv, Ukraine.

Tkachuk Mykola – doctor of technical sciences, professor, Kharkiv National University named after V. N. Karazina, head of the Department of Systems and Technologies Modeling, Kharkiv, Ukraine.

РОЗРОБКА ПРОБЛЕМНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В СИСТЕМАХ "РОЗУМНИЙ БУДИНОК"

Побудова концептуальних моделей для проєктування програмного забезпечення (ПЗ), зокрема для таких високотехнологічних застосунків, як системи "Розумний будинок", є складним завданням, від результатів виконання якого суттєво залежить ефективність процесів їхнього розроблення. Одним з інноваційних методів вирішення цієї проблеми є використання предметно орієнтованих мов моделювання (DSML), що дають змогу скоротити витрати часу та інших проєктних ресурсів, потрібних для створення таких систем. **Предметом** дослідження в роботі є підходи з метою розроблення DSML для систем "Розумний будинок" як окремого класу систем *Internet of Things*. **Мета роботи** – запропонувати підхід до розроблення DSML на основі моделі варіабельності властивостей такої системи. Вирішуються такі **завдання**: аналіз деяких уже наявних підходів до створення DSML; побудова багатоаспектної класифікації вимог до них, застосування цих вимог щодо проєктування синтаксису конкретного DSML-V для створення варіабельного ПЗ у системах "Розумний будинок"; розроблення технологічної схеми й кількісних метрик для експериментального оцінювання ефективності запропонованого підходу. Використовуються такі **методи**: моделювання варіабельності, основане на моделі властивостей, формальні нотації для опису синтаксису мови DSML-V, застосування відкритого інструментального CASE-засобу *metaDepth*. Здобуті **результати**: побудовано багатоаспектну класифікацію вимог до широко класу мов DSML; розроблено основні синтаксичні конструкції мови DSML-V для підтримки властивостей варіабельності ПЗ систем "Розумний будинок"; надано формальний опис такого синтаксису в нотації Бекуса – Наура; створено технологічну схему компіляції специфікацій мовою DSML-V у синтаксис мови відкритого інструментального CASE-засобу *metaDepth*; експериментально досліджено ефективність застосування запропонованого підходу з використанням кількісних метрик. **Висновки**: запропонований метод розроблення спеціалізованої проблемно орієнтованої мови для систем "Розумний будинок" дає змогу проводити багаторівневе моделювання властивостей варіабельності її програмних компонентів і забезпечує зростання ефективності програмування таких моделей приблизно на 14% порівняно з наявними підходами.

Ключові слова: проблемно-орієнтована мова; програмне забезпечення; моделювання; варіабельність; "Розумний будинок".

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Гамзаєв О. Р., Ткачук М. В. Розробка проблемно-орієнтованої мови моделювання для підтримки варіабельності програмного забезпечення в системах "Розумний будинок". *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 45–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.045>

Gamzayev, O., Tkachuk, V. (2023), "Development of problem-specific modeling language to support software variability in "Smart Home" systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 45–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.045>

О. Журило, О. Ляшенко, К. Аветісова

ОГЛЯД РІШЕНЬ З АПАРАТНОЇ БЕЗПЕКИ КІНЦЕВИХ ПРИСТРОЇВ ТУМАННИХ ОБЧИСЛЕНЬ У ІНТЕРНЕТІ РЕЧЕЙ

Предметом дослідження є можливі засоби підвищення апаратної безпеки кінцевих пристроїв туманних обчислень в мережах Інтернету речей (IoT), популярність якого щороку стрімко зростає та потребує високого рівня захищеності від усіх типів атак. **Метою роботи** є огляд доступних готових комерційних продуктів та/або концептуальних апаратних рішень для захисту бюджетних пристроїв у мережах Інтернету речей на основі туманних технологій. Для досягнення поставленої мети виконано такі **завдання**: запропоновано концепцію туманних обчислень та визначено переваги, які вона надає мережам IoT; розглянуто кіберзагрози та апаратні атаки на мережі IoT; описано наслідки використання мереж Інтернету речей на основі туманних обчислень; розглянуто апаратні засоби безпеки, такі як TRM, PUF, HSM тощо. Для вирішення завдань використано такі **методи** дослідження, як: теоретичний аналіз літературних джерел; порівняльний аналіз хмарних, туманних і мобільних обчислень; аналіз наявних апаратних засобів безпеки. Здобуто такі **результати**: туманні обчислення можна розглядати як шлюз між хмарними обчисленнями та Інтернетом речей; вони мають більшість із переваг хмарних обчислень, крім того, додатково дають змогу обробляти дані на кінцевих пристроях, не навантажуючи центральний сервер. **Висновки**: безпека апаратного забезпечення в системах Інтернету речей не менш важлива, ніж програмна безпека. Особливо вагомо це питання постає для систем на основі туманних обчислень, де дані оброблятимуться на периферії, без передачі в хмару. Для підвищення рівня апаратної безпеки пристроїв туманних обчислень пропонується використовувати стандартні апаратні платформи безпеки, такі як: фізично неклоновані функції, апаратний модуль безпеки, система на кристалі тощо. Апаратні компоненти системи, що застосовують туманні обчислення, менш схильні до кібератак, зломів, вторгнень чи маніпуляцій.

Ключові слова: хмара; туманні обчислення; апаратна безпека; IoT; PoT; конфіденційність; захист; апаратний модуль безпеки; фізичні неклоновані функції.

Вступ

Інтернет речей наразі зазнає активної популярності, як інтернет два десятиліття тому. У попередніх дослідженнях ми розглядали безпеку Інтернету речей у системах "Розумний будинок". Проте ринок IoT зростає, і все більше сервісів і систем застосовують у свої мережах технології IoT, а отже, і потребують відповідного рівня безпеки. Очікується, що ринок IoT збільшиться з понад 15 млрд пристроїв 2016 р. до понад 75 млрд до 2025 р. [1]. З огляду на цю тенденцію кількість розгорнутих пристроїв IoT уже перевищила загальну кількість населення Землі. Крім того, за останнє десятиліття поширення мобільних комп'ютерів зросло в геометричній прогресії. Щоб зберегти швидке зростання та величезний споживчий ринок, яким володіє IoT, необхідна жорстка технологічна основа, що підтримуватиметься науковою спільнотою. Туманні обчислення є дуже сильним кандидатом на забезпечення цієї основи (частково або повністю) для IoT, надаючи кілька переваг в обчислювальному, архітектурному й мережному аспектах [2].

Зважаючи на останні тенденції та потреби, хмарні обчислення та IoT у найближчому майбутньому стануть додатковими технологіями інтернету, сформувавши концепцію під назвою "Хмара речей" (CoT – *Cloud of Things*). CoT використовуватиметься як "Речі як послуга" (TaaS – *Things as a Service*) у хмарних застосунках IoT для перенесення завдань і операцій, що споживають багато енергії, у хмару. Тим часом туманні обчислення та всі пов'язані з ними віртуальні / реальні сервіси можна розглядати як проміжний рівень для швидкого оброблення даних на периферії мережі, обслуговуючи потреби швидкої реакції гнучких програм.

Рівень туманних обчислень також можна використовувати як рівень безпеки для реалізації необхідних функцій конфіденційності та для захисту даних перед тим, як вони будуть вивантажені в хмару через незахищений і вразливий канал [3].

Отже, метою роботи є огляд доступних готових комерційних продуктів та/або концептуальних апаратних рішень для захисту бюджетних пристроїв у мережах Інтернету речей на основі туманних технологій.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: запропонувати концепцію туманних обчислень та визначити переваги, які вона може надати для мереж IoT; розглянути наявні кіберзагрози й апаратні атаки на мережі IoT; окреслити наслідки використання мереж Інтернету речей на основі туманних обчислень; дослідити апаратні засоби безпеки, такі як TRM, PUF, HSM тощо.

Важливість безпеки в IoT і туманних обчисленнях

Як централізований ресурс поза межами досяжності та контролю користувачів, середовище хмарних обчислень має всі можливості для порушення конфіденційності користувачів. З'являється все більше новин, пов'язаних із безпекою Інтернету речей. Наприклад, *Mirai* та схожі на нього атаки ботнетів показали, що ботнети Інтернету речей можуть бути дуже ефективними в умовах широкомасштабного розгортання для здійснення атак розподіленої відмови в обслуговуванні (DdoS – *Distributed Denial of Service*).

Як обговорювалося раніше, туманні обчислення також стають невід'ємною частиною мереж IoT. Це не вирішує проблеми конфіденційності, але, можливо, збільшує (з погляду складності) право власності на дані, які створюються, передаються та обробляються. Тому в цій статті досліджується засіб, необхідний для розв'язання питання конфіденційності та безпеки користувачів у мережах Інтернету речей, що підтримують туманні обчислення.

В останні роки завдяки використанню IoT та інших датчиків кількість даних, що генеруються кінцевими пристроями, значно зросла. Питання в тому, де, коли та як необхідно аналізувати ці дані.

У хмарно орієнтованому дизайні хмарний сервер працює як центральний. Пристрої IoT генерують дані та надсилають їх у хмару для зберігання та аналізу. Широкомасштабне розгортання IoT створює ситуації, з якими хмарні обчислення не можуть впоратися ефективно та результативно.

Однак у туманних обчисленнях дані аналізуються на кінцевих станціях, і тільки необхідні результати (зведення) надсилаються на хмарний сервер для подальшого аналізу та зберігання. Наприклад, ця технологія може бути корисна для застосунків, яким потрібна низька затримка під час оброблення даних на периферії мережі. Аналіз даних можна

зробити на місці, запустивши програмне забезпечення на місцевих станціях. Хмара все ще використовуватиметься, щоб зберігати результати аналізу для початкових цілей та аудиту. Агрегація даних зменшить пропускну здатність, а також витрати, пов'язані з пропускнуою здатністю.

Концепція туманних обчислень, запропонована компанією CISCO, була баченням, що дало змогу пристроям IoT працювати на периферії мережі. Туманні обчислення не є альтернативою хмарним обчисленням; крім того, туманні обчислення розширюють та доповнюють хмарні обчислення концепцією розумних пристроїв, що можуть працювати на периферії мережі.

В Інтернеті речей, коли різні типи даних генеруються різними неоднорідними вузлами, питання нероздільності постає як важлива проблема. Туманні обчислення можуть її вирішити, виконуючи конкретні завдання, пов'язані з транскодуюванням, на периферії мережі [3].

Як показано на рис. 1, туманні обчислення можна розглядати як шлюз між хмарними обчисленнями та Інтернетом речей для підвищення якості обслуговування (QoS – *Quality of Service*) у деяких конкретних застосунках, таких як промисловий Інтернет речей (IIoT – *Industrial Internet of Things*), де швидка й гнучка відповідь має першочергове значення. Передбачалось, що туманні обчислення забезпечать вирішення давно відомих проблем і завдань хмари, а саме: агрегацію та оброблення даних із неоднорідних пристроїв разом із проблемами сумісності цих пристроїв; захист даних і безпеку конфіденційних даних користувача; надання послуг з урахуванням контексту та розміщення, особливо для служб на основі місця розташування (LBS – *location-based services*).

Використання хмарної парадигми полягає в тому, що дані потрібно спочатку зібрати та передати в центральне розташування для зберігання та подальшого аналізу через апаратні обмеження на периферії. Більша перевага віддається парадигмі туманних обчислень і обчисленням мобільних пристроїв, коли дані збираються на периферії та потребують негайного оброблення, щоб усунути затримку або зберегти доступність.

Поширення пристроїв IoT, таких як датчики, призвело до високої потреби в пропускній здатності даних від мережі IoT до хмари через величезну кількість інформації, що створюється та передається. Для вирішення цієї складної та зростаючої проблеми

запропоновані туманні обчислення: замість того, щоб передавати всі дані IoT у хмару, туманні обчислення оброблятимуть дані на периферії. Однак ця інтеграція поставить перед дослідниками багато нових завдань, особливо під час розроблення рішень, пов'язаних із кібербезпекою. Тому цю

інтеграцію необхідно підтримувати щодо кібербезпеки. Один із способів зробити це – використовувати стандартні апаратні платформи безпеки, такі як апаратний модуль безпеки (HSM – *Hardware Security Module*) і фізичні неклоновані функції (PUF – *Physically Unclonable Functions*).

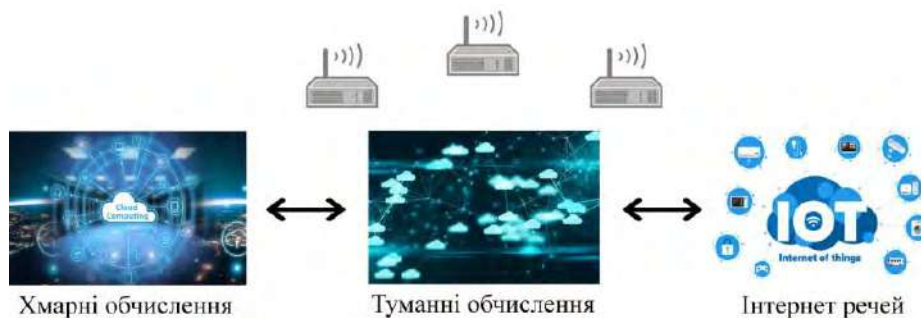


Рис. 1. Туманні обчислення як шлюз між хмарними обчисленнями та Інтернетом речей

Як показано на рис. 1, з концептуального погляду можна очікувати, що туманні обчислення слугуватимуть проміжним рівнем обслуговування для безпомилкового узгодження протоколів хмарних обчислень та IoT. Іноді в літературі цю послугу називають «Туман як послуга» (FaaS – *Fog as a Service*). FaaS надасть багато переваг для IoT та його користувачів:

- сервери хмарних обчислень надшвидкісні порівняно з кінцевими пристроями IoT. Шлюзи туманних обчислень (FCG – *Fog Computing Gateway*) забезпечать інтерфейс між двома віддаленими наборами цих пристроїв;

- проміжний рівень туманних обчислень дасть змогу легше та віддалено виконувати необхідні виправлення (зокрема керування виправленнями тощо). Замість того, щоб налаштовувати кінцеві пристрої IoT шляхом фізичного підключення, оновлення програмного забезпечення можна надсилати на туманні шлюзи, які потім доправляють виправлення на призначені кінцеві пристрої;

- туманні обчислення доповнять IoT всіма перевагами периферійних обчислень, наприклад: гнучкість, масштабованість, децентралізація тощо;

- туманні технології розширять хмариче, щоб надати додаткові ресурси базовим вузлам і мережам, використовуючи переваги концепції віртуалізації шляхом створення віртуальних датчиків і мереж, які застосовуватимуться різними службами;

- туманні технології створюють середовище для поширення розподілених програм IoT.

Туманні обчислення проти хмарних обчислень і обчислень мобільних пристроїв

Різниця між хмарними, туманними та мобільними обчисленнями описана в роботі [4]. Ми більш широко даємо цю інформацію в табл. 1.

Основні компроміси між туманними й хмарними обчисленнями подані таким чином:

- ефективність комунікації;
- загальне споживання електроенергії для послуги;
- час відповіді на запит або завдання в обидва боки.

Тут ми розширюємо цей список у такий спосіб:

- місце оброблення даних: туманні обчислення реалізують ідею перенесення функцій хмарних обчислень у джерело даних. Відтепер туманні обчислення розширюють послуги хмарних обчислень униз до периферії мережі;

- близькість до користувачів: шлюзи туманних обчислень розміщені дуже близько до користувачів і кінцевих пристроїв IoT, тоді як хмарні обчислення виконуються на серверах, розташованих далеко від користувачів IoT;

- затримка мережі: сервери хмарних обчислень зазвичай розташовані щонайменше в кількох переходах від користувачів і кінцевих пристроїв IoT. Тому в деяких випадках передача зв'язку в обидва боки (двобічна) може тривати близько кількох секунд.

Завдяки ненавантаженим серверній архітектурі туманні обчислення можуть отримувати запити з мережі IoT і відповідати на них за мілісекунди. Тому вони є дуже перспективними для гнучких програм, таких як IIoT і CPS;

- послуги на основі місця розташування (LBS): однією з основних переваг туманних обчислень, порівняно з хмарними, є підтримка визначення місця розташування, що може бути дуже корисним для програм, що застосовують LBS;

- підтримка мобільності: в туманних обчисленнях це здійснюється завдяки використанню технологій віртуальної машини (VM – *virtual machine*). Однак для хмарних обчислень мобільність користувачів підтримується дуже обмежено.

Через помилкове уявлення туманні обчислення та обчислення мобільних пристроїв іноді застосовуються в літературі як взаємозамінні.

Однак вони відрізняються за такими ознаками:

- децентралізація: туманні обчислення забезпечують більш децентралізовану й розподілену архітектуру порівняно з мобільними обчисленнями, у яких базові станції стільникового зв'язку є основною точкою централізації;

- різноманітність постачальників: у мобільних обчисленнях апаратні / програмні компоненти залежать від постачальника, і на ринку немає чіткої стандартизації. Для туманних обчислень це неприйнятно. Вартість системи, якість, інновації, упровадження на ринок і поширення туманних обчислень – усе це залежить від стандартизації;

- різноманітний радіодоступ: більшість мобільних обчислювальних програм призначені для мобільних і/або стільникових мереж, тоді як туманні обчислення матимуть WiFi, LPWAN і WiMax, крім стільникової мережі.

Таблиця 1 – Порівняння концепцій хмарних, туманних та мобільних обчислень

Функція	Хмарні обчислення	Обчислення мобільних пристроїв	Туманні обчислення
Доступ до мережі	Проводовий (переважно оптоволоконний) або безпроводовий	Безпроводовий (переважно стільниковий)	Безпроводовий (стільниковий, WiMAX, IEEE802.15, LPWAN тощо)
Доступ до послуги	Через сервер	Через базову станцію	У шлюзах туманних обчислень
Оперативність	Повільна	Швидка	Найшвидша
Доступність	Здебільшого доступний	Здебільшого доступний	Здебільшого нестабільний
Використання пропускної здатності	Високе	Середнє	Низьке
Потужність – обчислення	Високе	Середнє	Низьке
Потужність – зберігання	Високе	Середнє	Низьке
Зв'язок	Інтернет	Багато протоколів (рис. 3)	Багато протоколів (рис. 3)
Контент поширюється на	Периферійний пристрій	Обмежено покриттям базової станції	Будь-де
Створення контенту	Створено людиною	Змішано	Створено датчиками
Контент генерується в	Центральному сервері	Базовій станції	Шлюзах туманних обчислень
Керування	Централізоване	Розподілене до базових станцій	Розподілене
Аналіз даних	Довгостроково	Миттєво / короткостроково	Миттєво / короткостроково
Затримка	Висока	Помірна	Низька
Оброблення / зберігання	Центр (сервер)	Мобільні периферії (базова станція)	Периферії (шлюзи туманних обчислень)
Масштабованість (по горизонталі ⁺)	Висока	Середня	Низька
Масштабованість (по вертикалі ⁺)	Висока	Середня	Низька
Безпека	Слабша	Сильніша	Сильніша
Мобільність	Не підтримується	Підтримується	Підтримується
Кількість користувачів	Мільярди	Мільйони / мільярди	Мільйони / мільярди
Віртуальна інфраструктура	Корпоративний сервер	Головний сервер	Пристрої користувача

У табл. 1 наведено порівняльні концепції туманних, мобільних і хмарних обчислень. Як видно, туманні обчислення забезпечують більшу гнучкість

і швидкість реагування порівняно з мобільними й хмарними обчисленнями, і таким чином постають більш сильним кандидатом для технологічного

рішення з метою майбутніх реалізацій на основі IoT та PoT.

Як згадувалося раніше, туманні обчислення можна розглядати як розширення хмарних обчислень до периферії мережі IoT із підвищеною гнучкістю. Отже, туманні обчислення пропонують такі переваги за умови використання для мереж IoT (і PoT):

- економічна ефективність: дані оброблятимуться на периферії, а не в хмарі, що зрештою зменшить транспортування величезної кількості даних у хмару разом із відповідними витратами;

- підтримка сумісності: пристрої туманних обчислень можуть допомогти із завданнями, пов'язаними з транскодуванням, щоб усунути проблему сумісності неоднорідних кінцевих пристроїв IoT [3];

- зменшена затримка: хмарні обчислення не придатні для роботи з критично важливими за часом застосунками, наприклад для PoT, оскільки загальна наскрізна затримка становить приблизно 100 мс (що є критично високим показником, особливо для автоматизації виробництва, яке потребує ізохронного відклику в лічені мілісекунди). Оскільки туманні обчислення розташовані на периферії мережі, вони є сильним кандидатом для забезпечення більш швидшого зв'язку й, отже, зменшення затримки для пакетів зв'язку;

- швидке реагування: програми реального часу, такі як PoT, матимуть вигоду від концепції туманного обчислення завдяки підвищенню гнучкості на етапах аналізу та прийняття рішень у загальному циклі автоматизації процесів;

- підвищена безпека: за допомогою туманних обчислень постачальники послуг можуть легко фільтрувати конфіденційну персональну інформацію та обробляти її локально. Замість того, щоб надсилати всю інформацію, лише неконфіденційна інформація надсилається в хмару для подальшого оброблення.

Кібератаки та способи захисту мережі від них

На сьогодні було визначено багато атак у мережах IoT, таких як атаки ботнетів *Mirai* та *Torii*, а також різні атаки на промислові мережі, такі як *Stealthy*-атаки. Тож щоб мати надійні та працездатні системи й долати кібератаки, необхідно вживати заходів кібербезпеки. Кібербезпека будь-якої комп'ютерної системи має три рівні: запобігання, виявлення та пом'якшення наслідків.

Щодо виявлення вторгнень, то тут дуже часто використовується метод виявлення аномалій. Виявлення аномалій на основі журналів пристроїв або подій і моделі процесу (кіберзагрози та збої) є ще одним важливим аспектом запобігання можливим векторам атак, створених для цільових систем. В аналогічній роботі про промислові мережі запропоновано метод виявлення кібератак на промислові системи управління за допомогою аналізу процесів [5], однак в цьому дослідженні не враховуються атаки MITM, викрадення обладнання тощо.

Але не лише програмні системи, але й стандартні апаратні платформи вразливі до атак. Їх іноді також називають «зломи апаратного забезпечення», і вони нагадують розробникам систем про необхідність увімкнути перевірку автентичності на рівні апаратного забезпечення відразу після заводської виробничої лінії, потім ідуть процедури перевірки до та після встановлення.

Ця робота зосереджена на механізмах запобігання, щоб уникнути зловмисників, перш ніж будь-яка атака може статися. З боку кіберпрофілактики можна використовувати надійні апаратні компоненти: наприклад, системи інтелектуального моніторингу середовища (SEN – *Smart Environment Monitoring*), також розробляється чимало різноманітних програм для моніторингу даних середовища через IoT.

Туманні обчислення насправді є інструментом для хмарних служб (CBS – *Cloud-Based Services*), який можна уявити як інтерфейс між реальними кінцевими пристроями IoT та рештою хмарних служб. Як обговорювалося в роботі [6] CBS пропонує три основні компоненти послуг, а саме: інфраструктуру як послугу (IaaS – *Infrastructure as a Service*), платформу як послугу (PaaS – *Platform as a Service*) і програмне забезпечення як послугу (SaaS – *Software as a Service*). Прогнозуємо, що парадигма туманних обчислень розширить наявне уявлення, додавши FaaS як четвертий компонент моделі обслуговування (див. рис. 2).

Площина безпеки для хмарних служб, запропонована в роботі [6], розроблена для використання на зовнішніх пристроях IoT і для забезпечення інтерфейсу до хмари. Після запропонування туманних обчислень рішення площини безпеки є більш різноманітним і багатошаровим порівняно з попередньою версією (див. рис. 2). Тому розглядаємо туманні обчислення для надання додаткових послуг, такі як безпека на периферії хмари для CBS. Наприклад,

застосування туманних обчислень матиме користь для систем виявлення вторгнень (IDS – *Intrusion Detection Systems*), розроблених для IoT. Отже, раннє виявлення є важливим для запобігання згубних

наслідків вторгнень, а туманні обчислення дадуть змогу раннього виявлення для алгоритмів IDS, що працюють в IoT.

Площина безпеки	Клас послуг	Основний інструмент доступу та керування	Зміст послуг
Безпека в SaaS	SaaS	Web-браузер	Хмарні застосунки: соціальні мережі, офісні пакети, CRM, обробка відео
Безпека в PaaS	PaaS	Хмарне середовище розробки	Хмарна платформа: редактор мешапів, мови програмування, фреймворки, структуровані дані
Безпека в IaaS	IaaS	Менеджер віртуальної інфраструктури	Хмарна інфраструктура: комп'ютерний сервер, зберігання даних, міжмережний екран, балансувальник навантаження і т.д.
Безпека в FaaS	FaaS	Туманний координатор	Туманна інфраструктура: туманний шлюз, радіомережа, периферійний сервер

Рис. 2. Модель "Туман як послуга"

Наслідки використання туманних обчислень в IoT

Відповідно до наукових прогнозів, очікується, що туманні обчислення стануть однією з основних опор IoT у найближчому майбутньому, трансформуючи IoT на основі хмарних обчислень у більш розподілену архітектуру [1]. Неминуче ця трансформація матиме такі наслідки:

- зв'язок з інтеграцією системи та/або підсистеми. Інтеграція систем та/або підсистем є важливим завданням для системних інженерів, оскільки їхній обов'язок – забезпечити безперебійну роботу всіх компонентів новоствореної системи;

- зв'язок з телекомунікаціями. У табл. 2 детально показано пов'язані з IoT телекомунікаційні технології. Вибір радіочастотних технологій може ґрунтуватися на передбачуваній функціональності та апаратних вимогах, а саме: пропускна здатність, вартість, енергоефективність, затримка, тип мережі тощо. Ці радіочастотні технології створюють основу для мережних технологій IoT;

- зв'язок із вартістю. Туманні обчислення допоможуть системам Інтернету речей, що підтримують хмарні обчислення, зменшити загальну вартість системи. Оскільки дані оброблятимуться на периферії, а не в хмарі, туманні технології зменшать накладні витрати на передачу інформації в хмару. Це матиме

дві переваги: використання пропускної здатності передачі різко скоротиться та зменшиться розмір сховища даних у хмарі (разом із обробленням);

- зв'язок з якістю обслуговування. Це є важливим критерієм сервісу, що зрештою впливає на задоволеність користувачів. Для IoT тимчасова недоступність датчиків або виконувальних механізмів у застосунках IoT безпосередньо вплине на фізичний світ і, отже, різко знизить якість обслуговування для користувачів мережі. Чимало безпроводових програм мають різноманітні та обов'язкові вимоги до якості обслуговування, що ускладнює навантаження на інтеграцію IoT і хмари. Водночас нові рішення проміжного програмного забезпечення на основі туманних обчислень можуть бути корисними й зручними в тому сенсі, щоб запропонувати оброблення термінових завдань на периферії мережі та розвантажити дані з вузлів із дефіцитом енергії. Туманні обчислення можуть суттєво покращити якість обслуговування мереж IoT завдяки зменшенню "затримки пакетів" і "перенавантаженості мережі", одночасно збільшуючи "виявлення збоїв" і "відновлення втрат";

- зв'язок із безпекою. Реальне середовище відрізняється від ідеальних умов. Додаткові функції та компоненти іноді створюють єдину точку збою або ускладнюють роботу системи. У добре розроблених

і спланованих реалізаціях можна усунути одну точку збою та навантаження на систему, щоб покращити загальну продуктивність системи за бажанням.

Це стосується як апаратного, так і програмного забезпечення та функцій безпеки, пов'язаних із включенням додаткового компонента.

Таблиця 2 – Різні радіочастотні комунікаційні технології для IoT

Технологія	Стандарт	Частота	Проникнення	Діапазон	Макс. швидкість передачі даних	Пропускна здатність каналу	Вартість мікросхем
NFC/RFID	ISO/IEC 18092	13.56 МГц	Високе	< 20 см	424 кбіт/с	106–424 Мбіт/с	\$0.1+
Bluetooth	IEEE 802.15	2.4/2.5 ГГц	Низьке	50–100 м	2 Мбіт/с	2 МГц	\$5+
Wi-Fi	IEEE 802.11	2.4/5.0 ГГц	Низьке	100 м	54 Мбіт/с	22 МГц	\$1.5–30+
Zigbee	IEEE 802.15.4	868/915 МГц, 2.4 ГГц	Низьке / високе	< 1 км	250 кбіт/с	2 МГц	\$2–20+
DASH7	ISO/ IEC 18000-7	433/868/915 МГц	Високе	0–5 км	167 кбіт/с	до 1.75 МГц	\$3.00+
LoRa	Різні	868/915 МГц	Низьке	25 км	50 кбіт/с	125/250/500 кГц	~\$2.00
SigFox	SigFox	915–928 МГц	Низьке / високе	40 км	100 біт/с	100 Гц	\$0.25+
3G	UMTS/ W-CDMA	0.4–3 ГГц	Низьке / високе	5–35 км	0.38–21.6 Мбіт/с	3.6–21 Мбіт/с	варіюється
4G/LTE	3GPP-LTE	0.6–6 ГГц	Низьке / високе	5–100 км	100–300 Мбіт/с	100 Мбіт/с+	\$6.5+
5G	5GTF/5G-SIG	0.6–4/100 ГГц	Низьке / високе	5–150 км	10 Гбіт/с	500 Мбіт/с+	\$70+

У разі захоплення шлюзів туманних обчислень існує п'ять особливостей, що необхідно враховувати:

1. Контроль доступу: шлюзи туманних обчислень з'єднують мережі IoT / PoT і хмару за допомогою двонаправленого каналу зв'язку. Дані збираються та передаються з пристроїв IoT у хмару, а повідомлення про рішення та команди надсилаються з хмари в мережі IoT. Пристрій FCG може ефективно керувати всіма підключеними пристроями IoT. Однак пристрої шлюзів туманних обчислень не мають змоги отримати прямий доступ до баз даних та інших обчислювальних ресурсів без призначеної хмарної служби.

2. Автентифікація: пристрій FCG може завдавати деяких наслідків залежно від обраного алгоритму автентифікації. Якщо автентифікація призначена для роботи лише з пристроями FCG, це збільшує ризик того, що вся мережа IoT буде зламана після того, як пристрій FCG буде зламано. Зазвичай двофакторна та багаторівнева автентифікація (одна у FCG, інша в хмарі тощо) зменшують ризик зламу FCG. У разі інциденту буде вражено лише підмножину підключених пристроїв IoT.

3. Доступність: хмарні ресурси більш стійкі до єдиної точки відмови. Дані відтворюються на кількох вузлах у хмарі, й аварійне переключення може бути досягнуте без проблем. Однак пристрої IoT більш схильні до збоїв. Наприклад, блокування зв'язку для ресурсів IoT може значно вплинути на доступність на основі критичного розташування шлюзу туманних обчислень.

4. Цілісність: залежно від обраної схеми зв'язку очікується незначний вплив захоплення шлюзу туманних обчислень на цілісність повідомлень, якщо не використовуватиметься наскрізне шифрування, і відсутність жодного ефекту у випадку застосування шифрування.

5. Конфіденційність. Будь-який витік даних і порушення конфіденційності користувачів у мережах IoT через пристрій FCG є серйозною проблемою, що не обмежується погіршенням репутації, фінансовими втратами чи іншими наслідками для організацій. Будь-який користувач, який застосовує пристрій IoT або зберігає на ньому дані, зазнає впливу через зламанний пристрій FCG. Однак це не позначиться на особистих даних у хмарі.

Усі комунікації між хмарою та IoT здійснюються через шлюз туманних обчислень. Отже, необхідно встановити достатню кількість комп'ютерів, щоб запобігти виникненню єдиної точки збоїв та безперебійно справлятися з подіями самовідновлення та аварійного перемикавання. Оскільки весь потік даних буде заблоковано в разі будь-якого пошкодження або фізичної атаки, ми пропонуємо встановити декілька FCG у мережних архітектурах Інтернету речей із підтримкою туманних обчислень, із можливістю самовідновлення та безперебійного перемикавання після збоїв.

Зламаний шлюз туманних обчислень впливає як на мережу IoT, так і на хмарний рівень. Безпека шлюзу туманних обчислень є важливою, і не потрібно залишати її незахищеною. Як обговорюватиметься

далі, необхідно використовувати апаратну безпеку, щоб надати FCG додатковий рівень захисту водночас із програмно орієнтованими рішеннями.

Апаратний захист пристроїв туманних обчислень

У роботі [7] автори дійшли висновку, що незахищена апаратна платформа призведе до незахищеного стеку програмного забезпечення, таким чином доведено важливість безпеки апаратного забезпечення. Безпека апаратного забезпечення недостатньо вивчена порівняно з проблемами та рішеннями кібербезпеки, пов'язаними з програмним забезпеченням. Останнім часом з'являються нові дослідження апаратної безпеки на пристроях, пов'язаних з Інтернетом речей, як-от: створення єдиної системи перевірки особистості на основі PUF,

апаратна безпека FPGA для центрів оброблення даних, а також реконфігурований апаратний механізм ізоляції (IPM – *isolation and protection mechanism*) для пристроїв IoT, що використовують хмарне середовище. Усе це підтверджує наші зусилля щодо запровадження апаратних заходів безпеки для FCG. У цьому розділі стисло наведено всі можливі апаратні заходи безпеки, що можна розглянути для FCG під час прийняття рішення про забезпечення безпеки для загальної мережі IoT.

Як обговорювалося у праці [8], кібератаки на апаратні платформи можна досліджувати за трьома групами: агресивні, неагресивні та напівагресивні. Серед них найбільш складними є агресивні, оскільки вони безпосередньо втручаються в робочу структуру схем на апаратному забезпеченні. На рис. 3 показано додаткові деталі та класифікацію цих атак.

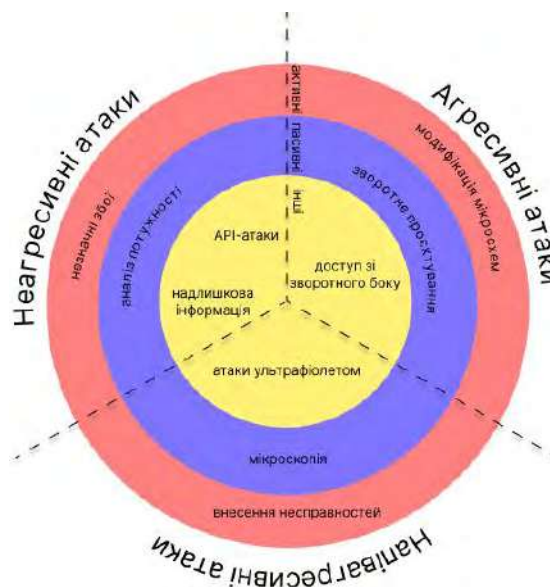


Рис. 3. Підмножина векторів атак, пов'язаних з апаратним забезпеченням, та їх співвідношення

Метод зворотного проєктування (RE – *Reverse Engineering*) застосовується для виявлення фізичних властивостей і функціональних можливостей апаратного забезпечення, щоб відтворювати технології або використовувати ймовірні вразливості. Метод аналізу потужності можна співвіднести зі зворотним проєктуванням, щоб дізнатися більше про властивості цільового обладнання. Ці атаки здебільшого застосовуються в промисловому шпигунстві для викрадення технологій конкурентів. Модифікації мікросхем також використовуються для моніторингу та керування апаратним блоком під час безпосереднього втручання в роботу інтегральної схеми. Упроваджувати несправності можна для

порушення принципу КЦД (конфіденційності, цілісності, доступності), наприклад, для виведення пристрою з ладу з метою отримання доступу, припинення функціонування або виконання інших важливих завдань. Залишкове зберігання даних – це концепція розшифрування інформаційних бітів у фізичних пристроях, таких як пам'ять (SRAM, DRAM, EPROM тощо), і накопичувачах, щоб отримати ключі безпеки або іншу важливу інформацію.

У центрі уваги апаратної безпеки мають бути принаймні конфіденційність і цілісність. Прихована інформація про пристрій або дані не мають бути розкриті, і необхідно, щоб утручання до них було

попереджено. У промисловості секретна інформація зазвичай прив'язана до фізичного об'єкта, і апаратне забезпечення має її захищати. Наприклад, смарт-карти використовуються для кількох завдань, таких як доступ до об'єкта або зберігання грошової інформації тощо, і проста атака клонування може мати негайні наслідки. У разі успішного клонування банківських карток фінансові втрати будуть нищівними.

У табл. 3 наведено аналіз ризиків безпеки для апаратних кіберзагроз порівняно із загальними

властивостями безпеки кінцевих пристроїв IoT на основі туманних обчислень, включаючи класифікацію векторів атак [9]. Наприклад, аналіз ризиків безпеки кінцевого пристрою, захопленого зловмисниками, щодо загальних властивостей безпеки виглядає таким чином: конфіденційність має помірний рівень, цілісність має помірний, доступність має помірний, а автентифікація і контроль доступу має значний вплив. Відповідний вектор атаки – In (агресивний) або S (напіваагресивний).

Таблиця 3 – Аналіз ризиків безпеки для апаратних кіберзагроз порівняно із загальними властивостями безпеки для кінцевих пристроїв IoT на основі туманних обчислень, включаючи класифікацію вектора атак

Категорія загрози	Серйозність ризику				Вектор
	C	I	A	Auth*	
Знищити, вилучити або викрасти кінцевий пристрій	Немає	Немає	Помірний	Немає	NI
Клонування пристрою	Помірний	Помірний	Мінімальний	Значний	In
Заміна прошивки	Помірний	Помірний	Мінімальний	Значний	In
Вилучення параметрів безпеки шляхом фізичного доступу	Помірний	Мінімальний	Мінімальний	Значний	In
Глушіння	Мінімальний	Мінімальний	Значний	Мінімальний	NI
Підроблений кінцевий пристрій	Помірний	Помірний	Помірний	Значний	In/ S
Підміна бітів	Мінімальний	Помірний	Мінімальний	Мінімальний	In

Умовні позначки: C – конфіденційність; I – цілісність; A – доступність; Auth* – автентифікація та контроль доступу; In – агресивний; NI – неагресивний; S – напіваагресивний.

Існує кілька перешкод, які необхідно подолати, щоб забезпечити кібербезпеку для пристроїв IoT на основі туманних обчислень за допомогою апаратних рішень через проблеми, властиві IoT і самим кінцевим пристроям: фізичний доступ проти віддаленого доступу (апаратні рішення вимагатимуть фізичного доступу до реального пристрою, що іноді може стати серйозним тягарем); гнучкість (апаратні системи не настільки гнучкі, як програмні; хоча деякі апаратні платформи, наприклад програмовану логічну інтегральну схему (ПЛІС), можна переконфігурувати, але в такому вигляді вони дуже дорогі); масштабованість (через апаратні обмеження, вартість та інші виробничі обмеження апаратні рішення важко масштабувати); гнучкість (час, необхідний для встановлення апаратних виправлень, може виявитись значним).

"Стійкість до втручання" означає вжиття заходів з метою ускладнення зворотного проектування для зловмисників або запобігання модифікації продукту проти волі виробника. Цього можна досягти трьома способами:

– використання програмного забезпечення. Програмне рішення для захисту від несанкційного доступу міститиме способи перетасування виконуваного коду в пам'яті, щоб він не розкривав зловмисникам

конкретної інформації щодо будь-якого конфіденційного матеріалу. Одним із поширених методів для цього є обфускація коду. Історично склалося так, що методами захисту від втручання є такі: реалізація білого ящика, динамічний моніторинг програми, самохешування й контрольне підсумовування. Нарешті, технологія блокчейн також є життєздатним варіантом для забезпечення цілісності даних у мережі IoT за допомогою стратегії консенсусу між вузлами;

– використання апаратного забезпечення. Підмножиною відомих векторів атак на апаратне забезпечення є диференційний аналіз помилок, перезапис чипа, залишкова пам'ять та збої протоколу. Як превентивний метод можна застосовувати логічне блокування булевих схем [10]. Мікросхеми пам'яті із захистом від вторгнень (TRM – *Tamper Resistant Memory*) можуть бути призначені для вилучення їх конфіденційних даних, зокрема криптографічних ключів, якщо вони можуть виявити вторгнення в інкапсуляцію безпеки. Робочий механізм, що стоїть за цим, полягає в постійному оновленні комірок пам'яті, щоб запобігти залишкам слідів статичних даних на них. TRM здебільшого використовується для зберігання конфіденційної інформації, зокрема закритих ключів, інформації про електронні платежі

тощо. Іншим підходом може бути реалізація концепції апаратної системи на кристалі (SoC – *System on a Chip*). Наприклад, у роботі [11] запропоновано системи на кристалі для захисту вбудованих процесорів нижчого класу від атак потоку керування, особливо від атак повторного застосування коду (CRA – *Code Reuse Attacks*). Запропонована концепція забезпечує комплексний захист, поєднуючи методи виявлення, реагування, відновлення та виявлення вторгнень проти порушення потоку керування (спричиненого CRA), особливо за наявності переривань, операційних систем реального часу та виняткових функцій;

– безпечне проєктування. Структури IoT залежать від основного апаратного забезпечення та розумної електроніки як шлюзових пристроїв, зокрема датчиків і мікроконтролерів. Вони можуть бути під загрозою зловмисних апаратних троянів (HT – *Hardware Trojan*), вставлених ненадійними виробниками мікросхем. Апаратні трояни стратегічно вводяться в обладнання під нормальним виглядом за допомогою навичок RE та діють як бомба уповільненої дії: вони раптово активуються під час нормального режиму роботи апаратного забезпечення й можуть спричинити ненормальну та ненавмисну роботу. Захистом від такого виду атак може бути один із популярних методів, а саме функціональна та структурна обфускація, що виконується виробниками пристроїв перед етапом виготовлення чипів.

Фізично неклонвані функції (PUF)

Фізично неклонвані функції – це фізичний об'єкт, що забезпечує цифровий відбиток для апаратного забезпечення, наприклад мікропроцесорів, на основі різних вхідних даних і завдань. Отримані кремнієві схеми з унікальними характеристиками виробів неможливо фізично клонувати. Необхідно, щоб кожна схема PUF мала унікальну пару реакції на виклик (CRP), яку можна використовувати для ідентифікації та автентифікації. Виготовлення й архітектурні деталі слабких PUF (має незначну кількість CRP) і сильних PUF (має багато CRP) також важливі. Сильні PUF стійкі до атак грубою силою. Основними характеристиками фізично неклонваних функцій є надійність, непередбачуваність, неклонваність і фізична непорушність. Перевагами PUF є стійкість до агресивних атак і відсутність

потреби в додатковому програмуванні, тестуванні та обчислювальній потужності [12].

Комірки SRAM стійкі до руйнування схеми й можуть використовуватися для створення надійних PUF на основі SRAM, що можна застосовувати для автентифікації та генерації секретних ключів. Автори роботи [13] показали, що PUF можна використовувати для перевірки особистості з метою захисту обладнання IoT за допомогою автентифікації пристрою. Це досягається шляхом удосконалення конфігурованих кільцевих осциляторів (CRO – *configurable ring oscillator*) PUF зі структурою засувки. Унікальний субцифровий підпис кожного чипа може бути згенерований шляхом виконання стратегії виклик-відповідь через PUF на основі CRO.

Аналіз PUF показав, що завдяки дослідницьким зусиллям незабаром відбудеться експоненціальне покращення в галузі мікросхем та енергоефективності.

У роботі [14] було показано, що PUF можуть використовуватися пристроями IoT для забезпечення захисту IP під час процедур оновлення програмного забезпечення. Відповідно, кінцевий пристрій IoT має підтвердити стирання своєї пам'яті протягом обмеженого часу, а PUF прив'язує нещодавно завантажену IP-адресу програмного забезпечення до цільової платформи. Використання PUF обіцяє підвищення рівня безпеки IoT з допомогою реалізації низькорівневої безпеки речей, а також завдяки розробленню криптографічних алгоритмів для виконання спеціальних завдань (зокрема перевірки тощо) [15]. Подібним чином туманні обчислення можуть застосовувати PUF, які вбудовані в туманні шлюзи та/або кінцеві пристрої IoT, щоб забезпечити захист IP під час оновлення виправлень.

Апаратний модуль безпеки (HSM)

Апаратний модуль безпеки – це фізичне обчислювальне обладнання, що захищає та координує цифрові ключі для надійної автентифікації та забезпечує основу для криптооброблення. Ці модулі подані або у вигляді з'ємної карти, або зовнішнього портативного пристрою, що можна підключити безпосередньо до комп'ютера або мережного сервера. Модулі HSM можуть бути реалізовані в шлюзі туманних обчислень мережі IoT на основі туманних обчислень для керування не лише розподілом ключів, але й пов'язаними з криптографією

операціями, такими як автентифікація, шифрування / дешифрування тощо.

Існують різні конфігурації обладнання для кінцевих пристроїв IoT залежно від програми, для якої вони використовуються, а також від технології безпроводового зв'язку, яку вони застосовують. Наприклад, Bluetooth LE, Sigfox, LoRa, WiFi, WiMAX і NB-IoT є добре відомими технологіями безпроводового зв'язку для IoT з доступними на ринку наборами радіочипів. Отже, апаратні рішення безпеки не будуть загальними, оскільки вони мають враховувати

всі компоненти, що використовуються в системі. Як показано на рис. 4, ми прогнозуємо, що згадані вище апаратні засоби безпеки, доступні на ринку, можуть бути засобом забезпечення кібербезпеки для мереж IoT із підтримкою туманних обчислень. TRM і PUF є порівняно дешевшими апаратними рішеннями безпеки й можуть застосовуватися для кінцевих пристроїв IoT-мереж із підтримкою туманних обчислень. Однак апаратні модулі безпеки є досить дорогими пристроями, і їх бажано встановлювати на шлюз туманних обчислень мережі IoT.

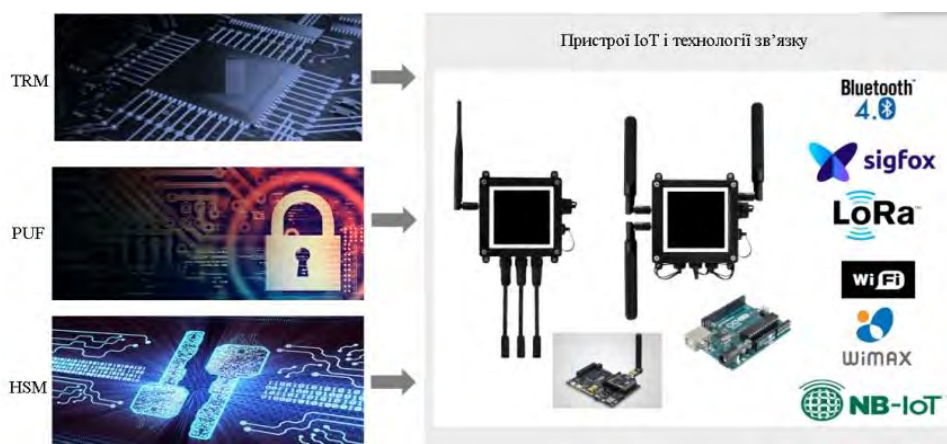


Рис. 4. Відображення "апаратної безпеки" для мереж IoT на основі туманних обчислень

Сценарії практичного застосування туманних обчислень в IoT

Завдяки впровадженню гнучкого реагування поблизу периферійних компонентів очікуємо швидкого впровадження та зростання бізнесу туманних обчислень для майбутніх застосунків IoT, таких як інтелектуальні транспортні системи (ITS), Розумні фабрики, Розумні міста тощо. На рис. 5 зображено різні можливості застосування туманних обчислень.

Концепція Розумного будинку запропонована 1975 р., коли в Шотландії була розроблена технологія X10 [16]. Зараз для застосунків домашньої автоматизації переважно використовуються Zigbee або Z-wave. Здебільшого це протоколи безпроводової мережі. Щоб захистити Розумні будинки, необхідно розглянути інфраструктуру безпеки, яка застосовує моніторинг мережі, виявлення аномалій тощо для протидії фізичним, мережним і програмним атакам.

Розумні міста можуть бути інтегровані в концепцію інтелектуальної транспортної системи способом підтримки IoT і туманних обчислень, щоб сприяти сталому економічному розвитку нашого світу (розподіл

енергії / комунальних послуг тощо), безпеці, транспорту (планування руху, системи сигналізації тощо), сприяючи прийняттю рішень за допомогою концепції локалізації. Як обговорювалося в роботі [17], Розумні міста будуть вразливі до багатьох кібератак і потребуватимуть надійної архітектури безпеки, для якої можна використовувати апаратні засоби безпеки, що підтримують туманні обчислення.

Розумні виробництва та промисловий Інтернет речей: процеси автоматизації можна покращити шляхом збору даних за допомогою датчиків Інтернету речей та аналізу даних у середовищі туманних обчислень. За допомогою цієї методології можна легко виконати аудит робочого процесу та збір даних.

Розумна охорона здоров'я: IoT і туманні обчислення можуть допомогти в удосконаленні інструментів і платформ у галузі охорони здоров'я. Фінансове вдосконалення, спостереження за безпекою, збір інформації та координація важливих даних про медичні пристрої можуть мати користь. Апаратна безпека з підтримкою туманних обчислень здатна покращити безпеку розумних систем охорони здоров'я.

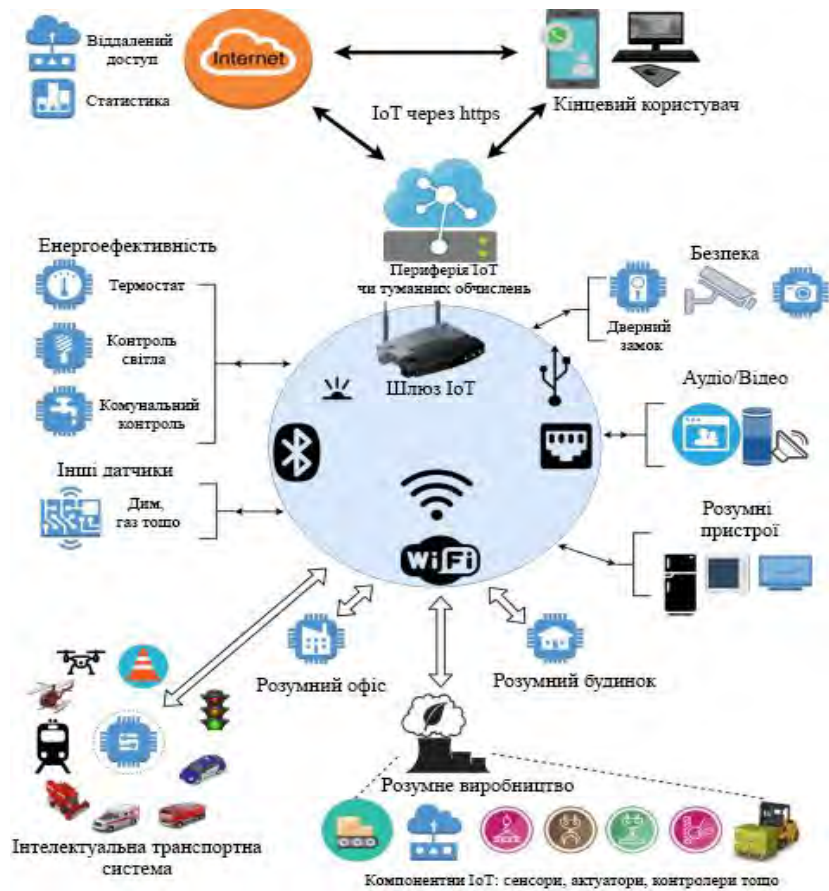


Рис. 5. Ілюстрація чотирьох різних можливих застосунків із використанням туманних обчислень із мережами IoT: Розумний офіс, Розумне виробництво, Розумний будинок та інтелектуальна транспортна система

Інтелектуальні транспортні системи (ITS – *Intelligent Transportation Systems*) можна вважати акронімом для автомобільних мереж і автомобільних мереж IoT. Очікується, що туманні обчислення розширять охоплення та зменшать час відгуку інтелектуальних транспортних систем. Загалом, ITS може мати вигоду від туманних обчислень для підвищення якості обслуговування в таких прикладах сценаріїв, як: швидка зміна маршруту руху, швидка служба буксування, екстрені служби в разі аварій і, нарешті, забезпечення необхідних шляхів евакуації в екстремальних погодних умовах, наприклад у разі ураганів.

Висновки

Поширення побутової техніки наблизило пристрої та датчики Інтернету речей до кожного з нас. Це незамінна розробка, і туманні обчислення зроблять можливим і подальший розвиток цих технологій завдяки їх перевагам. У цій статті наголошувалося про наслідки використання туманних

обчислень як базової архітектури для IoT, особливо щодо кібербезпеки.

Централізовані хмарні центри оброблення даних можуть виходити з ладу в процесі зберігання або оброблення запитів від мільйонів розподілених кінцевих пристроїв IoT через перевантажену мережу, високу затримку в службі, перевантаження в обмеженій пропускній здатності тощо. Тому з метою вирішення цієї проблеми прогнозується, що дуже корисною буде концепція туманних обчислень, особливо для чутливих до затримки програм, таких як промислова автоматизація в IIoT. Концепції підтримки мобільності, георозподілу, визначення місця розташування та низької затримки є важливими під час розгортання пристроїв Інтернету речей, і туманні обчислення є сильним кандидатом на допомогу в усіх цих питаннях.

Це дослідження також показало, що апаратні компоненти будь-якої системи, особливо системи IoT, пов'язані з туманними обчисленнями, не схильні до кібератак, зломів, вторгнень, маніпуляцій та вільні від них. У цій роботі класифікуються кілька кібератак на апаратні платформи разом із механізмами захисту

в узагальненому вигляді. Як також зазначено в роботі [18], тісніша взаємодія між розробниками мікросхем і розробниками протоколів буде необхідною для пристроїв IoT наступного покоління, щоб забезпечити бажаний рівень безпеки за мінімальних витрат на енергію / площу, одночасно гарантуючи гнучкість для майбутнього апаратного забезпечення.

Використання розглянутих у роботі апаратних засобів безпеки може допомогти зберегти конфіденційність, цілісність і доступність інформації, що циркулює в мережі, та підвищити загальну стійкість системи до можливих атак.

Передбачаємо, що найближчим часом кількість кібератак на апаратне забезпечення буде збільшуватись, особливо на вбудовані бюджетні пристрої. Отже, апаратні рішення кібербезпеки будуть дуже корисним інструментом для захисту від цих атак, що більш важливо для мереж Інтернету речей, основаних на туманних обчисленнях. Тож наші майбутні дослідження будуть і надалі присвячені пошуку можливих засобів захисту системи Інтернету речей.

Список літератури

1. Friedman, V. (2018) "On The Edge: Solving The Challenges Of Edge Computing In The Era Of IoT". URL: <https://data-economy.com/on-the-edge-solving-the-challenges-of-edge-computing-in-the-eraof-iot/>.
2. Kocakulak, M.; Butun, I. (2017, January) "An overview of Wireless Sensor Networks towards internet of things", *In Proceedings of the IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, P. 1–6. URL: <https://researchr.org/publication/ccwc-2017>
3. Aazam, M.; Zeadally, S.; Harras, K.A. (2018) "Fog computing architecture, evaluation, and future research directions", *IEEE Commun. Mag.* 2018, P. 46-52. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-34957-8_8
4. Munir, A.; Kansakar, P.; Khan, S.U. (2017) "IFCIoT: Integrated Fog Cloud IoT: A novel architectural paradigm for the future Internet of Things", *IEEE Consum. Electron. Mag.* 6, P. 74–82. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404822002164#>
5. Myers, D. (2019) "Detecting Cyber Attacks on Industrial Control Systems Using Process Mining". *Ph.D. Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane City, Australia*. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/20/5729>
6. Butun, I.; Kantarci, B.; Erol-Kantarci, M. (2015) "Anomaly detection and privacy preservation in cloud-centric Internet of Things", *In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), London, UK*, P. 2610–2615. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7601476/>
7. Arias, O.; Wurm, J.; Hoang, K.; Jin, Y. (2015) "Privacy and Security in Internet of Things and Wearable Devices", *IEEE Trans. Multi-Scale Comput. Sys. I*, P. 99–109. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7321811>
8. Skorobogatov, S.P. "Semi-Invasive Attacks – A New Approach to Hardware Security". URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-630.pdf>.
9. Butun, I.; Pereira, N.; Gidlund, M. (2019) "Security risk analysis of LoRaWAN and future directions", *Future Internet*, 11, 3. URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/1/3>
10. Yasin, M. (2019) "Logic Locking of Boolean Circuits: Provable Hardware-Based Obfuscation from a Tamper-Proof Memory". *In Proceedings of the 12th International Conference on Innovative Security Solutions for Information Technology and Communications (SecITC), Bucharest, Romania*, 172 p. URL: <https://nyuscholars.nyu.edu/en/publications/logic-locking-of-boolean-circuits-provable-hardware-based-obfusca>
11. DaSilva, P.R.; Fortier, P.J. (2019) "Hardware Based Detection, Recovery, and Tamper Evident Concept to Protect from Control Flow Violations in Embedded Processing", *In Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), Woburn, MA, USA*, P. 1–6. URL: https://www.academia.edu/72492295/Hardware_Security_of_Fog_End_Devices_for_the_Internet_of_Things
12. Shanta, A.S.; Majumder, M.B.; Hasan, M.S.; Rose, G.S. (2020) "Physically Unclonable and Reconfigurable Computing System (PURCS) for Hardware Security Applications". *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* DOI: <https://doi.org/10.3390/s20205729>
13. Huang, Z.; Wang, Q. (2020) "A PUF-based unified identity verification framework for secure IoT hardware via device authentication", *World Wide Web*, 23, P. 1057-1088. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1325?type=check_update&version=1
14. Huth, C.; Duplys, P.; Güneysu, T. (2016) "Secure software update and IP protection for untrusted devices in the Internet of Things via physically unclonable functions", *In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops), Sydney, NSW, Australia*, P. 1–6. URL: https://www.researchgate.net/publication/301583647_Secure_software_update_and_IP_protection_for_untrusted_devices_in_the_Internet_of_Things_via_physically_unclonable_functions

15. Butun, I.; Österberg, P.; Song, H. (2019) "Security of the Internet of Things: Vulnerabilities, attacks, and countermeasures", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 22, P. 616-644. DOI: 10.1109/COMST.2019.2953364
16. Stojkoska, B.L.R.; Trivodaliev, K.V. (2017) "A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions", *J. Clean. Prod.*, 140, P. 1454-1464. URL: https://iotiran.com/wp-content/uploads/2021/02/A_review_of_Internet_of_Things_for_smart_home_Challenges_and_solutions.pdf
17. Butun, I.; Österberg, P. (2019) "Detecting Intrusions in Cyber-Physical Systems of Smart Cities: Challenges and Directions. In Secure Cyber-Physical Systems for Smart Cities", *IGI Global: Hershey, PA, USA*, P. 74-102. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20205729>
18. Alioto, M. (2019) "Trends in Hardware Security: From basics to ASICs", *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, 11, P. 56-74. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9955388>

References

1. Friedman, V. (2018) "On The Edge: Solving The Challenges Of Edge Computing In The Era Of IoT". URL: <https://data-economy.com/on-the-edge-solving-the-challenges-of-edge-computing-in-the-era-of-iot/>.
2. Kocakulak, M.; Butun, I. (2017, January) "An overview of Wireless Sensor Networks towards internet of things", *In Proceedings of the IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, P. 1-6. URL: <https://researchr.org/publication/ccwc-2017>
3. Aazam, M.; Zeadally, S.; Harras, K.A. (2018) "Fog computing architecture, evaluation, and future research directions", *IEEE Commun. Mag.* 2018, P. 46-52. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-34957-8_8
4. Munir, A.; Kansakar, P.; Khan, S.U. (2017) "IFCIoT: Integrated Fog Cloud IoT: A novel architectural paradigm for the future Internet of Things", *IEEE Consum. Electron. Mag.* 6, P. 74-82. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404822002164#!>
5. Myers, D. (2019) "Detecting Cyber Attacks on Industrial Control Systems Using Process Mining". *Ph.D. Thesis, Queensland University of Technology, Brisbane City, Australia*. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/20/5729>
6. Butun, I.; Kantarci, B.; Erol-Kantarci, M. (2015) "Anomaly detection and privacy preservation in cloud-centric Internet of Things", *In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), London, UK*, P. 2610-2615. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7601476/>
7. Arias, O.; Wurm, J.; Hoang, K.; Jin, Y. (2015) "Privacy and Security in Internet of Things and Wearable Devices", *IEEE Trans. Multi-Scale Comput. Sys.* 1, P. 99-109. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7321811>
8. Skorobogatov, S.P. "Semi-Invasive Attacks – A New Approach to Hardware Security". URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-630.pdf>.
9. Butun, I.; Pereira, N.; Gidlund, M. (2019) "Security risk analysis of LoRaWAN and future directions", *Future Internet*, 11, 3. URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/1/3>
10. Yasin, M. (2019) "Logic Locking of Boolean Circuits: Provable Hardware-Based Obfuscation from a Tamper-Proof Memory". *In Proceedings of the 12th International Conference on Innovative Security Solutions for Information Technology and Communications (SecITC), Bucharest, Romania*, 172 p. URL: <https://nyuscholars.nyu.edu/en/publications/logic-locking-of-boolean-circuits-provable-hardware-based-obfusca>
11. DaSilva, P.R.; Fortier, P.J. (2019) "Hardware Based Detection, Recovery, and Tamper Evident Concept to Protect from Control Flow Violations in Embedded Processing", *In Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), Woburn, MA, USA*, P. 1-6. URL: https://www.academia.edu/72492295/Hardware_Security_of_Fog_End_Devices_for_the_Internet_of_Things
12. Shanta, A.S.; Majumder, M.B.; Hasan, M.S.; Rose, G.S. (2020) "Physically Unclonable and Reconfigurable Computing System (PURCS) for Hardware Security Applications". *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* DOI: <https://doi.org/10.3390/s20205729>
13. Huang, Z.; Wang, Q. (2020) "A PUF-based unified identity verification framework for secure IoT hardware via device authentication", *World Wide Web*, 23, P. 1057-1088. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/4/1325?type=check_update&version=1
14. Huth, C.; Duplys, P.; Güneysu, T. (2016) "Secure software update and IP protection for untrusted devices in the Internet of Things via physically unclonable functions", *In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops), Sydney, NSW, Australia*, P. 1-6. URL: https://www.researchgate.net/publication/301583647_Secure_software_update_and_IP_protection_for_untrusted_devices_in_the_Internet_of_Things_via_physically_unclonable_functions
15. Butun, I.; Österberg, P.; Song, H. (2019) "Security of the Internet of Things: Vulnerabilities, attacks, and countermeasures", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 22, P. 616-644. DOI: 10.1109/COMST.2019.2953364
16. Stojkoska, B.L.R.; Trivodaliev, K.V. (2017) "A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions", *J. Clean. Prod.*, 140, P. 1454-1464. URL: https://iotiran.com/wp-content/uploads/2021/02/A_review_of_Internet_of_Things_for_smart_home_Challenges_and_solutions.pdf

17. Butun, I.; Österberg, P. (2019) "Detecting Intrusions in Cyber-Physical Systems of Smart Cities: Challenges and Directions. In Secure Cyber-Physical Systems for Smart Cities", *IGI Global: Hershey, PA, USA*, P. 74–102. DOI <https://doi.org/10.3390/s20205729>
18. Alioto, M. (2019) "Trends in Hardware Security: From basics to ASICs", *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, 11, P. 56–74. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9955388>

Received 16.03.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Журило Олег Дмитрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри безпеки інформаційних технологій, асистент кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: oleh.zhurylo@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7505-2022>

Ляшенко Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: oleksii.liashenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0146-3934>

Аветісова Карина Арменівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, студентка кафедри безпеки інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: karyna.avetisova@nure.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4273-8148>

Zhurylo Oleh – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student of the Department of Information Technology Security, Assistant Lecturer of the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

Liashenko Oleksii – Ph.D (Engineering Sciences), Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

Avetisova Karyna – Kharkiv National University of Radio Electronics, Student of the Department of Information Technology Security, Kharkiv, Ukraine.

HARDWARE SECURITY OVERVIEW OF FOG COMPUTING END DEVICES IN THE INTERNET OF THINGS

The subject of the study is possible means of increasing the hardware security of end devices of fog computing in Internet of Things (IoT) networks, the spread of which is growing rapidly every year and requires a high level of protection against all types of attacks. The **goal** of the work is to review available COTS (commercial off-the-shelf) and/or conceptual hardware solutions for protecting low-end devices in Internet of Things networks based on fog technologies. To achieve the goal, the following **tasks** were solved: the concept of fog computing and the advantages it will bring to IoT networks are presented; cyber threats and hardware attacks on IoT networks are considered; the consequences of using IoT networks based on fog computing are presented; hardware security tools such as TRM, PUF, HSM, etc. are considered. When performing the tasks, such research **methods** were used as: theoretical analysis of literary sources; comparative analysis of cloud, fog and mobile computing; analysis of existing security hardware. The following **results** were obtained: fog computing provides most of the advantages of cloud computing by additionally allowing data to be processed on end devices without burdening the central server. **Conclusions:** hardware security in IoT systems is no less important than software security. This issue is especially important for systems based on fog computing, where data will be processed on the periphery, without being transferred to the cloud. To increase the level of hardware security of fog computing devices, it is suggested to use standard hardware security platforms, such as: Physically Unclonable Functions, Hardware Security Module, System On a Chip, etc. The hardware components of the system using fog computing are less prone to cyber-attacks/hacking/intrusions/manipulation.

Keywords: cloud; fog computing; hardware security; IoT; IIoT; privacy; security; hardware security module; physically unclonable functions.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Журило О. Д., Ляшенко О. С., Аветісова К. А. Огляд рішень з апаратної безпеки кінцевих пристроїв туманних обчислень у Інтернеті речей. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 57–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.057>

Zhurylo, O., Liashenko, O., Avetisova, K. (2023), "Hardware security overview of fog computing end devices in the Internet of things", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 57–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.057>

О. Мамчич, М. Волк

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ У ПРОЦЕСІ ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Сучасні обчислювальні задачі потребують зростання обчислювальних потужностей. Це викликає необхідність створення та виробництва нового обладнання для хмарних обчислень. Одночасно з цим кількість персональних мобільних пристроїв уже вимірюється мільярдами, і навіть часткове їх залучення могло б зменшити вимоги до виробництва. Крім того, мобільне апаратне забезпечення є більш енергоефективним, що сприяє значному заощадженню енергії. У статті досліджено питання якісної та кількісної оцінки ефективності використання мобільних пристроїв для обчислень порівняно з традиційними стаціонарними рішеннями. **Мета роботи** – обґрунтувати таку гіпотезу: обчислення в хмарі на основі мобільних пристроїв суттєво зменшує використання енергії, ніж обчислення на стаціонарному обладнанні. Для цього показано, що обчислення на мобільному графічному процесорі є більш енергетично ефективним, ніж обчислення на стаціонарному процесорі. Для визначення якісної переваги проаналізовано публічні джерела та бенчмарки. На основі досліджених даних обчислено показники ефективності для різноманітних мобільних і стаціонарних графічних процесорів. Аргументовано, що здебільшого мобільні рішення витрачають суттєво менше енергії порівняно з стаціонарними рішеннями. Для обчислення кількісної переваги проведено експеримент на основі двох платформ: мобільної та стаціонарної. Одну й ту саму обчислювальну задачу було реалізовано за допомогою Apple Metal та NVidia CUDA. На основі цієї задачі обчислено показники енергетичної ефективності мобільного й стаціонарного графічного процесора. За результатами дослідження визначено суттєву перевагу мобільного графічного процесора в перерахунку на енергетичну ефективність. Цей результат є релевантним, оскільки платформи вийшли в один рік із різницею у кілька місяців, отже, їх можна вважати ровесницями одна одній. Надані підходи не враховують споживання всіх інших частин системи, крім графічних процесорів. Це означає, що споживання материнської плати, блоку живлення тощо можуть схилити перевагу на користь мобільного процесора ще більше. Але для розподілених обчислень дуже важливим є мережне з'єднання, що може споживати суттєву кількість енергії на мобільному пристрої. Подальші дослідження стосуватимуться більш всеосяжного обліку споживання енергії різними підсистемами комп'ютера.

Ключові слова: обчислювальна хмара; хмара смартфонів; енергетична ефективність; хмарні обчислення; CUDA; Metal; апаратне прискорення.

Вступ

У сучасному світі якість обчислювальних потужностей є значною проблемою. Вимоги до швидкості та масштабування обчислювальної техніки зростають, що пов'язано із збільшенням обсягів даних, які необхідно обробляти, поширенням штучного інтелекту, машинного навчання та інших високотехнологічних проєктів.

Водночас створюється значний тиск на виробників комп'ютерів та інших пристроїв, що мають забезпечити необхідну продуктивність і ефективність у різноманітних умовах. Щоб відповісти на ці виклики, багато компаній зосереджуються на розробленні новітніх технологій, таких як обчислювальні хмари, що здатні забезпечити якісну швидкість і масштабованість. Збільшується також попит на енергоефективні та екологічні рішення, оскільки споживання енергії та викиди відходів з обчислювальної техніки можуть завдати негативного впливу на довкілля. Загалом, зростання вимог до обчислювальної потужності є важливою

тенденцією, що визначає розвиток сучасного світу й зумовлює величезний прогрес у різних галузях науки й техніки.

Збільшення попиту на обчислювальні хмари – один із найбільш помітних напрямів у світі ІТ-індустрії. Обчислювальні хмари містять значну кількість обчислювальних ресурсів, таких як процесори, пам'ять, сховища даних і мережні ресурси, що надаються користувачам через інтернет. Зростання популярності хмарних обчислень зумовлене багатьма факторами, зокрема безперервним збільшенням обсягів даних, розвитком інтернет-технологій та обсягів складних обчислювальних задач у різних галузях. Хмарні обчислення, як зручний і економічний спосіб розв'язання задач, стають дуже ефективним інструментом.

За останні роки ринок хмарних обчислень значно зріс, пропонуючи більші обсяги обчислювальних ресурсів за доступнішими цінами. Водночас поширення хмарних обчислень сприяє розвитку нових технологій та інновацій, що полегшують життя бізнесу та користувачів.

У контексті зростання попиту на обчислювальну потужність енергетична ефективність обчислювальних систем також є дуже важливою проблемою з погляду економії ресурсів і збереження довкілля. Інтернет, соціальні мережі, штучний інтелект, системи автоматизації, наукові дослідження тощо потребують значної кількості обчислювальних ресурсів. Але водночас зростають і витрати енергії, потрібної для живлення цих систем. Це може створювати проблеми зі збільшенням викидів вуглецю та забрудненням довкілля. Розробники обчислювальної техніки й програмного забезпечення працюють над створенням більш енергоефективних систем, над використанням відновлювальних джерел енергії та вдосконаленням технологій охолодження.

За результатами досліджень компанії IDC, 2021 р. світова кількість відвантажених смартфонів становила 1,24 млрд одиниць [1]. З огляду на те, що смартфони зазвичай використовуються протягом кількох років, загальна кількість пристроїв у використанні може бути вищою. Наприклад, за інформацією *Statista*, на початку 2021 р. у світі було близько 3,8 млрд активних користувачів смартфонів [2]. Смартфон – це обчислювальний пристрій, що більшу частину часу не є активним, і якщо залучити до обчислювальних задач навіть незначну кількість смартфонів, це могло б створити надзвичайно великий обсяг обчислювальної потужності без виробництва нових чипів.

Згідно з проектом *green500* [3], найбільш енергоефективні 10 суперкомп'ютерів у світі мають енергетичну ефективність у 38–65 GFLOPS обчислювальної потужності на ват потужності. За офіційною інформацією, мобільний *SoC Apple A14 Bionic*, що використовується в *iPhone 12*, має номінальну обчислювальну потужність 1000 GFLOPS за умови номінального споживання 6 Вт, що оцінює ефективність у 167 GFLOPS/W. Звичайно, таким чином маємо загальну оцінку, яку не можна застосовувати для практичних задач, але це порушує питання про доцільність використання смартфонів як енергоефективних обчислювальних систем. Ця робота досліджує доцільність залучення для обчислення наявних мобільних обчислювальних пристроїв у контексті зменшення витрат енергії для обчислення. Метою статті є обґрунтування такої гіпотези: обчислення в хмарі на основі мобільних пристроїв використовує суттєво менше енергії, ніж обчислення на стаціонарному обладнанні.

Аналіз наявних робіт

Існує дуже обмежена кількість робіт щодо практичного розподіленого обчислення на смартфонах і побудови обчислювальних хмар на основі смартфонів. Наприклад, у праці [4] автори будують розподілену систему обчислення в хмарі. Ця система складається з серверного вебзастосунку, який керує розподілом задачі, та клієнтського браузерного вебзастосунку, що обчислює. Референсною задачею є навчання нейронної мережі. Обчислення виконується в середовищі браузера, що інтерпретує мову *JavaScript*. З одного боку, таке рішення є гнучким і не залежить від платформи, з іншого – ефективність обчислення засобами *JavaScript* дуже низька через особливості інтерпретації та неможливість доступу до засобів апаратного прискорення. Але це рішення доводить концептуальну можливість використовувати мобільні пристрої для обчислення.

Проект *World Community Grid* [5] є практичною реалізацією розподіленої системи обчислення із залученням смартфонів. Від застосовує більш розвинену систему керування на сервері: оркестрування, дублювання, гнучке планування. На клієнтському застосунку для обчислення використовується *OpenCL*, що дає змогу застосовувати деякі засоби апаратного прискорення. Цей проект не ставить за мету вивчення або максимізацію енергетичної ефективності, однак це один із розвинених представників у галузі.

Під час пандемії COVID-19 долучення персональних смартфонів для обчислення дослідницьких задач [6] зробило вагомий внесок у вивченні вірусу. Такі проекти, як *BOINC* [7], *Folding@home* [8], *DreamLab*, *Rosetta@home* [9], активно долучали смартфони ентузіастів до своєї обчислювальної інфраструктури, щоб вивчити особливості вірусу та створити вакцини.

Також існує досить багато робіт щодо рендерингу графіки на смартфонах [10]. Але завдання рендерингу є вузькою та особливою. Для неї існує дуже розвинена інфраструктура, що передбачає засоби апаратного прискорення, програмні рішення тощо. Деякі проекти (*DreamLab*) підтримують розподілений рендеринг на смартфонах. Але ця інфраструктура погано підходить для загальних задач обчислення.

Задача балансування навантаження [11] з урахуванням витрат на передачу даних нагальна не тільки в контексті хмар на основі смартфонів, але є їх невід'ємною частиною.

Задача обчислення на смартфоні спожитої енергії є також малодослідженою. У роботі [12] наводиться приклад евристичної моделі розподілу задач у гетерогенній хмарі. Ця модель бере до уваги як вартість обчислення в гетерогенній хмарі, так і вартість комунікації. Мета дослідження полягає в мінімізації часу виконання, але автори зауважують, що метод ефективний і для мінімізації енергетичних витрат.

В іншій роботі [13] описано підхід до обчислення споживання енергії в процесі обчислення в розподіленій системі та подано можливість прогнозування енергетичних витрат на іншій системі на основі даних попереднього виконання.

Ця стаття є продовженням і розвитком раніше опублікованих тез [14].

Опис методу дослідження

Завдання цієї роботи – довести гіпотези щодо переваг графічних смартфонів над стаціонарними графічними процесорами у сфері енергетичної ефективності та кількісне оцінювання цих переваг. В ідеальних умовах для надійного порівняння продуктивності стаціонарного апаратного забезпечення та мобільного обладнання необхідний доступ до всього обладнання та єдиного еталонного тесту, що може надійно вимірювати як продуктивність, так і енергоспоживання для різноманітних завдань. І якщо першу вимогу можна виконати орендою відповідного обладнання в хмарах, то другу – ні.

Мобільні та стаціонарні комп'ютери мають дуже різні завдання та способи використання. Апаратне забезпечення стаціонарних комп'ютерів розроблено для тривалої роботи в умовах пікового навантаження. Воно може тривалий час працювати під великим навантаженням без змін у продуктивності. Для цього стаціонарне обладнання забезпечено відносним потужним електричним живленням. Саме обладнання досить велике, має значну власну теплоємність та площу поверхні, що дозволяє встановлювати потужну та ефективну конвекційну систему охолодження або навіть рідинну систему охолодження. Це означає, що стаціонарний комп'ютер споживає стільки енергії, скільки потрібно для підтримки максимальної продуктивності, а ефективна система охолодження запобігає тротлінгу – процесу вимушеного зниження продуктивності процесора через перегрів. Навпаки, мобільні пристрої мають акумулятор обмеженої ємності порівняно з серверними/настільними джерелами

живлення, а їх система охолодження пасивна й обмежена відтоком тепла через відносно малий корпус мобільного пристрою. Це призводить до відносно швидкого (декілька хвилин) перегріву пристрою.

Режим роботи мобільного пристрою потребує також іншої стратегії керування частотою та живленням мобільного процесора. На відміну від стаціонарного, він розрахований на короткі періоди навантаження. Навіть коли користувач упродовж тривалого часу користується браузером, навантаження також має форму короткотривалих піків: сторінка завантажується, обробляється, а потім навантаження знижується, поки не буде нової активності користувача. Це робить виправданим більш агресивний режим бусту частоти, поки процесор холодний, ніж на стаціонарному обладнанні. Стаціонарні процесори також застосовують можливість тимчасового саморозгону, поки вони холодні [15], але в мобільних процесорів цей процес значно агресивніший. Це призводить до швидкого перегріву мобільного процесора під навантаження та динамічного зниження частоти або тротлінгу. Отже, на відміну від стаціонарного, мобільний процесор за умови сталого навантаження має короткий період пікової продуктивності й потім довготривалий період зниженої на 15–25% продуктивності. Типова продуктивність мобільного процесора з плином часу показана на рис. 1.



Рис. 1. Продуктивність мобільного процесора під навантаженням

Така різниця в роботі мобільних і стаціонарних процесорів робить складним і водночас непотрібним створення тестів, що порівнювали б їх енергетичну ефективність під тривалими великими сталими навантаженнями. Навіть використання 3D-бенчмарків ускладнене тим, що їх мобільні версії адаптовані для мобільних пристроїв. Тому порівнювати результати тесту на основі однієї бібліотеки для мобільного й стаціонарного процесора не має сенсу:

обчислювальні задачі фактично різні. Аналізуючи публічні бенчмарки, ми прийшли до висновку, що тести для стаціонарних комп'ютерів майже повністю ізольовані та не стосуються мобільних. Тобто бенчмарки для стаціонарних комп'ютерів дуже репрезентативні для порівняння стаціонарних рішень між собою, а мобільні – для порівняння мобільних рішень між собою. Кожна група тестів адаптувалася саме для цих задач, і тому надійних публічних результатів порівняння продуктивності стаціонарних і мобільних процесорів не існує.

Тому ми зробили іншу стратегію порівняння на основі різних тестів. Для кожної групи (стаціонарні та мобільні графічні процесори) ми знаходимо бенчмарки, що досягають максимального навантаження впродовж часу та вимірюють в абсолютних одиницях. Також для кожної групи обираємо бенчмарки, що досягають максимального споживання енергії впродовж тривалого часу.

Для кожної моделі графічного процесора обираємо 2–3 бенчмарки з максимальною продуктивністю та беремо медіану, також обираємо 2–3 бенчмарки з максимальним споживанням та беремо медіану. Цей підхід не можна розглядати як метод оцінювання енергетичної ефективності конкретної моделі графічного процесора, але метод оцінювання однаковий, і для вагомої вибірки він даватиме приблизне розуміння енергоефективності стаціонарних і мобільних графічних процесорів.

Усі задачі поділимо на три групи: задачі на обчислення з рухомою точкою з одинарною точністю (*single precision*), половинною точністю (*half precision*) та подвійною точністю (*double precision*). Референсними графічними процесорами оберемо пристрої різних виробників (*NVIDIA GeForce, AMD Radeon, Adreno, Mali, Apple Buinic*) одного й того самого періоду (2019–2021). Результати виміру наведені в табл. 1 і 2.

Таблиця 1. Енергетична ефективність стаціонарних графічних процесорів

	Half Precision GFLOPS/W	Single Precision GFLOPS/W	Double Precision GFLOPS/W
GeForce RTX 2050 (M)	268.889	134.444	4.200
GeForce RTX 2060 Max-Q (M)	140.015	70.000	2.185
GeForce RTX 2060 (M)	102.400	51.200	1.600
GeForce RTX 2070 Max-Q (M)	136.500	68.250	2.138
GeForce RTX 2070 (M)	115.391	57.704	1.800
GeForce RTX 2070 Super Max-Q (M)	138.250	69.125	2.163
GeForce RTX 2070 Super (M)	122.870	61.443	1.922
GeForce RTX 2080 Max-Q (M)	161.125	80.588	2.525
GeForce RTX 2080 (M)	124.800	62.413	1.953
GeForce RTX 2080 Super Max-Q (M)	165.875	82.950	2.588
GeForce RTX 2080 Super (M)	127.800	63.900	2.000
GeForce RTX 2060	80.638	40.319	1.263
GeForce RTX 2060 (12 GB)	77.632	38.816	1.211
GeForce RTX 2060 Super	82.069	41.034	1.280
GeForce RTX 2070	85.314	42.657	1.331
GeForce RTX 2070 Super	84.302	42.149	1.316
GeForce RTX 2080	93.660	46.828	1.465
GeForce RTX 2080 Super	89.212	44.604	1.396
GeForce RTX 2080 Ti	96.057	48.029	1.504
GeForce RTX 3050 Laptop	66.600	66.600	1.031
GeForce RTX 3050 Ti Laptop	81.523	81.523	1.262
GeForce RTX 3060 Laptop	136.750	136.750	2.138
GeForce RTX 3070 Laptop	152.095	152.095	2.371
GeForce RTX 3070 Ti Laptop	139.238	139.238	2.171
GeForce RTX 3080 Laptop	165.043	165.043	2.574
GeForce RTX 3080 Ti Laptop	162.696	162.696	2.539
GeForce RTX 3050	69.985	69.985	1.092
GeForce RTX 3060	74.929	74.929	1.171
GeForce RTX 3060 Ti	80.985	80.985	1.265
GeForce RTX 3070	92.336	92.336	1.441

Кінець табл. 1

	Half Precision GFLOPS/W	Single Precision GFLOPS/W	Double Precision GFLOPS/W
GeForce RTX 3070 Ti	74.828	74.828	1.172
GeForce RTX 3080	93.025	93.025	1.453
GeForce RTX 3080 (12 GB)	87.551	87.551	1.366
GeForce RTX 3080 Ti	97.429	97.429	1.523
GeForce RTX 3090	101.660	101.660	1.589
GeForce RTX 3090 Ti	88.882	88.882	1.389
Radeon RX 6400 (Navi 24 XL)	134.528	67.264	4.204
Radeon RX 6500 XT (Navi 24 XT)	102.035	51.018	3.188
Radeon RX 6600 (Navi 23 XL)	135.303	67.636	4.227
Radeon RX 6600 XT (Navi 23 XT)	125.497	62.751	3.922
Radeon RX 6650 XT (Navi 23 KXT)	119.922	59.961	3.748
Radeon RX 6700 (Navi 22 XL)	129.023	64.514	4.032
Radeon RX 6700 XT (Navi 22 XT)	114.909	57.457	3.591
Radeon RX 6750 XT (Navi 22 KXT)	106.496	53.248	3.328
Radeon RX 6800 (Navi 21 XL)	129.332	64.664	4.040
Radeon RX 6800 XT (Navi 21 XT)	138.240	69.120	4.320
Radeon RX 6900 XT (Navi 21 XTX)	153.600	76.800	4.800
Radeon RX 6950 XT (Navi 21 KXTX)	141.221	70.609	4.412
Radeon RX 6300M (Navi 24 XML)	250.800	125.200	7.824
Radeon RX 6500M (Navi 24 XM)	199.400	99.600	6.224
Radeon RX 6600S (Navi 23)	195.375	97.625	5.601
Radeon RX 6700S (Navi 23)	158.400	79.200	4.950
Radeon RX 6600M (Navi 23)	175.500	78.000	4.875
Radeon RX 6650M (Navi 23)	147.500	73.750	4.609
Radeon RX 6800S (Navi 23)	184.300	92.200	5.765
Radeon RX 6650M XT (Navi 23)	166.167	83.083	5.193
Radeon RX 6700M (Navi 22 XM)	157.104	78.556	4.904
Radeon RX 6800M (Navi 22 XTM)	162.414	81.241	5.077
Radeon RX 6850M XT (Navi 22 XTM)	160.182	80.061	5.004
MIN	66.600	38.816	1.031
MAX	268.889	165.043	7.824
AVG	127.892	78.738	2.902
MEDIAN	127.800	73.750	2.185

Таблиця 2. Енергетична ефективність стаціонарних графічних процесорів

	Half Precision GFLOPS/W	Single Precision GFLOPS/W	Double Precision GFLOPS/W
Adreno 610	182.00	91.00	22.67
Adreno 640	265.85	132.92	33.23
Adreno 650	347.38	173.68	43.42
Adreno 660	382.14	191.07	47.76
Adreno 680	292.57	146.29	36.57
Adreno 730	570.06	285.03	71.26
Mali-G57 MP2	384.00	192.00	96.00
Mali-G78 MP20	396.53	198.27	49.59
Apple A12	126.79	63.39	15.87
Apple A15	416.67	208.33	52.08
MIN	126.79	63.39	15.87
MAX	570.06	285.03	96.00
AVG	336.40	168.20	46.85
MEDIAN	364.76	182.38	45.59

Нехай E – енергетична ефективність; E_{HP} , E_{SP} , E_{DP} – енергетична ефективність обчислення з половинною, одинарною та подвійною точністю; E_{MIN} , E_{MAX} , E_{AVG} – мінімальна, максимальна

й середня енергетичні ефективність; E^M , E^S – енергетична ефективність мобільних і стаціонарних графічних процесорів відповідно. Тоді зростання ефективності B обчислюється за формулами:

$B_{HP,min} = E_{HP,min}^M / E_{HP,min}^S$	$B_{SP,min} = E_{SP,min}^M / E_{SP,min}^S$	$B_{DP,min} = E_{DP,min}^M / E_{DP,min}^S$
$B_{HP,max} = E_{HP,max}^M / E_{HP,max}^S$	$B_{SP,max} = E_{SP,max}^M / E_{SP,max}^S$	$B_{DP,max} = E_{DP,max}^M / E_{DP,max}^S$
$B_{HP,avg} = E_{HP,avg}^M / E_{HP,avg}^S$	$B_{SP,avg} = E_{SP,avg}^M / E_{SP,avg}^S$	$B_{DP,avg} = E_{DP,avg}^M / E_{DP,avg}^S$

Отже, мобільний графічний процесор у середньому витрачає в 2,1 рази менше енергії на обчислення з одинарною точністю, в 2,6 рази менше за умови

обчислення з половинною точністю та в 16,2 рази менше, якщо обчислення здійснюється з подвійною точністю. Результат можна побачити на рис. 2.

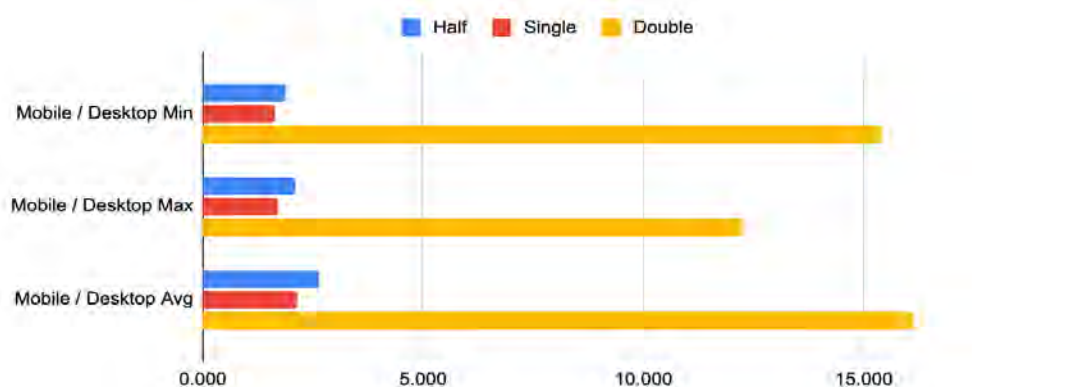


Рис. 2. Зростання ефективності мобільних процесорів порівняно зі стаціонарними

Відрив у 2,6 рази в обчисленнях із половинною точністю може бути трохи завищеним, бо для багатьох стаціонарних графічних процесорів ефективність такого обчислення майже не відрізняється від обчислення з одинарною точністю. Це може бути наслідком особливостей самого тесту. У графічних процесорів *Nvidia* є два основних типи операції з половинною точністю: одинарна й пакетна [16]. У першому випадку в одній інструкції – одна операція з половинною точністю, в другому випадку – дві операції в одній інструкції. Тривалість виконання операції з половинною та одинарною точністю у графічних процесорів *Nvidia* однакова (у тактах), тому одинарні операції половинної точності мають таку саму або трохи вищу швидкість (~5%) через зменшення навантаження на шину даних. Пакетні або упаковані операції ефективніші, і за один і той самий час графічний процесор може виконувати більше таких операцій. Ми не можемо знати деталі реалізації деяких бенчмарків, але однакова ефективність виконання операції з одинарною та половинною

точністю швидше за все зумовлена реалізацією одинарних операцій з половинною точністю.

Різниця між ефективністю обчислення з подвійною точністю пояснюється тим, що стаціонарні графічні процесори традиційно мають значно меншу ефективність обчислень із подвійною точністю. Це є наслідком того, що подвійна точність нечасто потрібна в комп'ютерній графіці, фізиці, кодуванні відео тощо. Усе інше добре виконує центральний процесор за допомогою розширених векторних інструкцій. У мобільних пристроях центральний і графічний процесор мають доступ до спільної пам'яті, тому високоефективне оброблення даних із подвійною точністю може бути дуже легко перенесене на графічний процесор, щоб таким чином спростити центральний процесор.

Експериментальне дослідження

Оцінювання ефективності на основі публічних джерел і бенчмарків може якісно визначити стан

речей, але не підходить для кількісного оцінювання. Вхідні дані не повні та засмічені: ми не виконуємо одні й ті самі задачі на мобільному й стаціонарному процесорі, навіть не знаємо деталей реалізації. Тому для вимірювання та порівняння ефективності зробимо власний бенчмарк.

Для обох платформ (мобільної та стаціонарної) реалізуємо синтетичний бенчмарк. Референсною задачею є помноження матриць великої розмірності з додатковими операціями, що не змінюють результат, але роблять задачу більш інтенсивною на обчислення, а не на пам'ять.

Мобільними платформами оберемо *iPhone 12 mini* 2020 р. Реалізація референсної задачі виконана за допомогою *Metal*, бо *Metal* є найкращим інструментом для використання апаратного прискорення в інфраструктурі *Apple* [17]. Вимірювання споживання енергії напряму є неможливим, тому ми повністю зарядимо батарею, поставимо на виконання задачу та дочекаємось відключення мобільного пристрою через розрядку акумулятора. Ємність і стан акумулятора – відомі, тому можна розділити загальну кількість операцій на витрачену енергію акумулятора, і це будуть ті самі GFLOPS/W. Ядро обчислення *Metal* наведене у фрагменті 1.

Фрагмент коду 1. Ядро обчислення *Metal*

```
kernel void ck_mat_prod_s(device float* inputA          [[buffer(PTMatProdCKIndex_InputA)]],
                        device float* inputB          [[buffer(PTMatProdCKIndex_InputB)]],
                        device float* output          [[buffer(PTMatProdCKIndex_Output)]],
                        constant PTMatProdCKUniforms &uniforms [[buffer(PTMatProdCKIndex_Uniforms)]],
                        uint2 gid                      [[thread_position_in_grid]])
{
    float sum = 0.0;
    int dim = uniforms.size.x;

    device const float4* lineA = (device const float4*)(inputA + gid.x * uniforms.size.x);
    device const float4* lineB = (device const float4*)(inputB + gid.y * uniforms.size.x);

    int lineLength = dim / 4;

    const int kPayloadTimes = 32;

    for (int i = 0; i < lineLength; ++i)
    {
        float4 va = lineA[i];
        for (int j = 0; j < kPayloadTimes; ++j)
        {
            va = va * uniforms.am;
            va = va * uniforms.im;
        }
        float4 vb = lineB[i];
        for (int j = 0; j < kPayloadTimes; ++j)
        {
            vb = vb * uniforms.am;
            vb = vb * uniforms.im;
        }
        sum += dot(va, vb);
    }

    output[gid.x + gid.y * dim] = sum;
}
```

Штучне додаткове навантаження здійснюється за допомогою додаткових 32 циклів по 4 множення матриці на вектор (вектором є кожні чотири елементи рядка та стовпця матриць, які ми помножуємо). На результат це не впливає, бо матриці *am* та *im* є зворотними одна до одної, але такий спосіб запобігає оптимізації зайвого коду компілятором.

Кількість корисних операцій обчислюється таким чином. Кожний елемент добутку матриць є скалярним добутком рядка першої матриці на стовпець другої. Тому чистий скалярний добуток мав би складність $N+N-1$, де N – довжина

рядка/стовпця. Додаткове баластне навантаження додає по 4×32 матричних добутки на кожні 4 елементи скалярного добутку. Отже, можемо стверджувати, що на кожен елемент N відбувається додатково 32 добутки матриці на вектор. Добуток матриці 4×4 на вектор з 4 елементів займає 28 операцій. Тому кінцева складність обчислення кожного члена добутку матриць буде $N + N - 1 + 28N$, нехай $30N$ для спрощення.

Щоб було простіше, помножимо матриці розміром 1024×1024 , тобто $N = 1024$. Загалом у добутку буде $N \times N$ членів, кожний з яких має

складність $30N$ операцій. Кінцева складність обчислення матриці 1024×1024 – 32,211 млрд операцій із рухомою точкою. Кількість сервісних операцій не є суттєвою й значно менша ніж 1%.

Ємність батареї *iPhone 12 mini* – 8,57 Вт/год або 30852 Дж. Стан батареї – 84%, тобто можемо вважати, що ємність батареї – $P_M = 25915$ Дж. Нехай кількість обчислень матриць до повного розрядження – $K = 131279$. Тоді енергетичну ефективність обчислень можна визначити за формулою:

$$E_M = \frac{30N^3 K}{P_M} = 163.179 \cdot 10^9 \text{ GFLOPS/W.}$$

Фрагмент коду 2. Ядро обчислення CUDA

```
global void test_cuda_routine_kernel(const float* a, const float* b, float* c,
                                     const float* pam, const float* pim, int count, int dim)
{
    int index = blockIdx.x * blockDim.x + threadIdx.x;
    if (index >= count)
        return;

    int x = index % dim;
    int y = index / dim;

    float sum = 0.0f;
    const glm::vec4* va = (const glm::vec4*)(a + x * dim);
    const glm::vec4* vb = (const glm::vec4*)(b + y * dim);

    const glm::mat4* am = (glm::mat4*)pam;
    const glm::mat4* im = (glm::mat4*)pim;

    const int kPayloadTimes = 32;

    for (int i = 0; i < dim / 4; ++i)
    {
        glm::vec4 ea = va[i];
        for (int j = 0; j < kPayloadTimes; ++j)
        {
            ea = ea * (*am);
            ea = ea * (*im);
        }
        glm::vec4 eb = vb[i];
        for (int j = 0; j < kPayloadTimes; ++j)
        {
            eb = eb * (*am);
            eb = eb * (*im);
        }
        sum += glm::dot(ea, eb);
    }

    c[index] = sum;
}
```

Для вимірювання споживання енергії використовуємо застосунок GPU-Z. Він може знімати показники споживання енергії та зберігати у файл. Для вимірювання енергетичної ефективності знадобиться час виконання $T = 300$ с, кількість виконаних добутків матриць $K = 143994$ та середнє споживання енергії відеокартою $P_S = 182$ Вт (P_S обчислюється як різниця середнього споживання

Відповідно до табл. 2 значення E_M розташоване між піковою продуктивністю A12 (63.39 GFLOPS/W) та A15 (208.33 GFLOPS/W), ближче до A15, що є очікуваним.

Як стаціонарну платформу використаємо *GeForce RTX 3080* – відеокарта також 2020 р., тобто є ровесницею *iPhone 12 mini*. Референсною задачею застосовано такий самий добуток матриць, але реалізований за допомогою CUDA. Код ядра CUDA наведено у фрагменті коду 2.

під час виконання тесту та споживання відеокарти в режимі спокою). Тоді енергетичну ефективність можна обчислити за формулою:

$$E_S = \frac{30N^3 K}{P_S T} = 84.951 \cdot 10^9 \text{ GFLOPS/W.}$$

Знайдене значення продуктивності (84,951 GFLOPS/W) досить близьке до відповідного значення в табл. 1 (93,025 GFLOPS/W). Зростання

ефективності обчислення дорівнює $B = EM/ES = 1,92$. Тобто на обчислення на мобільному пристрої було витрачено в 1,92 рази менше енергії за операцію, ніж на стаціонарному пристрої.

Зазначений метод враховує лише продуктивність графічного процесора та ігнорує фонове споживання системи, а також споживання інших складників системи. Стаціонарний комп'ютер споживає набагато більше, ніж відеокарта, тоді як споживання смартфона майже цілком складається зі споживання графічного процесора. Незважаючи на те, що ми не можемо кількісно оцінити загальне споживання в межах цього тесту, якісно це також необхідно оцінити на користь смартфона. Але в реальних задачах із розподіленого обчислення також суттєву частину енергії витрачатиме система мобільної передачі даних або підключення до локальної мережі. Натомість стаціонарний комп'ютер, особливо в датацентрі, має дротове підключення до мережі, і передача ним даних впливає на споживання енергії не так суттєво. Урахування та моделювання споживання всієї обчислювальної системи під час виконання конкретних обчислювальних задач є темою наступних наукових робіт, зокрема дисертації.

Висновки

У статті необхідно було оцінити, наскільки легітимною є гіпотеза, що використання мобільного

пристрою для обчислення в хмарі вимагає суттєво менших витрат енергії, ніж таке саме обчислення на стаціонарному обладнанні, варіанти якого є основною частиною серверного обладнання у звичайному хмарному датацентрі. Для оцінювання застосовано публічні джерела й експеримент. Із джерел опрацьовано інформацію про продуктивність і споживання енергії поширеними моделями мобільних і стаціонарних графічних процесорів. Визначено, що мобільні графічні процесори мають суттєві переваги в енергоефективності, на відміну від стаціонарних, особливо в обчисленні з подвійною точністю. Але такий підхід не можна застосувати для обчислення кількісної оцінки переваги.

Проведено експеримент з обчислення енергоефективності на основі однієї і тієї самої синтетичної обчислювальної задачі. За результатом дослідження, мобільний графічний пристрій має також суттєву перевагу над стаціонарним за кількістю енергії за обчислювальну операцію. Це означає, що гіпотеза щодо переваг використання мобільних графічних процесорів для обчислення в хмарі, порівняно зі стаціонарним обладнанням, підтверджена й потребує подальших досліджень. Необхідно зауважити, що в статті поки йдеться про ефективність лише обчислювального складника, без урахування складника з передачі даних.

Список літератури

1. Smartphone Market Share, Naliba Popal and Ryan Reith, Aug 2022. URL: <https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/vendor>
2. Number of smartphone subscriptions worldwide from 2016 to 2021, with forecasts from 2022 to 2027, *Published by Petroc Taylor*, Jan 18, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>
3. Green500 – *The 20th Green List was published Nov 15, 2022*, Dallas, TX. URL: <https://www.top500.org/lists/green500/>
4. Hamza moh. Salem, Distributed Computing System on a Smartphones-Based Network, *In book: Software Technology: Methods and Tools* (pp. 313–325), DOI:10.1007/978-3-030-29852-4_26, Oct 2019. DOI: https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-29852-4_26
5. How World Community Grid Works, Sep 2021. URL: <https://www.worldcommunitygrid.org/about/how.s>
6. Manuel Delfino, Distributed Computing, *In book: Particle Physics Reference Library, Volume 2: Detectors for Particles and Radiation* (pp. 613–644), Sep 2020. DOI: https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6_14
7. Berkeley Open Infrastructure for Network Computing Retrospect, *published by David P. Anderson*, 2021. URL: https://continuum-hypothesis.com/boinc_history.php
8. COVID-19 – What I Can Do, 2021. URL: <https://foldingathome.org/diseases/infectious-diseases/covid-19/>
9. "From the whole team at @UWproteindesign, THANK YOU!" *posted by Rosetta@Home on Twitter, June 2021*. URL: <https://twitter.com/RosettaAtHome/status/1408533111793586178>
10. Woong Seo, Sanghun Park, Insung Ihm, Efficient Ray Tracing of Large 3D Scenes for Mobile Distributed Computing Environments, *Published online, 2022 Jan 10, Department of Computer Science and Engineering, Sogang University, Seoul 04107, Korea*. DOI: <https://www.doi.org/10.3390/s22020491>

11. Himanshu Rai, Sanjeev Kumar Ojha, Alexey Nazarov, Cloud Load Balancing Algorithm, *Conference: 2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, Dec 2020. DOI: <https://www.doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362810>
12. A. Abdelmageed Elsadek, B. Earl Wells, Heuristic Model for Task Allocation in a Heterogeneous Distributed Computing System, *Conference: Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, PDPTA 1996*, August 9–11, 1996, Sunnyvale, California, USA. URL: https://www.researchgate.net/publication/221132962_Heuristic_Model_for_Task_Allocation_in_a_Heterogeneous_Distributed_Computing_System
13. René Caspart, Sebastian Ziegler, Arvid Weyrauch, Precise Energy Consumption Measurements of Heterogeneous Artificial Intelligence Workloads, *Published online*, 2022. DOI: <https://www.doi.org/10.48550/arXiv.2212.01698>
14. Olexander Mamchych, Maksym Volk, Smartphone Based Computing Cloud and Energy Efficiency, 2022 *12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, Athens, Greece. DOI: <https://www.doi.org/10.1109/DESSERT58054.2022.10018740>
15. How Intel Technologies Boost Your CPU's Performance, Thermal Velocity Boost, 2022, available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/how-intel-technologies-boost-cpu-performance.html>
16. N.M Ho and W.F. Wong, Exploiting half precision arithmetic in Nvidia GPUs, *IEEE ICIA/S 2016, Department of Computer Science, National University of Singapore*, Singapore. DOI: <https://doi.org/10.1109/HPEC.2017.8091072>
17. Lars Gebraad, Andreas Fichtner, Seamless GPU Acceleration for C++-Based Physics with the Metal Shading Language on Apple's M Series Unified Chips, *Seismological Research Letters*, Feb 2023, USA. DOI: <https://www.doi.org/10.1785/0220220241>

References

1. Smartphone Market Share, Naliba Popal and Ryan Reith, Aug 2022. URL: <https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/vendor>
2. Number of smartphone subscriptions worldwide from 2016 to 2021, with forecasts from 2022 to 2027, *Published by Petroc Taylor*, Jan 18, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>
3. Green500 – *The 20th Green List was published Nov 15*, 2022, Dallas, TX. URL: <https://www.top500.org/lists/green500/>
4. Hamza moh. Salem, Distributed Computing System on a Smartphones-Based Network, *In book: Software Technology: Methods and Tools* (pp.313–325), DOI:10.1007/978-3-030-29852-4_26, Oct 2019. DOI: https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-29852-4_26
5. How World Community Grid Works, Sep 2021. URL: <https://www.worldcommunitygrid.org/about/how.s>
6. Manuel Delfino, Distributed Computing, *In book: Particle Physics Reference Library, Volume 2: Detectors for Particles and Radiation* (pp. 613–644), Sep 2020. DOI: https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6_14
7. Berkeley Open Infrastructure for Network Computing Retrospect, *published by David P. Anderson*, 2021. URL: https://continuum-hypothesis.com/boinc_history.php
8. COVID-19 - What I Can Do, 2021. URL: <https://foldingathome.org/diseases/infectious-diseases/covid-19/>
9. "From the whole team at @UWproteindesign, THANK YOU!" *posted by Rosetta@Home on Twitter*, June 2021. URL: <https://twitter.com/RosettaAtHome/status/1408533111793586178>
10. Woong Seo, Sanghun Park, Insung Ihm, Efficient Ray Tracing of Large 3D Scenes for Mobile Distributed Computing Environments, *Published online*, 2022 Jan 10, *Department of Computer Science and Engineering, Sogang University*, Seoul 04107, Korea. DOI: <https://www.doi.org/10.3390/s22020491>
11. Himanshu Rai, Sanjeev Kumar Ojha, Alexey Nazarov, Cloud Load Balancing Algorithm, *Conference: 2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*, Dec 2020. DOI: <https://www.doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362810>
12. A. Abdelmageed Elsadek, B. Earl Wells, Heuristic Model for Task Allocation in a Heterogeneous Distributed Computing System, *Conference: Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, PDPTA 1996, August 9–11, 1996*, Sunnyvale, California, USA. URL: https://www.researchgate.net/publication/221132962_Heuristic_Model_for_Task_Allocation_in_a_Heterogeneous_Distributed_Computing_System
13. René Caspart, Sebastian Ziegler, Arvid Weyrauch, Precise Energy Consumption Measurements of Heterogeneous Artificial Intelligence Workloads, *Published online*, 2022. DOI: <https://www.doi.org/10.48550/arXiv.2212.01698>
14. Olexander Mamchych, Maksym Volk, Smartphone Based Computing Cloud and Energy Efficiency, 2022 *12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, Athens, Greece. DOI: <https://www.doi.org/10.1109/DESSERT58054.2022.10018740>
15. How Intel Technologies Boost Your CPU's Performance, Thermal Velocity Boost, 2022, available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/how-intel-technologies-boost-cpu-performance.html>

16. N. M Ho and W. F. Wong, Exploiting half precision arithmetic in Nvidia GPUs, *IEEE ICIAFS 2016, Department of Computer Science, National University of Singapore*, Singapore. DOI: <https://doi.org/10.1109/HPEC.2017.8091072>
17. Lars Gebraad, Andreas Fichtner, Seamless GPU Acceleration for C++-Based Physics with the Metal Shading Language on Apple's M Series Unified Chips, *Seismological Research Letters*, Feb 2023, USA. DOI: <https://www.doi.org/10.1785/0220220241>

Received 26.03.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Мамчич Олександр Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: oleksandr.mamchych@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0001-6602-2929>

Волк Максим Олександрович – доктор технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; e-mail: maksym.volk@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4229-9904>

Mamchych Oleksand – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student of the Department of Computing Machines, Kharkiv, Ukraine.

Volk Maksym – Doctor of Technical Sciences, Phd (Computer engineering), Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor at Department of Computing Machines, Kharkiv, Ukraine.

ESTIMATION OF POWER CONSUMPTION OF MOBILE DEVICES IN CLOUD COMPUTING

Modern computing tasks require an increase in computing power. This necessitates the creation and production of new equipment for cloud computing. At the same time, the number of personal mobile devices is already measured in billions, and even their partial use could reduce production requirements. In addition, mobile hardware is more energy efficient, which contributes to significant energy savings. The article investigates the issue of qualitative and quantitative assessment of the efficiency of using mobile devices for computing compared to traditional stationary solutions. **The purpose of the work** is to substantiate the following hypothesis: computing in the cloud based on mobile devices significantly reduces energy consumption than computing on stationary equipment. For this purpose, we show that computing on a mobile GPU is more energy efficient than computing on a stationary processor. Public sources and benchmarks were analyzed to determine the qualitative advantage. On the basis of the studied data, efficiency indicators for various mobile and desktop GPUs are calculated. It is argued that in most cases, mobile solutions consume significantly less energy compared to desktop solutions. To calculate the quantitative advantage, an experiment was conducted on the basis of two platforms: mobile and desktop. The same computational task was implemented using Apple Metal and NVIDIA CUDA. Based on this task, the energy efficiency indicators of the mobile and stationary graphic processor were calculated. According to the results of the study, a significant advantage of the mobile GPU in terms of energy efficiency has been determined. This result is relevant because the platforms were released in the same year with a difference of several months, so they can be considered peers of each other. The approaches presented here do not take into account the consumption of all other parts of the system, except for the GPUs. This means that the consumption of the motherboard, power supply, etc. can tilt the balance in favor of the mobile processor even more. But for distributed computing, the network connection is very important, and it can consume a significant amount of power on a mobile device. Further research will focus on a more comprehensive accounting of the energy consumption of various computer subsystems.

Keywords: computing cloud; smartphone cloud; energy efficiency; cloud computing; CUDA; Metal; hardware acceleration.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мамчич О. О., Волк М. О. Оцінювання енергетичних витрат у процесі використання мобільних пристроїв для хмарних обчислень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.072>

Mamchych, O., Volk, M. (2023), "Estimation of power consumption of mobile devices in cloud computing", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 72–82. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.072>

УДК 628.1, 519.85.

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.083>

О. МАТВИЄНКО, П. СПИЧАК

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВОДОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ СПОСОБОМ ЇЇ ЗОНУВАННЯ

Метою є використання стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи водопровідної мережі для зниження надлишкових напорів шляхом встановлення регуляторів тиску на входах у виділені зони. **Предметом** дослідження є оптимізація структури водопровідної мережі шляхом зонування. У статті **задача** оптимального зонування водопровідних мереж вирішується з допомогою двох задач: виділення у водопровідній мережі відокремлених зон вузлів із надлишковими напорами, що перевищують задане значення; розрахунок параметрів регуляторів тиску, що встановлюються на входи у виділені зони. Для виділення зон запропонований **метод**, що ґрунтується на способі пошуку в ширину. Для розрахунку параметрів регуляторів тиску розв'язується задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску. Детермінований еквівалент цієї задачі розв'язується з використанням методів Ньютона та Нелдера – Міда. Завдяки розв'язанню цієї задачі отримуємо мінімальні необхідні значення напорів, що стабілізуються на виходах регуляторів, і максимальні допустимі значення витрат через них. Для визначення мінімального й максимального значень діапазонів зміни витрат і напорів на входах та виходах регулятора прогнозується максимальне й мінімальне водоспоживання всіма категоріями споживачів у виділеній зоні та розв'язується задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску. Унаслідок отримуємо діапазон зміни оптимальних значень витрат через регулятор і значень напорів, що стабілізуються, на виході регулятора. На підставі цієї інформації визначається тип регуляторів, що забезпечує необхідні діапазони зміни напорів на входах і виходах регуляторів для мінімальних та максимальних прогнозованих витрат через регулятор, та мінімальний допустимий напір на його вході. Здобуто такі **результати**: розрахунки показують, що завдяки зонуванню й установленню регуляторів тиску на входах в ізольовані зони водопровідної мережі розглянутої структури можливо знизити математичне сподівання сумарного надлишкового напору в мережі на 21%. **Висновки**: запропоновано математичну модель задачі оптимального зонування водопровідної мережі, що ґрунтується на стохастичній моделі квазістаціонарних режимів її роботи, та метод розв'язання цієї задачі. Обчислювальний експеримент, що проводився для водопровідної мережі заданої структури, показав, що внаслідок установлення регуляторів тиску на входах у виділені зони можливо підвищити ефективність її роботи.

Ключові слова: зонування; водопровідна мережа; стохастична модель; регулятор тиску; надлишковий напір.

Вступ

Розподіл водопровідної мережі (ВМ) на зони застосовується для проектування водопровідних мереж із значною різницею геодезичних позначок ділянок водопроводу, у різноповерхових забудовах районів міст, тобто коли є значна різниця між вільними напорами води, яких потребують різні користувачі. Реалізація зонування відбувається або за допомогою підключення в систему водопостачання додаткових насосних станцій, що працюють на виділені зони, або шляхом проведення додаткових магістральних трубопроводів, або завдяки встановленню резервуарів чистої води. Але ці заходи потребують значних матеріальних витрат. Є більш бюджетний підхід до зонування ВМ, що пов'язаний із використанням регуляторів тиску великих діаметрів, що мають дистанційне керування. Застосування регуляторів тиску дає змогу істотно зменшити витрати на зонування ВМ, знизити

надлишковий напір у вузлах ВМ і, відповідно, втрати води у вигляді витоків, а також заощадити витрати електроенергії на насосних станціях.

Аналіз наявних публікацій

Проблемам зонування ВМ присвячено багато наукових праць.

У роботі [1] розглядається метод зниження сумарних надлишкових тисків у мережах водопостачання способом їх зонування. Метод ґрунтується на стохастичній моделі квазістаціонарних режимів у системі подачі та розподілу води та передбачає встановлення регуляторів тиску й станцій підкачування.

Питанням розподілу ВМ на зони присвячені праці [2, 3, 4]. Тут розглядаються різні методи кластеризації графів для виділення зон.

Метод декомпозиції ВМ, що перетворює складну ВМ із великою кількістю компонентів

на просту з набором взаємопов'язаних модулів, досліджується в роботі [5]. Кількісний вимір і графічна візуалізація взаємозалежностей модулів ВМ допомагає зрозуміти вплив модулів один на одній.

У праці [6] пропонується багатоетапний підхід до декомпозиції та оптимізації ВМ із кількома джерелами подачі води.

Зонування ВМ для покращення обліку витрат води шляхом установа лічильників в окремих зонах досліджується в роботі [7]. Її автори пропонують застосовувати метод зонування ВМ на основі стохастичної моделі квазістаціонарних режимів у системі подачі та розподілу води.

Змістовне визначення завдання зонування ВМ: ті вузли ВМ, в яких надлишкові напори значно перевищують задане порогове значення, треба згрупувати в пов'язані ділянки (зони) і передбачити встановлення регуляторів тиску на входах у зони, а також оцінити параметри кожного регулятора.

Якщо розглядати ВМ з одним джерелом подачі води, то задача зонування ВМ передбачає розв'язання двох взаємопов'язаних задач:

- виділення зон ВМ;
- визначення параметрів регуляторів тиску, що встановлюються на входах виділених зон ВМ.

Математична постановка задачі оптимального зонування водопровідних мереж

Вихідними даними для задачі зонування є: вся нормативно-довідкова інформація про структуру й параметри ВМ, а саме: технологічні схеми, довжини та діаметри ділянок трубопроводів, тип і характеристики насосних агрегатів, регульованих та відсічних засувок тощо; статистичні дані про фактичні режими роботи ВМ на значних інтервалах часу; оперативна інформація – мінімальні допустимі значення напорів у всіх вузлах ВМ,

прогнозовані значення добових обсягів водоспоживання в кожному вузлі ВМ, що обчислюються в нульовий момент часу з упередженням 365 днів та їх дисперсії.

Вважатимемо, що обчислені значення прогнозів мають нормальний розподіл $q_{i0}(\omega, l) \sim N(q_{i0}(l), \sigma_{q_{i0}}^2(l))$, $l = 1, 2, \dots, 365$. Постановку та розв'язання задачі зонування здійснюватимемо з використанням стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ [7] і максимального водоспоживання, тобто для $q_{i0}(k)$: $q_{i0}(k) = \max_l q_{i0}(l)$, $l = 1, 2, \dots, 365$.

До того ж значення максимального водоспоживання $q_i^+(k)$ в i -му вузлі визначатимемо з умови:

$$q_i^+(k): P(0 \leq q_{i0}(k) \leq q_i^+(k)) = 0,997. \quad (1)$$

Для подання структури ВМ у вигляді графа $G(V, E)$, де V – множина вершин, E – множина дуг ($e = \text{Card}(E)$, $v = \text{Card}(V)$), до реальної мережі додається нульова вершина й фіктивні хорди, що поєднують нульову вершину з усіма входами та виходами ВМ. Для побудови стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ зробимо таке кодування мережі: дерево графа виберемо таким чином, щоб фіктивні ділянки мережі стали хордами. У цьому разі реальні ділянки частково стануть хордами, а частково – гілками дерева. Гілки дерева з насосом присвоюємо номер 1, решті гілок – від 2 до $v-1$; хордам реальних ділянок – від v до $v + \eta_2 - 1$, де η_2 – кількість хорд реальних ділянок; фіктивним із заданими вузловими витратами – від $v + \eta_2$ до $v + \eta_2 + \xi_1 - 1$, де ξ_1 – кількість виходів із заданими вузловими витратами; хордам з іншими входами – від $v + \eta_2 + \xi_1$ до e .

Тоді стохастична модель квазістаціонарних режимів роботи ВМ матиме вигляд:

$$M_{\omega} \left(\text{sgn } q_r(\omega) S_r(q_r(\omega)) q_r^2(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} \text{sgn } q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) \right) = 0, (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1); \quad (2)$$

$$M_{\omega} \left(h_r^c(\omega) - h_{NS1}(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} \left(\text{sgn } q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) + h_i^g \right) \right) = 0, (r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1); \quad (3)$$

$$M_{\omega} \left(\text{sgn } q_r(\omega) S_r(q_r(\omega)) q_r^2(\omega) + h_r^g - h_{NSn}(\omega) + h_{NS1}(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} \left(\text{sgn } q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) + h_i^g \right) \right) = 0, \quad (4)$$

$$(r = v + \eta_2 + \xi_1, \dots, e; \quad n = 1, \dots, N);$$

$$M(q_i(\omega)) = M\left(\sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1ri} q_r(\omega) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1ri} q_r(\omega)\right), \quad (i=1, \dots, v-1); \quad (5)$$

$$P(h_i^c(\omega) \geq h_i^+) \geq \alpha, \quad (\alpha \cong 1), \quad (i = v + \eta_2, \dots, e). \quad (6)$$

Випадкові величини характеризують: $q_i(\omega)$ – витрати води на i -й ділянці трубопроводу; $h_{NS1}(\omega)$ – напір на виході першої насосної станції; $h_i^c(\omega)$ – вільний напір в r -му вузлі ($r = v + \eta_2, \dots, v + \eta_2 + \xi_1 - 1$); h_i^+ – мінімальний допустимий напір в i -му вузлі; $S_i(q_i(\omega))$ – оцінка гідравлічного опору i -ї ділянки трубопроводу; h_i^g – геодезична позначка i -ї ділянки трубопроводу; b_{1ri} – елемент цикломатичної матриці; N – кількість насосних станцій.

Для розв'язання системи рівнянь (2)–(6) до неї додаються граничні умови вигляду:

$$q_r(\omega) \sim N(\bar{q}_r, \sigma_{q_r}^2), \quad r = (v + \eta_2, \dots, e). \quad (7)$$

У цьому разі задачу зонування ВМ подамо у вигляді:

$$M \sum_{i=1}^{v-1} (h_i^c(\omega) - h_i^+)^2 \rightarrow \min_{G_i \in G}, \quad (8)$$

де G_i – підграф (i -а зона) графа G ВМ. Ділянка допустимих розв'язків Ω є системою рівнянь (2)–(6) стохастичної моделі квазістаціонарних режимів роботи ВМ.

Для розв'язання системи рівнянь (2)–(6) задамо граничні умови (7) у вигляді $q_i^+(k)$, ($i=1, \dots, v$), k – період часу.

Задача (8) за умови обмежень (2)–(6) та умов (7) належить до класу одноетапних задач нелінійного стохастичного програмування.

Побудова детермінованого еквівалента задачі (2)–(8) відбувається шляхом заміни випадкових величин їх математичними сподіваннями.

Метод розв'язання задачі оптимального зонування водопровідних мереж

Розв'язання детермінованого еквівалента задачі (2)–(8) відбувається за кілька кроків [8–10].

1. Виділення зон. У процесі зонування ВМ будемо виділяти ізольовані зони ВМ, що в загальному випадку мають не менше ніж два входи (для забезпечення заданого рівня надійності та живучості ВМ). Розглянемо всі вузли ВМ, в яких надлишковий напір перевищує порогове значення

та які утворюють множину P ($card(P) = p$). Вузли, що виділяються в одну зону, мають задовольняти такі умови:

а) математичне сподівання надлишкового напору в кожному i -му вузлі виділеної зони має перевищувати деяке задане порогове значення:

$$\bar{h}_{izbi} = \bar{h}_i^c - h_i^+ \geq Porog, \quad i \in P_k \quad (k=1, \dots, p), \quad (9)$$

де \bar{h}_{izbi} – математичне сподівання надлишкового напору в i -му вузлі на заданому інтервалі управління; \bar{h}_i^c – математичне сподівання вільного напору в i -му вузлі на заданому інтервалі управління; h_i^+ – мінімальний допустимий напір в i -му вузлі; $Porog$ – математичне сподівання допустимого порогового значення надлишкового напору;

б) усі вузли виділеної зони мають складати одну зв'язану компоненту.

Нехай множина P складається з k зв'язаних компонент (зон):

$$P = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_k, \quad P_i \cap P_j = \emptyset \quad (\forall i \neq j). \quad (10)$$

Нехай $M_{p \times p}$ – матриця суміжності для всіх вузлів із множини P . Для \forall вузла $i \in P_n$ ($n=1, \dots, k$) \exists хоча б один вузол $j \in P_n$, для якого $m_{ij} = 1$.

2. Визначення параметрів регуляторів тиску зони P_k . Кожен регулятор тиску характеризується таким набором параметрів: діапазонами зміни напору на вході й виході регулятора, діапазонами зміни витрат через регулятор. Для визначення параметрів регуляторів тиску необхідно визначити діапазони зміни математичного сподівання та дисперсій напорів і витрат на виході регулятора для всього інтервалу управління.

Для визначення параметрів регуляторів тиску для кожної виділеної зони P_n виділяється підграф $G_k(V_k, E_k)$ ВМ (де $V_k: v_k \in P_n$; $E_k = E_{1k} \cup E_{2k}$, E_{1k}, E_{2k} – множина реальних дуг, що відповідають входам у зону P_n , і множина фіктивних дуг, що відповідають виходам із зони P_n), і розв'язується задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску E_{1k} , установленими на входах у зону P_n , тобто задача (8) з обмеженнями (2)–(6) для підграфа $G_k(V_k, E_k)$. Детермінований

еквівалент цієї задачі розв'язується з використанням методів Ньютона та Нелдера – Міда.

Унаслідок розв'язання цієї задачі маємо мінімальні необхідні значення напорів, що стабілізуються на виходах регуляторів і максимальні допустимі значення витрат через них. Для визначення мінімального й максимального значень діапазонів зміни витрат і напорів на входах і виходах регулятора прогнозується максимальне й мінімальне водоспоживання всіма категоріями споживачів у виділеній зоні та розв'язується задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску. Унаслідок отримуємо діапазон зміни оптимальних значень витрат через регулятор і значень напорів, що стабілізуються на виході регулятора. На підставі цієї інформації визначається тип регуляторів, що забезпечує необхідні діапазони зміни напорів на входах і виходах регуляторів для мінімальних і максимальних прогнозованих витрат через

регулятор, та мінімальний допустимий напір на його вході $h_{\min Ri}$.

Кінцям дуг E_{lk} із встановленими регуляторами тиску привласнюються нові номери вузлів ВМ, для яких за мінімальні допустимі напори h_l^+ ($l \in E_{lk}$) приймаються значення мінімального допустимого напору на вході регулятора $h_i = h_{\min Ri}$. За математичне сподівання витрат у цих вузлах приймається максимальне значення витрат на виході регулятора $q_i = q_{\max Ri}$, а за оцінку дисперсії витрат – сума дисперсій витрат у вузлах зони P_{kj} : $\sigma_{q_i}^2 = \sum_{r \in P_k} \sigma_{q_r}^2$.

Усі інші вузли виділеної зони вилучаються з графа ВМ [11–15].

Для формалізації умови (п. 1, б) виділення зон наведемо алгоритм виділення зв'язаних компонент (зон) з використанням методу пошуку в ширину (рис. 1).

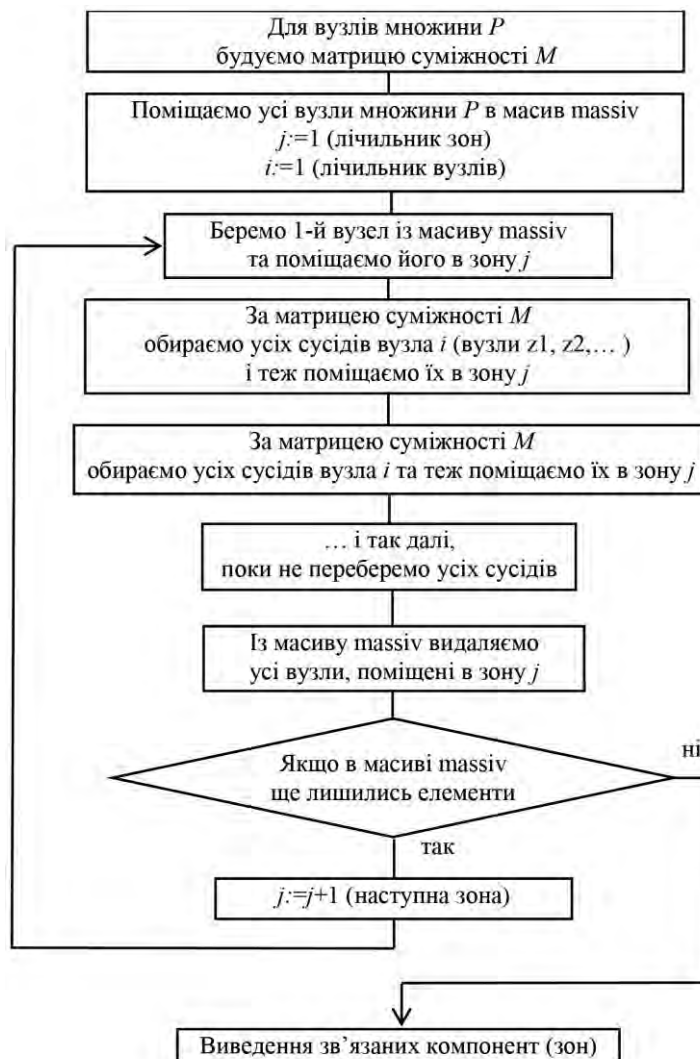


Рис. 1. Алгоритм виділення зв'язаних компонент (зон)

Результати досліджень

Вихідні дані

Розглянемо ділянку водопровідної мережі, що складається із джерела води, насоса, 28 вузлів та 36 ділянок трубопроводу (рис. 2).

Вихідні дані наведені в табл. 1.

Параметри насоса. Робоча точка насосного агрегата: $h_{NA}=60$ (м), $q_{NA}=150$ (м³/год). Напірна характеристика насосного агрегата Н-Q наведена на рис. 3.

Моделювання здійснюється протягом 24 год для чотирьох режимів, по 6 год кожен (рис. 4).

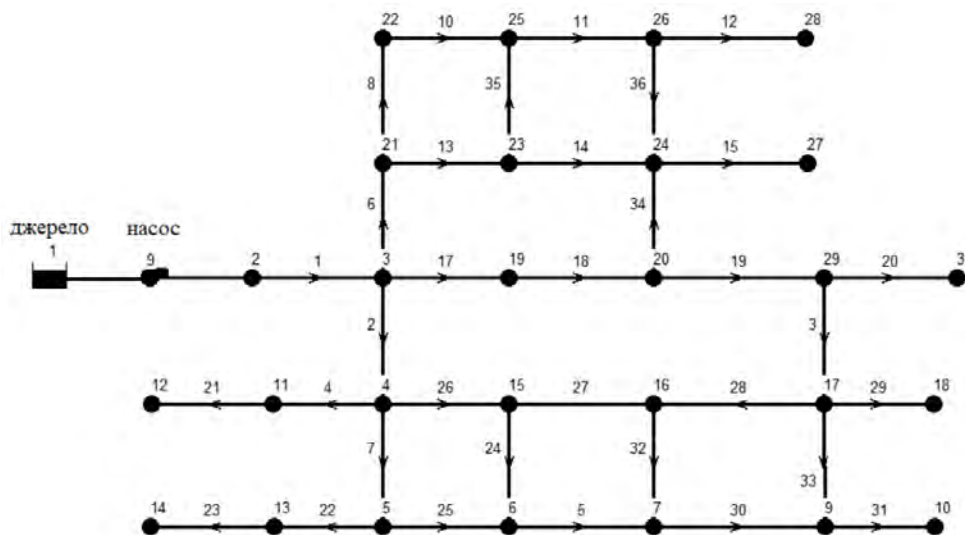


Рис. 2. Схема водопровідної мережі

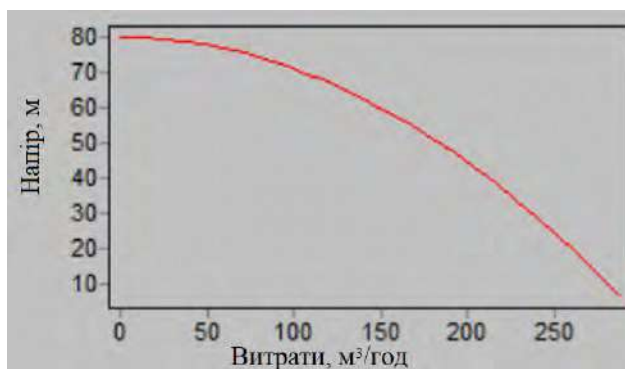


Рис. 3. H-Q характеристика насосного агрегата

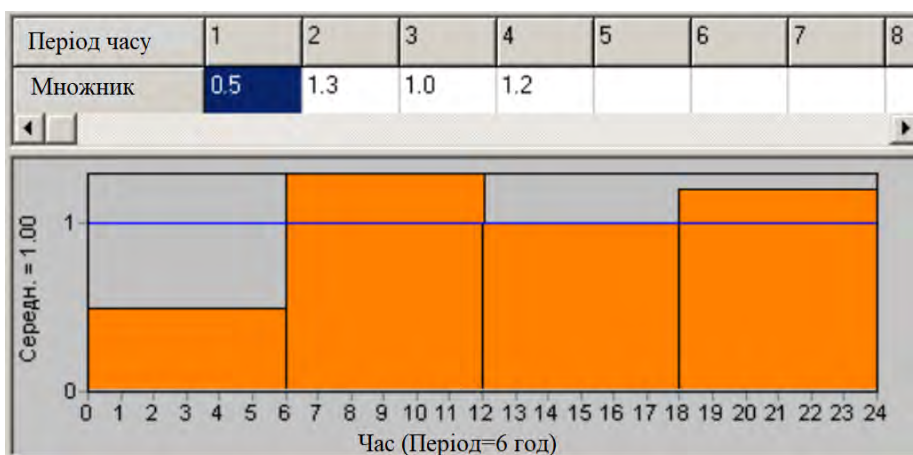


Рис. 4. Режими водоспоживання

Таблиця 1. Параметри вузлів і ділянок трубопроводу

Вузол	Висотна позначка, м	Витрати q , м ³ /год	Трубопровід	Довжина, л, м	Діаметр, d, мм
2	200	0	1	900	350
3	205	4	7	1500	150
4	200	3	5	740	250
5	198	2	6	1000	250
6	200	5	8	800	250
7	175	8	10	570	250
9	164	7	11	600	250
10	162	6	12	700	130
11	212	5	13	200	250
12	210	3	14	460	130
13	189	3	15	1000	130
14	194	1	17	600	250
15	190	4	18	500	250
16	170	4	19	1000	250
17	167	4	20	1500	200
18	168	4	25	466	150
19	190	7	26	300	150
20	187	8	27	500	150
21	176	6	28	48	150
22	170	7	29	600	200
23	170	10	30	500	250
24	160	8	31	105	200
25	172	5	2	760	250
26	171	6	3	680	200
27	165	5	4	500	200
28	173	5	21	800	150
29	200	8	22	560	150
30	210	3	23	450	130
-	-	-	24	1000	150
-	-	-	32	450	150
-	-	-	33	764	150
-	-	-	34	653	130
-	-	-	35	100	130
-	-	-	36	100	130

Множники використовуються для зміни вузлових витрат для кожного інтервалу часу.

На рис. 5 показані вузлові витрати (м³/год) для періоду 12–18 год.

Вузлові витрати для кожного періоду помножуються на множники, наведені в табл. 2.

На рис. 6 поданий динамічний графік зміни водоспоживання для деяких вузлів.

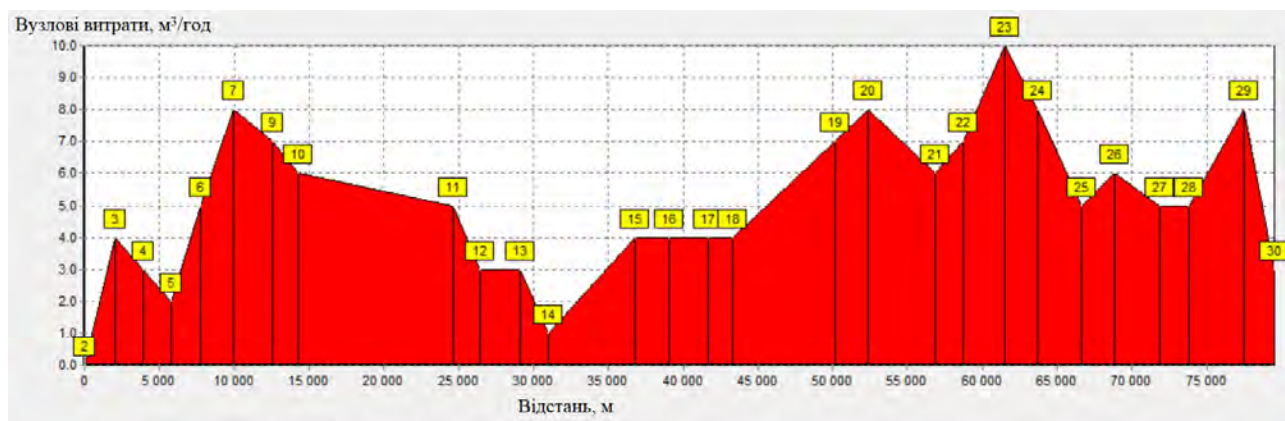


Рис. 5. Профіль вузлових витрат для періоду 12–18 год

Таблиця 2. Коефіцієнти для обчислення вузлових витрат

Період часу	0–6 год	6–12 год	12–18 год	18–24 год
Коефіцієнт	0,5	1,3	1	1,2

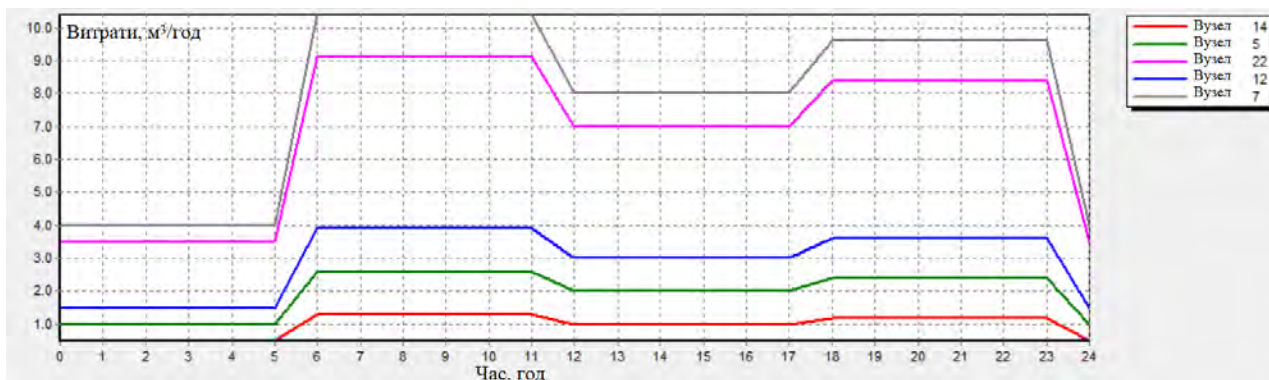


Рис. 6. Динамічні витрати для вузлів 14, 5, 22, 12, 7 для чотирьох періодів водопостачання

Аналіз наявного режиму роботи водопровідної мережі

Для кожного інтервалу часу розв'язується детермінований еквівалент задачі (2)–(8).

На рис. 7 наведені розраховані значення математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу та кожним споживачем для періоду часу (0–6).

Знаючи мінімальні допустимі напори в кожному вузлі (задані) та розраховані напори, обчислюємо надлишкові напори у вузлах (табл. 3).

Проаналізувавши результати розрахунків, виділимо дві зони вузлів, в яких надлишковий напір більше, ніж надлишковий напір в інших вузлах мережі. До першої зони належать вузли 7, 9, 10, 16, 17, 18 (виділені в табл. 3). До другої – вузли 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 (виділені в табл. 3). Мета – виділити відокремлені зони вузлів, в яких надлишковий напір перевищує задану величину, для того, щоб установити регулятори тиску на входах у ці зони. Такі заходи дозволять знизити надлишковий напір у мережі, який призводить до аварій трубопроводів та витоків.

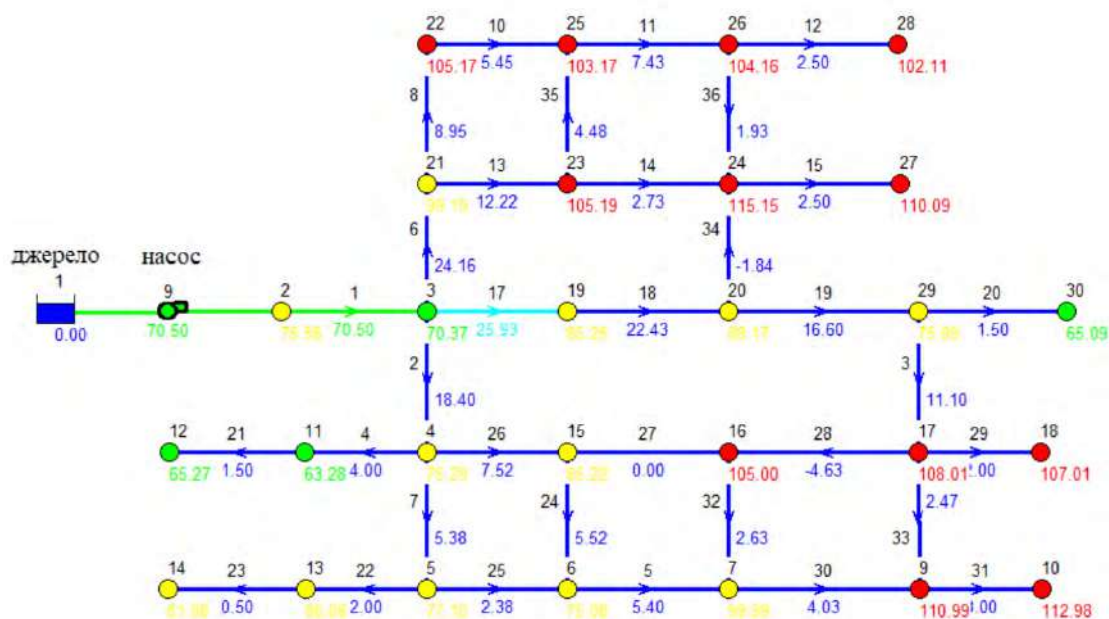


Рис. 7. Математичні сподівання витрат води по кожній ділянці трубопроводу та напорів у кожному вузлі для періоду часу (0–6)

Таблиця 3. Надлишкові напори для вузлів водопровідної мережі для чотирьох періодів часу

вузол	h^+	мін. 0–6 год		макс. 6–12 год		сер1 12–18 год		сер2 18–24 год	
		h^c	h_{izb}	h^c	h_{izb}	h^c	h_{izb}	h^c	h_{izb}
2	50	75,58	25,58	50,13	0,13	62,33	12,33	54,55	4,55
3	43	70,37	27,37	43,86	0,86	56,55	13,55	48,46	5,46
4	45	75,29	30,29	48,4	3,4	61,26	16,26	53,06	8,06
5	45	77,1	32,1	49,25	4,25	62,57	17,57	54,09	9,09
6	45	75,08	30,08	47,21	2,21	60,53	15,53	52,03	7,03
7	65	99,99	34,99	71,65	6,65	85,18	20,18	76,55	11,55
9	70	110,99	40,99	82,63	12,63	96,17	26,17	87,53	17,53
10	70	112,98	42,98	84,62	14,62	98,17	28,17	89,53	19,53
11	35	63,28	28,28	36,35	1,35	49,23	14,23	41,01	6,01
12	35	65,27	30,27	38,29	3,29	51,2	16,2	42,97	7,97
13	50	86,05	36,05	58,22	8,22	71,53	21,53	63,04	13,04
14	50	81,08	31,08	53,21	3,21	66,53	16,53	58,03	8,03
15	50	85,22	35,22	57,99	7,99	71,01	21,01	62,7	12,7
16	70	105	35	76,74	6,74	90,24	20,24	81,62	11,62
17	70	108,01	38,01	79,78	9,78	93,26	23,26	84,65	14,65
18	70	107,01	37,01	78,75	8,75	92,24	22,24	83,63	13,63
19	50	85,25	35,25	58,18	8,18	71,12	21,12	62,87	12,87
20	50	88,17	38,17	60,74	10,74	73,86	23,86	65,49	15,49
21	65	99,19	34,19	71,86	6,86	84,93	19,93	76,59	11,59
22	70	105,17	35,17	77,73	7,73	90,85	20,85	82,48	12,48
23	70	105,19	35,19	77,81	7,81	90,8	20,8	82,54	12,54
24	70	115,15	45,15	87,61	17,61	100,77	30,77	92,37	22,37
25	70	103,17	33,17	75,7	5,7	88,83	18,83	80,45	10,45
26	70	104,16	34,16	76,62	6,62	89,79	19,79	81,39	11,39
27	70	110,09	40,09	82,25	12,25	95,55	25,55	87,08	17,08
28	70	102,11	32,11	74,38	4,38	87,63	17,63	79,17	9,17
29	45	75,09	30,09	47,24	2,24	60,55	15,55	52,06	7,06
30	37,22	65,09	27,87	37,22	0	50,53	13,31	42,04	4,82

Отже, це задача збереження ресурсів. Виділена зона має задовольняти вимоги:

1. Необхідно, щоб усі вузли були пов'язані між собою.
2. В усіх вузлах зони надлишковий напір має бути більший від заданого значення.
3. Необхідно, щоб зона мала не більше ніж два входи / виходи.

На рис. 8 наведено виділені зони.

На рис. 9 вказано висотні позначки всіх вузлів. Звідси видно, що вузли виділених зон розташовані в низинах. Із цієї причини там і виникає надлишковий напір.

У табл. 4 наведені суми квадратів надлишкових напорів по всій водопровідній мережі та по двох виділених зонах.

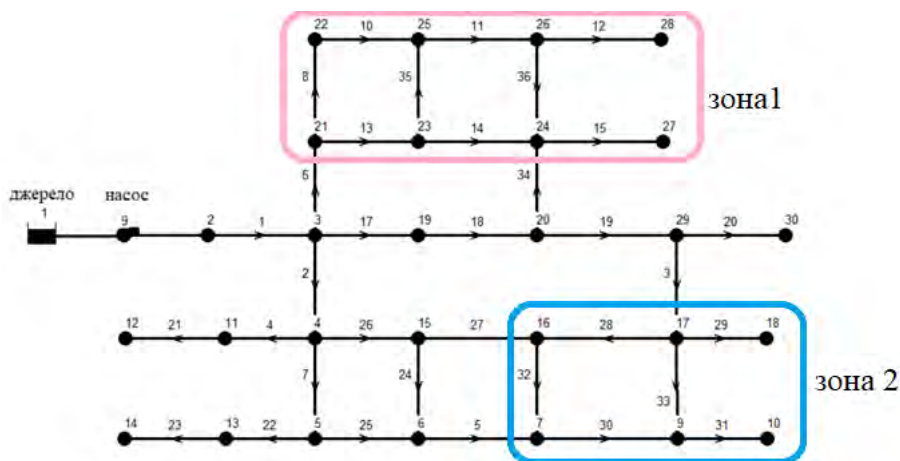


Рис. 8. Виділені зони

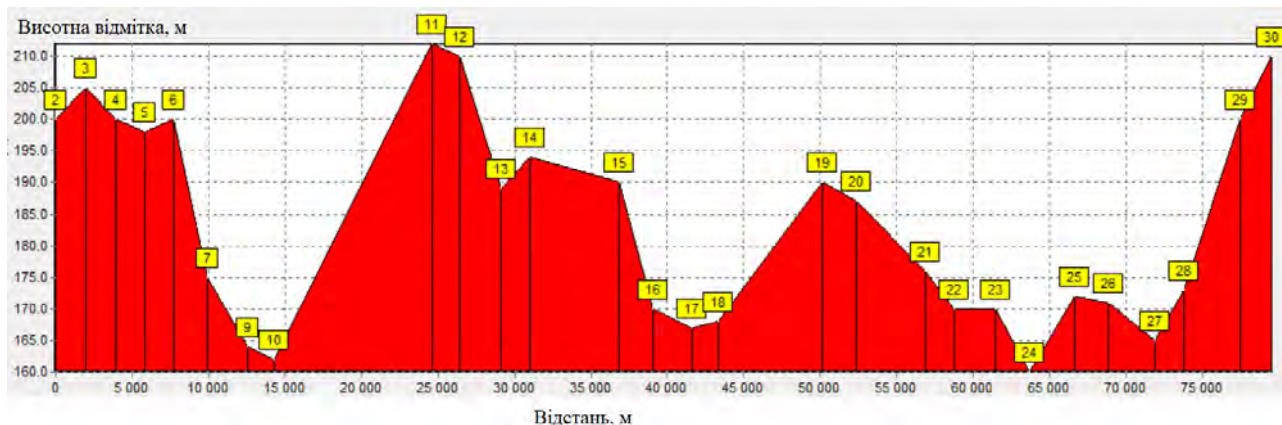


Рис. 9. Діаграма профелів (жовті – номери вузлів)

Таблиця 4. Суми квадратів надлишкових напорів $f(m^2)$ по всій водопровідній мережі та по двох виділених зонах

Період часу	0–6 год	6–12 год	12–18 год	18–24 год	Сума
мережа	33239	1735,5	11479	4141,7	50596
зона 1	8791,3	635,12	3331	1357,5	14115
зона 2	10588	723,48	3921,2	1562,5	16795

Оптимізація шляхом зонування та встановлення регуляторів тиску

Для того, щоб знизити надлишковий напір у виділених зонах, встановимо регулятори тиску на входах у зони, а саме на ділянках трубопроводу 6 для першої зони та 5 для другої. З огляду на структуру мережі, а також на те, що цю систему забезпечує водою одна насосна станція (насос), виходячи із зон можна перекрити засувкою (дуги 34 та 3). Розрахунки будемо проводити для режиму максимального водопостачання.

Розв'язавши задачі зонування ВМ (8) за умови обмежень (2)–(6) та умови (7) для виділених зон, отримаємо параметри регуляторів напору, що необхідно встановити на входах у зони.

У вузлах зони 1 для періоду максимального водопостачання мінімальний надлишковий напір становить 6,65 м, зони 2 – 4,38 м. На вхід зони 1 встановлюємо регулятор тиску "після себе" $h_1=44,3$ м. Установивши на входах в цю зону регулятор тиску та знизивши напір води на вході в зону 1, отримаємо такі результати (табл. 5).

Таблиця 5. Величини надлишкового напору у вузлах зони 1 для різних періодів водопостачання, м

вузол	h^+	h^c 0–6 год	h^c 6–12 год	h^c 12–18 год	h^c 18–24 год	h_{izb} 0–6 год	h_{izb} 6–12 год	h_{izb} 12–18 год	h_{izb} 18–24 год
7	65	81,27	65,19	72,89	67,98	16,27	0,19	7,89	2,98
9	70	92,26	76,11	83,85	78,91	22,26	6,11	13,85	8,91
10	70	94,26	78,1	85,84	80,91	24,26	8,1	15,84	10,91
16	70	86,24	70,01	77,78	72,83	16,24	0,01	7,78	2,83
17	70	89,24	73	80,78	75,82	19,24	3	10,78	5,82
18	70	88,24	71,99	79,77	74,81	18,24	1,99	9,77	4,81

На рис. 10 наведені оцінки математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу та напорів у кожному вузлі зони 1 для різних періодів часу.

На вхід зони 2 встановлюємо регулятор тиску "після себе" $h_2=56,57$ м. Установивши на входах у цю зону регулятор тиску й знизивши напір води на вході в зону 2, отримаємо такі результати (табл. 6).

На рис. 11 наведено оцінки математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу й напорів у кожному вузлі зони 1 для різних періодів часу.

Результати зонування подані в табл. 7.

На рис. 12 можна побачити, що внаслідок встановлення регуляторів тиску на входах в зони сума квадратів надлишкових напорів значно знизилась.

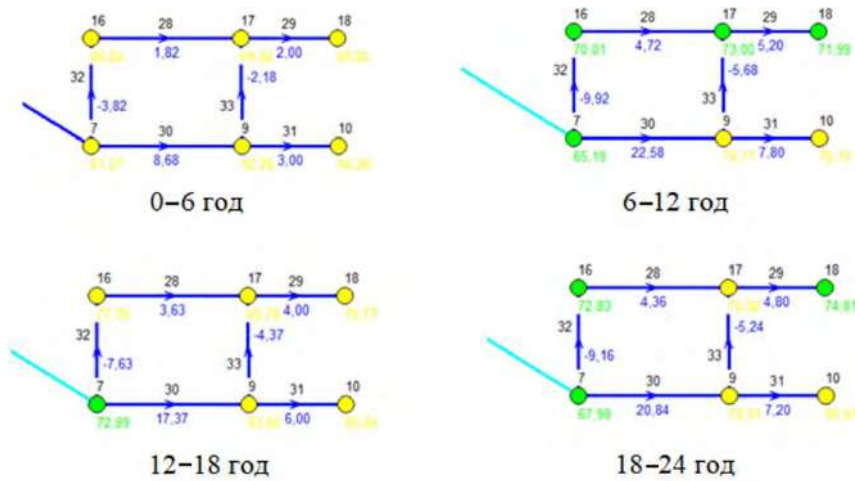


Рис. 10. Оцінки математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу й напорів у кожному вузлі зони 1 для різних періодів часу

Таблиця 6. Величини надлишкового напору у вузлах зони 2 для різних періодів водопостачання, м

вузол	h^+	h^c 0–6 год	h^c 6–12 год	h^c 12–18 год	h^c 18–24 год	h_{izb} 0–6 год	h_{izb} 6–12 год	h_{izb} 12–18 год	h_{izb} 18–24 год
21	65	94,71	67,55	80,56	72,26	29,71	2,55	15,56	7,26
22	70	100,69	73,4	86,47	78,13	30,69	3,4	16,47	8,13
23	70	100,7	73,48	86,52	78,21	30,7	3,48	16,52	8,21
24	70	110,65	83,2	96,35	87,97	40,65	13,2	26,35	17,97
25	70	98,68	71,35	84,44	76,09	28,68	1,35	14,44	6,09
26	70	99,66	72,26	85,39	77,02	29,66	2,26	15,39	7,02
27	70	105,59	77,84	91,13	82,65	35,59	7,84	21,13	12,65
28	70	97,62	70,01	83,23	74,8	27,62	0,01	13,23	4,8

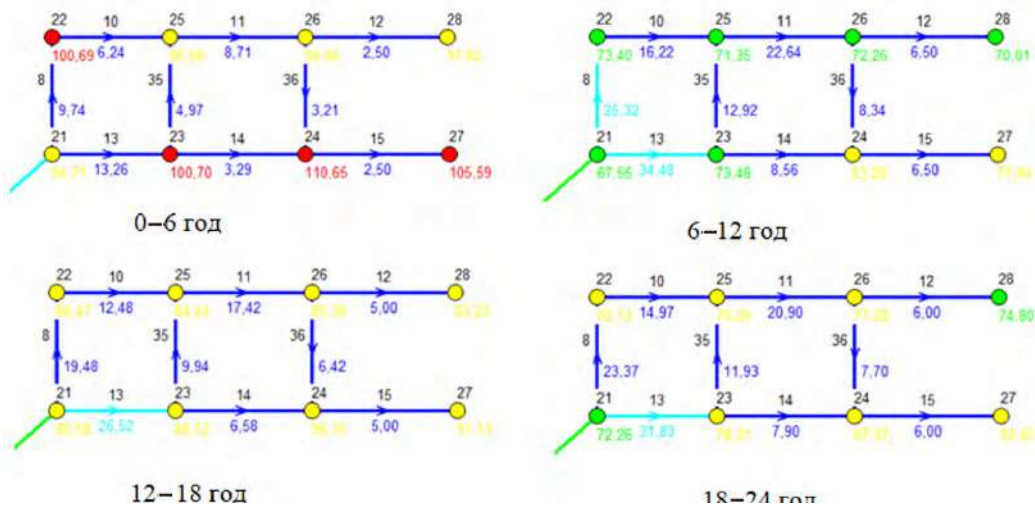


Рис. 11. Оцінки математичних сподівань витрат води по кожній ділянці трубопроводу й напорів у кожному вузлі зони 2 для різних періодів часу

Таблиця 7. Суми квадратів надлишкових напорів $f(m^2)$ по всій водопровідній мережі та по двох виділених зонах

Період часу	0–6 год	6–12 год	12–18 год	18–24 год	Сума
мережа	24327	765,65	7552,1	2272,5	34917
зона 1	2315,4	115,94	777,17	272,31	3480,8
зона 2	8151,2	272,81	2547,5	778,56	11750

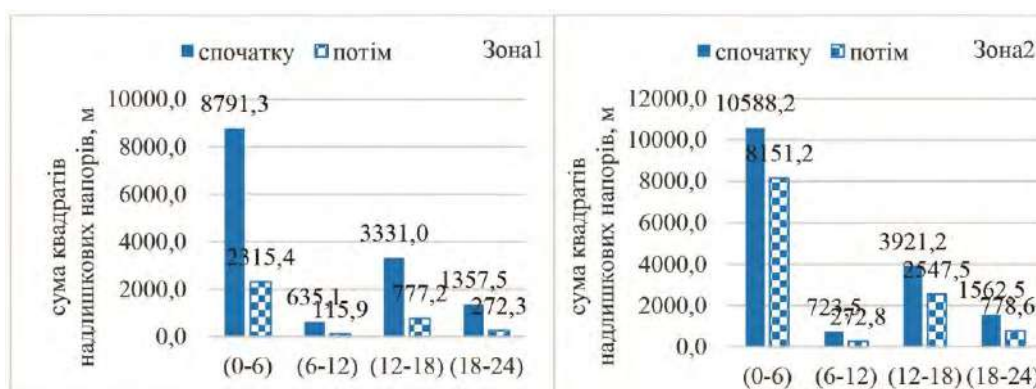


Рис. 12. Сума квадратів надлишкових напорів по зонах до зонування та після

На рис. 13 зображена сума квадратів надлишкових напорів та сума надлишкових напорів у мережі до зонування та після.

Здобуті результати підтверджують, що, завдяки зонуванню та встановленню регуляторів напору на входах в ізольовані зони, можна підвищити ефективність роботи водопровідної мережі.

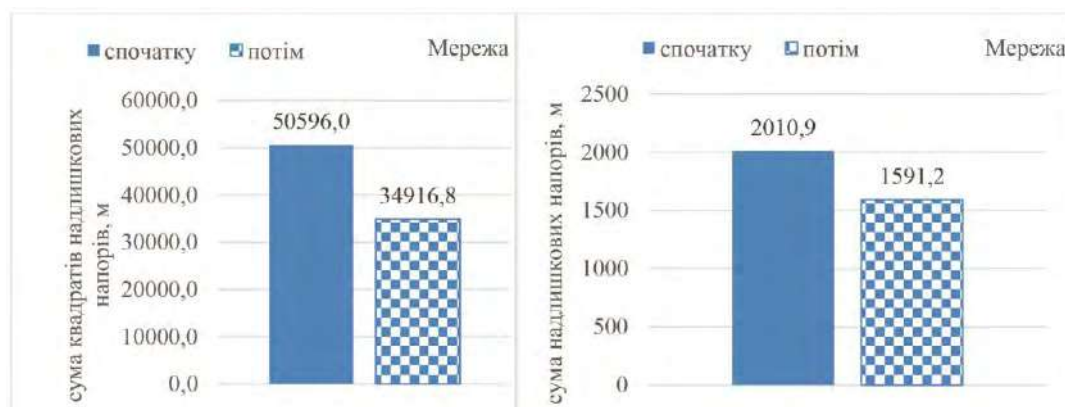


Рис. 13. Сума квадратів надлишкових напорів і сума надлишкових напорів у мережі до зонування та після

Висновки

У роботі запропоновано математичну модель задачі оптимального зонування водопровідної мережі, що ґрунтується на стохастичній моделі квазістаціонарних режимів її роботи, і метод розв'язання цієї задачі. Обчислювальний експеримент, який проводився для водопровідної мережі заданої структури, показав, що внаслідок встановлення регуляторів тиску на входах у виділені зони, можливо підвищити ефективність її роботи.

Показано, що використання методу зонування водопровідних мереж розглянутих структур дає змогу знизити математичне сподівання сумарного надлишкового напору в мережі з 2010,86 м до 1591,22 м, тобто на 21%.

Подальші дослідження з цієї теми будуть присвячені зонуванню ВМ, на якій працюють дві та більше насосних станцій, а також розглядатиметься доцільність встановлення станцій підкачки для окремих вузлів ВМ.

Список літератури

1. Тевяшев А. Д., Матвиенко О. И. Стохастическая модель и метод зонирования водопроводных сетей. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Vol 1 (67). С. 17–24.
2. Perelman L. S., Allen M., Preis A., Iqbal M., Whittle A. J. Automated Sub-Zoning of Water Distribution Systems. *Environmental Modelling & Software*. 2015. № 65. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.025>
3. Nardo A. D., Natale M. D., Santonastaso G. F., Venticinque S. Graph Partitioning for Automatic Sectorization of a Water Distribution System. 2011. 841.

4. Nardo A.D., Natale M.D., Giudicianni C. Weighted Spectral Clustering for Water Distribution Network Partitioning. *Appl Netw Sci.* 2017. Vol 2. 19 p.
5. Diao K., Jung D., Farmani R., Fu G., Butler D., Lansley K. Modular interdependency analysis for water distribution systems. *Water Research.* 2021. № 201. 117320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117320>
6. Zheng F., Zecchin A. C., Simpson A. R. A decomposition and multi-stage optimization approach applied to the optimization of water distribution systems with multiple supply sources. *Water Resources Research.* 2013. № 49. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012WR013160>
7. Diao K., Zhou Y., Rauch W. Automated Creation of District Metered Area Boundaries in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management.* March/april 2013. P. 184–190. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000247)
8. Matviienko O., Manchynska N. Method for Calculation of Dispersions of Dependent Variables of a Stochastic Model of Quasi-Stationary Operating Modes of the Main Water Pipeline. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries / Mathematical Modeling & Computational Methods.* 2022. No. 4 (22). P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2022.22.058>
9. Tevyashev A., Matviienko O., Nikitenko G. Construction of a Stochastic Model for a Water Supply Network with Hidden Leaks and a Method for Detecting and Calculating the Leaks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2019. Vol. 6/4 (102). P. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186157>
10. Тевяшев А. Д., Козыренко С. И., Непочатова В. Д. Метод построения модели квазистационарных режимов работы водопроводных сетей с утечками. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2010. №9 (44). С. 9–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2738>
11. Самойленко Н. И., Гавриленко И. А., Сенчук Т. С. Разработка моделей упорядочивания ребер графа трубопроводной распределительной сети. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2015. №4 (75). С. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42811>
12. Безкоровайний В. В., Березовський Г. В. Оцінка властивостей технологічних систем із використанням нечітких множин. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості №1 (1).* 2017. С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.014>
13. Безкоровайний В. В. Параметричний синтез моделей багатокритеріального оцінювання технологічних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості №2 (2).* 2017. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.005>
14. Давідіч Ю. О., Галкін А. С., Давідіч Н. В., Галкіна О. П. Оцінка величини енергетичних витрат кінцевих споживачів логістичної системи в процесі освоєння матеріального потоку. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості №2 (2).* 2018. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.005>
15. Elhay S., Deuerlein J., Olivier Piller O., Simpson A.R. Graph Partitioning in the Analysis of Pressure Dependent Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management.* 2018. №144 (4). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000896](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000896)

References

1. Tevyashev, A. D., Matviienko, O. I. (2014), "Stochastic Model and Method of Zoning of Water Supply Networks", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 1 (67), P. 17–24.
2. Perelman, L. S., Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., Whittle, A. J. (2015), "Automated Sub-Zoning of Water Distribution Systems", *Environmental Modelling & Software*, Vol. 65, P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.025>
3. Nardo, A. D., Natale, M. D., Santonastaso, G. F., Venticinque, S. (2011), *Graph Partitioning for Automatic Sectorization of a Water Distribution System*, 841 p.
4. Nardo, A.D., Natale, M.D., Giudicianni, C. (2017), "Weighted Spectral Clustering for Water Distribution Network Partitioning", *Appl Netw Sci.*, Vol. 2, 19 p.
5. Diao, K., Jung, D., Farmani, R., Fu, G., Butler, D., Lansley, K. (2021), "Modular Interdependency Analysis for Water Distribution Systems", *Water Research*, Vol. 201, 117320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117320>
6. Zheng, F., Zecchin, A. C., Simpson, A. R. (2013), "A Decomposition and Multi-Stage Optimization Approach Applied to the Optimization of Water Distribution Systems with Multiple Supply Sources", *Water Resources Research*, Vol. 49, P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012WR013160>
7. Diao, K., Zhou, Y., Rauch, W. (2013), "Automated Creation of District Metered Area Boundaries in Water Distribution Systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, march/april 2013, P. 184–190. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000247)
8. Matviienko, O., Manchynska, N. (2022), "Method for Calculation of Dispersions of Dependent Variables of a Stochastic Model of Quasi-Stationary Operating Modes of the Main Water Pipeline", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries / Mathematical Modeling & Computational Methods*, No. 4 (22), P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2022.22.058>
9. Tevyashev, A., Matviienko, O., Nikitenko, G. (2019), "Construction of a Stochastic Model for a Water Supply Network with Hidden Leaks and a Method for Detecting and Calculating the Leaks", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6/4 (102), P. 29–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186157>
10. Tevyashev, A. D., Kozыренко, S. I., Nepochatova, V. D. (2010), "Method for constructing a model of quasi-stationary modes of operation of water supply networks with leaks" ["Metod postroeniya modeli kvazistatsionarnykh rezhimov raboty vodoprovodnykh setey s utechkami"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 9 (44), P. 9–12. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2010.2738>
11. Samoylenko, N. I., Gavrilenko, I. A., Senchuk, T. S. (2015), "Development of mathematical models for ordering the edges of the pipeline distribution network graph" ["Razrabotka matematicheskikh modeley uporyadochivaniya reber grafa truboprovodnoy raspredelitel'noy seti"], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 4 (75), P. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42811>

12. Bezkorovayniy, V. V., Berezovskiy, G. V. (2017), "Evaluation of the properties of technological systems using fuzzy sets" ["Otsinka vlastyvostrykh tekhnolohichnykh system iz vykorystanniam nechitkykh mnozhyn"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 1 (1), P. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.014>
13. Bezkorovayniy, V. V. (2017), "Parametric synthesis of models of multi-criteria assessment of technological systems" ["Parametrychnyy syntezy modeley bahatokryterial'noho otsynuyvannya tekhnolohichnykh system"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 2 (2), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.005>
14. Davidich, Yu. O., Galkin, A. S., Davidich, N. V., Galkina, O. P. (2018), "Estimation of energy costs of end users of the logistics system in the process of mastering the material flow" ["Otsinka velychyny enerhetychnykh vytrat kintsevykh spozhyvachiv lohistychnoyi systemy v protsesi osvoyennya material'noho potoku"], *The current state of scientific research and technology in industry*, No. 2 (2), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.4.005>
15. Elhay, S., Deuerlein, J., Piller, O., Simpson, A. R. (2018), "Graph Partitioning in the Analysis of Pressure Dependent Water Distribution Systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, No. 144 (4). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000896](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000896)

Received 16.01.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Матвієнко Ольга Іванівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри прикладної математики, Харків, Україна; e-mail: olha.matviienko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7492-7616>.

Спичак Поліна Олександрівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, студентка IV курсу, Харків, Україна; e-mail: polina.spychak@nure.ua.

Matviienko Olha – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of Department of Applied Mathematics, Kharkiv, Ukraine.

Spichak Polina – Kharkiv National University of Radio Electronics, student, Kharkiv, Ukraine.

METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE WATER SUPPLY NETWORK DUE TO ITS ZONING

The **goal** of the work is to use a stochastic model of quasi-stationary modes of water supply network to reduce excess pressure in the water supply network by establishing pressure regulators at the entrances to the selected zones. The **subject** of research in the article is the optimization of the structure of water supply network by zoning. The article discusses the **task** of optimal zoning of water supply networks, which consists of two subtasks: allocation in the water supply network of isolated zones of nodes with excess pressure exceeding a given value; calculation of the parameters of pressure regulators installed at the entrances to the selected zones. A **method** based on the breadth-first search method is proposed for zone selection. The deterministic equivalent of this problem is solved using the Newton and Nelder-Mead methods. As a result of solving this problem, we obtain the minimum required values of the pressures stabilized at the outlets of the regulators and the maximum allowable values of the flow rates through them. To determine the minimum and maximum values of the ranges of flow rates and pressures at the inlets and outlets of the regulator, the forecast of the maximum and minimum water consumption by all categories of consumers in the selected zone is carried out and the problem of optimal load distribution between the pressure regulators is solved. As a result, we obtain a range of changes in the optimal flow rates through the regulator and the values of pressure stabilized at the output of the regulator. Based on this information, the type of regulators is determined that provides the necessary ranges of pressure changes at the inlets and outlets of the regulators for the minimum and maximum predicted costs through the regulator and the minimum allowable pressure at its inlet. The following **results** were obtained: calculations show that, using zoning and installation of pressure regulators at the inlets to isolated zones of the water supply network of the structure under consideration, it is possible to reduce the mathematical expectation of the total excess pressure in the network by 21%. **Conclusions:** the paper proposes a mathematical model for the problem of optimal zoning of the water supply network, based on a stochastic model of quasi-stationary modes of its operation, and a method for solving this problem. A computational experiment carried out for a water supply network of a given structure showed that as a result of installing pressure regulators at the entrances to the selected zones, it is possible to increase the efficiency of its operation.

Keywords: zoning; water supply network; stochastic model; pressure regulator; excess pressure.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Матвієнко О. І., Спичак П. О. Метод підвищення ефективності роботи водопровідної мережі способом її зонування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 83–95. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.083>

Matviienko, O., Spichak, P. (2023), "Method of increasing the efficiency of the water supply network due to its zoning", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 83–95. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.083>

M. MOZHAIEV, O. MOZHAIEV, Y. GNUSOV, V. STRUKOV, P. KLIMUSHIN, D. YEVSTRAT

ANALYSIS OF ACOUSTIC INFORMATION PROTECTION METHODS IN CRITICAL APPLICATIONS

Subject of the study: the process of acoustic information protection in computer systems of critical applications to ensure the required level of system security. **The aim** of the article is to analyze the methods of acoustic information protection in computer systems of critical application by means of masking to ensure the impossibility of unauthorized access to the system. The article solves the following **tasks**: to analyze the software and hardware masking of speech; to study the masking of speech messages in order to introduce unrecognizability; to study the features of speech message compression; to investigate methods of covert transmission of acoustic information. The **results** of the work, which were obtained using mathematical methods of information transformation in computer systems, are potentially possible methods of masking speech messages to ensure the impossibility of unauthorized access to the system. The analysis of the functioning of the presented methods has led to the following **conclusions**. One of the perspective directions of acoustic information protection in communication channels and dedicated premises can be considered the creation and development of computerized speech masking systems along with or in conjunction with traditional technologies of semantic protection of acoustic information, namely, speech signal classification based on cryptographic algorithms. The main requirements for today's systems that provide protection of acoustic information in critical computer systems are speed and efficiency of various speech signal processing procedures using standard inexpensive technical means of computer telephony, namely: a personal computer, sound card, telephone line interface device and/or modem. These requirements can be met by applying digital methods of dynamic spectral analysis, i.e. synthesis of speech and audio signals. The choice of specific methods and means of speech masking as one of the types of semantic protection of acoustic information will depend on the practical requirements for the speech protection system and the technical characteristics of the acoustic information transmission channel. Further research is desirable to analyze the possible use of methods for synthesizing large ensembles of quasi-orthogonal discrete signals with improved ensemble, structural and correlation properties to ensure higher security indicators of acoustic channels in computer systems of critical applications.

Keywords: acoustic information; masking of acoustic information; technical protection; cryptographic protection; steganographic (steganophonic) protection; speech modification; speech message compression; computer systems.

Introduction

Protecting acoustic (speech) information is one of the most important tasks in the overall set of measures to ensure the information security of an object or institution.

The unique features of speech information (SI) circulating in closed rooms and outside them: a large volume and speed of exchange, high confidentiality of some messages, the ability to identify the person making the message, and even the ability to determine the personal attitude to the information being voiced and to draw up a psychological portrait of the person concerned determine the relevance and extreme importance of solving the problem of protecting speech confidential information (SCI). Despite the growing role of automated information systems, speech information still plays a key role in information traffic (up to 80 per cent of the total information flow) [1, 2]. This is especially important today in the context of Russia's military aggression. Therefore, in recent years, more and more attention has been paid to ensuring the security of acoustic

information. On the one hand, this is due to the high polyinformativeness of acoustic information. On the other hand, it is due to the diversity of information threats in relation to acoustic (speech) information and the peculiarities of their development and implementation scenarios. All of this is reflected in a wide variety of modern methods, algorithms, software and hardware for protecting acoustic information from unauthorized access. The main areas of acoustic information protection are considered to be technical, cryptographic and steganographic (steganophonic) protection.

A separate section is devoted to the issue of acoustic information protection by masking acoustic information based on modern computer technologies. In recent years, this area has been gaining more and more practical interest among software manufacturers. In order to provide basic security services for audio signals, complex software systems are being created, new methods for receiving, transmitting, processing, and presenting audio signals are being developed and used. Therefore, this article is devoted to the analysis of methods for

protecting acoustic information that exists in modern information systems of critical applications to ensure a higher level of security of such systems.

Literature analysis

To intercept speech information, an alleged "adversary" (a person or group of persons interested in obtaining this information) can use a wide range of portable acoustic speech intelligence tools that allow intercepting speech information by direct acoustic, vibroacoustic, electroacoustic and opto-acoustic-electronic means, including [3, 4]:

- portable sound recording equipment (small-sized recorders, tape recorders and recording devices based on digital circuitry)

- directional microphones;

- electronic stethoscopes;

- electronic devices for intercepting speech information (bugging devices) with microphone and contact type sensors with transmission of intercepted information via radio, optical (in the infrared wavelength range) and ultrasonic channels, power supply network, telephone lines, connecting lines of auxiliary technical means or special lines;

- optoelectronic acoustic systems, etc.

Portable sound recording equipment and embedded devices with microphone-type sensors (transducers of acoustic signals propagating in air and gas environments) can be installed when individuals ("agents") are uncontrollably present directly in designated (protected) premises. This equipment provides recording of medium-loud speech when the microphone is removed at a distance of up to 15...20 m from the source of speech [3, 4].

Recently, both developers and consumers of semantic protection of acoustic information have been observing an increasingly steady trend to use new computer technologies for ensuring the security of speech communications without the use of classical cryptographic methods. In this regard, computer-based technologies for masking acoustic information are becoming increasingly attractive. However, one should not forget about cryptographic methods of protecting acoustic information, such as instantaneous crypto analysis of GSM with only ciphertext [5]; real-time crypto analysis of the assumed A5 stream cipher [6, 7]; crypto analysis of anomalous behavior of a computer system [8]; crypto-resistant methods and random number generators in the Internet of Things (IoT) devices [9].

The aim of the article is the analysis of methods for protecting acoustic information in critical computer systems by means of masking to ensure the impossibility of unauthorized access to the system.

To achieve this goal, we need to solve the following partial tasks:

- analyze the software and hardware language masking;

- to conduct a study of speech message masking for the purpose of introducing unrecognizability;

- to study the features of speech message compression;

- to study methods of covert transmission of acoustic information.

Masking of acoustic information on the basis of modern computer technologies

In this part of the article, we will study the effect of acoustic information masking based on modern computer technologies. For this purpose, Fig. 1 shows a generalized classification of acoustic information masking methods.

At lower financial costs for the development (primarily software), distribution and acquisition of such technologies, they can become a kind of buffer between cryptographic systems and systems of physical (technical) protection of acoustic information in communication channels. In addition, with the help of such technologies, it is possible to solve a number of other no less important tasks of ensuring the security of acoustic information than the technical closure of speech communication in order to protect it from unauthorized access by introducing indecipherability. For example, it is possible to covertly transmit acoustic information through various communication channels, change one's voice to achieve unrecognizability while maintaining natural sound.

Software and hardware language masking

Recently, a lot of software and hardware tools for language closure have appeared. These tools are essentially software analogues of well-known technical means of masking (maskers and scramblers). Under software and hardware speech closure, we will understand speech masking technologies, which refer to methods and means of semantic protection of acoustic information. They are aimed at ensuring the illegibility of a speech message. Their implementation in practice can be expressed in the mixing of speech with noise

and interference and/or in the modification of speech messages according to parameters calculated from

its description according to a known transformation law (closure – recovery).

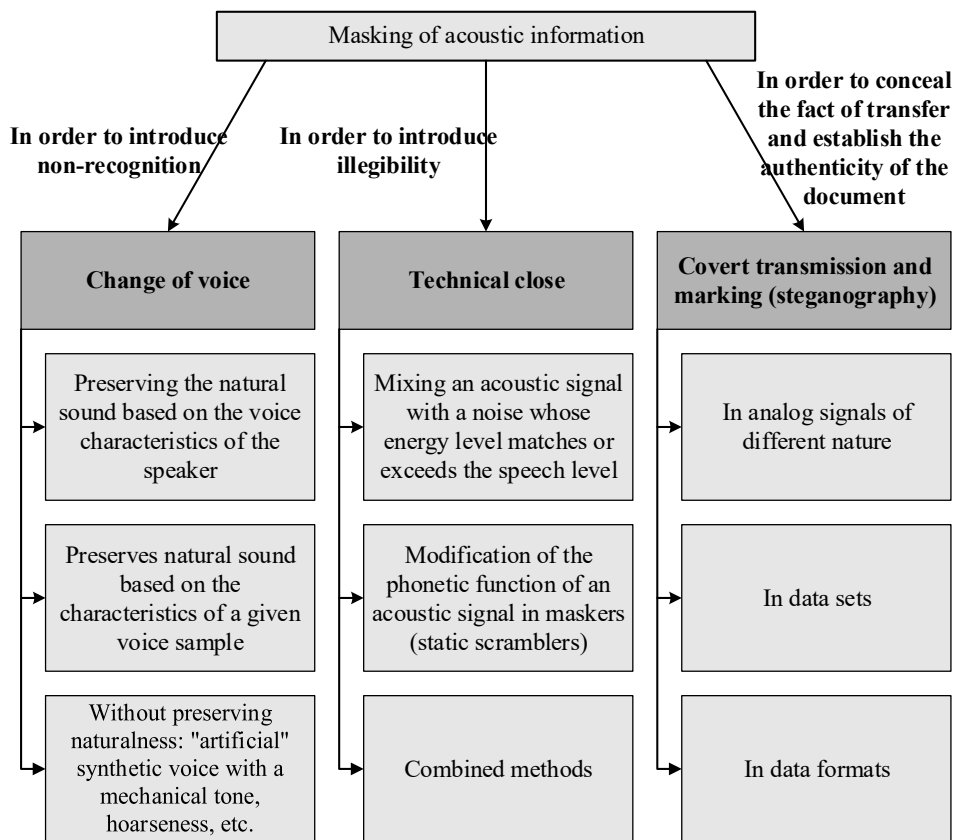


Fig. 1. General classification of acoustic information masking methods

A common type of software and hardware speech closure is the mixing of the original speech message with interference in order to transmit a new audibly indistinguishable sound signal, usually in the same frequency band as the original. Knowing the nature of the change and the type of interference, the receiving end of such a secure speech communication channel neutralizes its effect with additional cleaning and amplification of the restored speech signal. Thus, the lower panel of Fig. 2 shows the result of removing a quasi-harmonic interference from the payload, which significantly exceeds the energy level of the speech communication of interest.

There are different types of implementations of this type of masking: when the interference is comparable in power to the original speech message or significantly higher, when the interference is noise, quasi-harmonic or speech-like, etc.

Speech modification will be understood as a transformation of the original speech signal, primarily its phonetic function, in order to achieve its illegibility

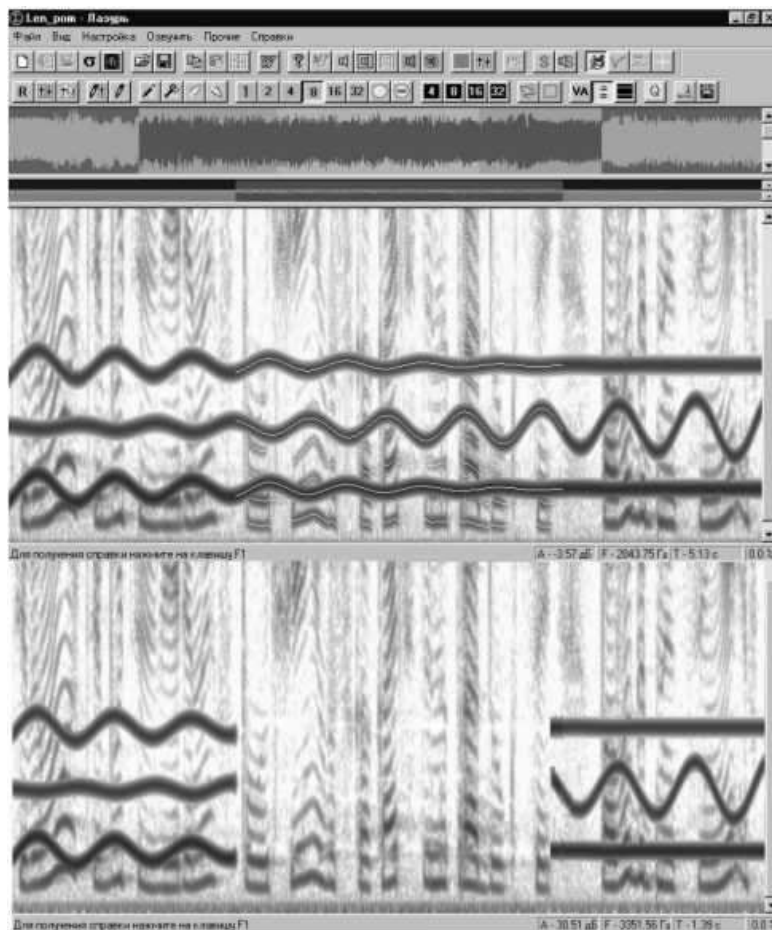
and/or unrecognizability according to a known given law, when the parameters of this transformation at the transmitting end of the communication channel are either known in advance or are extracted from the original signal itself and do not change during the entire communication session.

At the receiving end, these transformation parameters are either also known in advance or are extracted from the received modified signal in order to restore the unintelligible speech message according to the same known law.

It should be noted that at the receiving end, it is not always necessary to restore the original signal in the form in which it was originally. For example, this applies to acoustic information synthesized from a graphical image of a sonogram recovered from a closed image without taking into account the initial values of the phase spectral components. In this case, the waveforms (oscillograms) of the original and restored speech message will be different, and their intelligibility and sound will be exactly the same. This fully reveals the properties of

human auditory perception, which is weakly dependent on the phase relations of simple narrowband components of a complex sound signal. Hence the conclusion: if the

images of correctly calculated dynamic spectrograms of different acoustic signals are similar, they will sound (be perceived by ear) in the same way.



Upper – creating a powerful quasi-harmonic interference in the speech signal.

Bottom – removing the interference from the useful mixture at the receiving end of the communication channel.

Fig. 2. Masking speech with a quasi-harmonic barrier

The main task that is solved by software and hardware speech closure using the described approach is to modify the speech so that the modified speech is completely unintelligible. This task is solved by dynamically changing the envelope of the amplitude spectrum of the speech message, i.e., by modifying its formant structure.

Examples of practical implementation of methods for such modification of a speech message include a simple inversion of speech in the tone frequency channel band. More labor-intensive, and not previously used in practical applications, is the procedure of inversion of the cyclic shift of the spectrum envelope, while maintaining the same harmonic structure of the original speech message. It is also possible to implement combined methods of software and

hardware acoustic information closure: modification of a speech message with simultaneous imposition of interference. An example is spectrum inversion plus quasi-harmonic interference.

It should be noted that in some publications, speech maskers, such as spectrum inverters and the like, are referred to as a simple type of analogue static scramblers in which the speech conversion "key" does not change during the entire session or during a group of communication sessions. In other words, when we talk about closing acoustic information, we mean the use of permanent specific laws of speech conversion that introduce illegibility into acoustic information and are implemented in speech maskers, and when we talk about classifying a speech message, we mean the use of cryptographic algorithms.

It is also possible to combine the implementation of software and hardware methods of acoustic information classification: modification of the speech message with the simultaneous imposition of interference. An example is spectrum inversion plus quasi-harmonic interference.

In other words, when we talk about acoustic information closure, we mean the use of permanent specific laws of speech transformation that introduce illegibility into acoustic information and are implemented in speech maskers, and when we talk about speech message classification, we mean the use of cryptographic algorithms.

Thus, the technologies of software and hardware closure of acoustic information.

Masking of speech messages to introduce non-recognition

The impetus for widespread use of these technologies for masking sounds and speech has been provided by the rapid development of multimedia and new approaches to the description and processing of speech signals in recent years. One of them is an approach to the construction of special software and hardware for ensuring the security of speech communications, which combines the idea of translating a sound (speech) signal into the form of corresponding graphic images and back from image to sound or speech without loss of information content and/or intelligibility with the capabilities of known and promising digital image processing methods.

The main core of such an approach is the development and application of methods for detecting and reconstructing the parameters of the narrow-band Hilbert signals present in these images. Such a parametric description of a complex initial acoustic (speech) signal allows either to completely reproduce its sound or to restore and sound a "new" sound signal according to the properties changed and specified in such a parametric description.

To study such an approach to ensuring the security of speech messages using acoustic signal masking, it is feasible to apply methods of processing speech messages by transforming graphical images of the corresponding spectrograms. As an analytical representation of the speech signal, we use its Hilbert description:

$$(t) = G(t) \cos \Psi(t), \quad (1)$$

where $G(t)$ – envelope of speech signal,

$\Psi(t)$ – full phase of the speech signal.

These parameters describe this signal as a narrowband process in a limited frequency band and are related to each other using the Hilbert transform:

$$s(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^t \frac{s_G(\tau)}{\tau - t} d\tau, \quad (2)$$

$$s_G(\tau) = \frac{-1}{\pi} \int_{-\infty}^t \frac{s(\tau)}{\tau - t} d\tau,$$

where $s_G(\tau)$ – the function associated by Hilbert with the output signal $s(t)$.

Then

$$G(t) = \sqrt{s^2(t) + s_G^2(t)}, \quad (3)$$

$$\Psi(t) = \arctg \frac{s(t)}{s_G(t)}.$$

To describe a complex speech message, it can be represented as a whole narrowband signal or as a set of elementary K narrowband processes:

$$s(t) = G(t) \cos \Psi(t) = \sum_{k=1}^K g_k(t) \cos \Psi_k(t), \quad (4)$$

where $g_k(t)$ – Hilbert component,

$\Psi_k(t)$ – full phase of the k -th narrowband component.

However, it is now recognized that the most adequate form of an elementary narrowband signal is its representation as a Morlet wavelet. Given this assumption, we can obtain:

$$s(t) = G(t) \cos \Psi(t) = \sum_{k=1}^{K_{\Omega}} A_k e^{-t^2/\sigma_{ik}} \cos(\omega_{0k}t + \varphi_{0k}) + s_3, \quad (5)$$

where A_k is the corresponding amplitude of the k -th envelope;

σ_{ik} is the attenuation coefficient of the k -th envelope amplitude;

$\omega_{0k}, \varphi_{0k}$ are, respectively, the center frequency and initial phase K_{Ω} of the narrowband signals or wavelets that make up the speech signal;

s_3 – a function of the error of representation or noise.

According to model (5), at short time intervals within each R -step of temporal analysis, the following parameter vectors can act as primary descriptions of a speech message represented as a superposition of elementary narrowband processes:

$$\{A_k, \omega_{0k}, \varphi_{0k}\}_{t=\tau R} \quad (6)$$

In most speech information protection programs, only the first two parameters are sufficient, and then the parameter vector can be represented as:

$$\{A_k, \omega_{0k}\}_{k=1}^R. \quad (7)$$

Studies based on model (5) have shown that the data necessary to calculate the parameters of elementary narrowband signals that make up the original sound or speech can be contained in the dynamic spectral images of this acoustic signal, namely, in the images of correctly calculated amplitude sonograms and/or spectrograms. Such images can be obtained in the course of dynamic spectral analysis – synthesis of sounds and speech, sliding over the original signal with the selected analysis window with the transition from the samples weighted by it to their frequency image based on the adopted orthogonal basis. One example of such procedures is short-term analysis, i.e., Fourier synthesis of audio signals. Although, in some applications of speech communication security, not only harmonic, but also other bases, such as Wavelet functions, can be used to perform dynamic spectral analysis - synthesis of sounds and speech, short-term analysis – Fourier synthesis of audio signals and speech is traditionally used more often [10–11].

The parameters of narrow-band Hilbert elementary sound signals, which constitute the sound of the original sound or speech, are detected in the images of dynamic spectrograms as a set of contours (lines) of brightness difference or tracks (chains) of local and global extremes of colour saturation in the levels of one colour. With the help of special software (for the example shown in Fig. 3. the program "Real Time Audio 3D Spectrum 1.1" was used) along similar contours (tracks), which are visible on the frequency-time grid of dynamic spectrograms (see Fig. 3, top panel), it is possible to distinguish frequencies, amplitudes, phases of elementary sounds of a complex acoustic (speech) signal, and then reconstruct, modify, destroy, and create them anew to solve a specific task of ensuring the security of speech communication using various known methods and tools of digital image processing. Thus, the selected area in the center of the upper panel of Fig. 3. of the graphic image of the speech signal can be applied to a powerful arsenal of tools provided by well-known graphic editors such as Adobe Photoshop, Corel Draw, Photo Editor and others. After the necessary processing of this section of the spectrogram image in the selected graphic editor, it can be inserted back into its original place for further

synthesis and listening to the new acoustic or speech signal modified in this way.

It should be noted that currently the choice of special software tools for sonogram processing is quite wide. The most well-known software products can be cited: Real Time Audio 3D Spectrum, Adobe Audition of various versions, SmartSound SonicFire Pro, etc. However, most of them only allow you to obtain sonograms of speech messages. Only a few of them allow you to perform the full processing cycle (including the backward embedding of processed sonograms), and these programs are not freely distributed software.

Let us consider in more detail the different classes of acoustic information masking realized by the proposed approach to processing speech messages through the processing of their graphical images.

Artificial voice systems

While traditional voice changers have not paid much attention to the sound quality (naturalness and authenticity) of artificial speech, the situation is changing. For example, there are reports of software products that search by voice pattern. Often, when conducting investigations, operatives have to impersonate another person for disguise. All this leads to the task of qualitative voice alteration in the course of measures for the comprehensive protection of acoustic information.

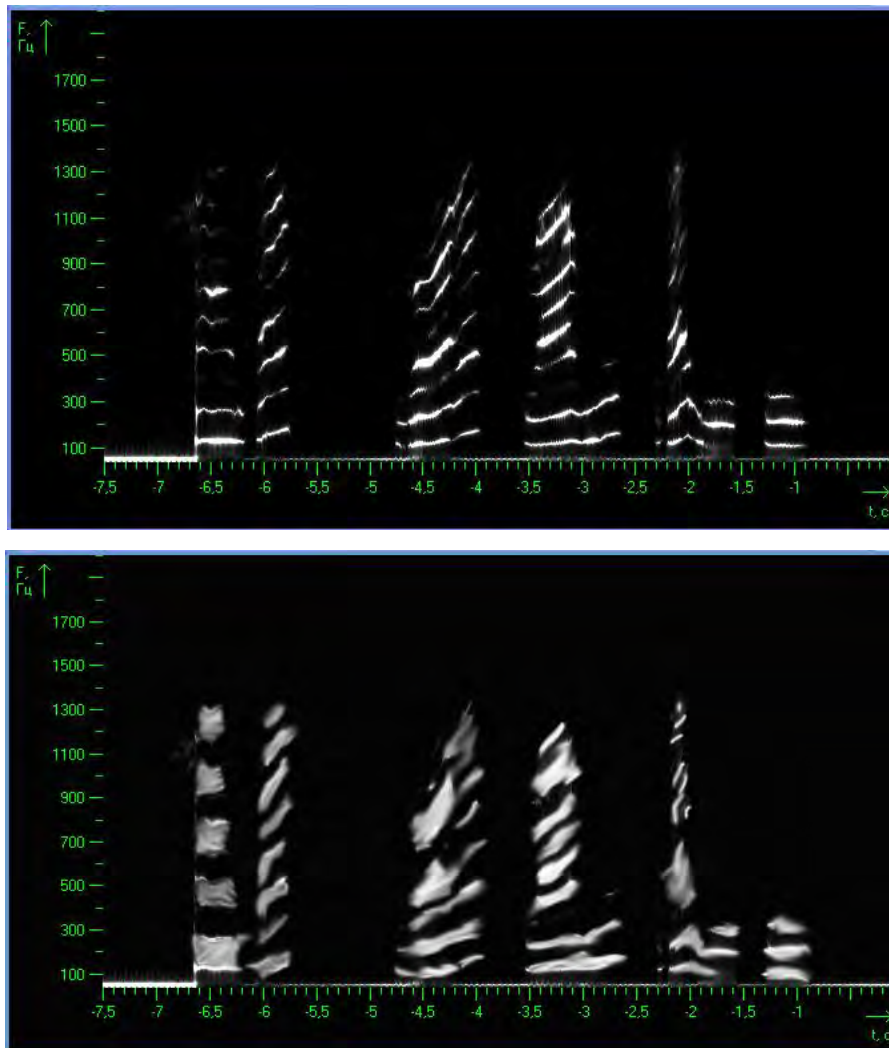
This is a rather difficult task, as each person's voice is individual and recognizable. Moreover, auditory perception is so perfect that it allows us to recognize the subtlest shades of the speech signal. The human ear can accurately determine the signs of artificiality and naturalness of speech.

A speech message can be represented in the form of a speech signal, which in turn can be used for reverse speech reproduction. In other words, it is possible to put an equivalence sign between the sound language and its representation in the form of a speech signal, including in the digitized form contained in computer files.

It is known that speech is a complex process of communication between people, which includes both information about the individual voice of the speaker and information about phonetic quality. Therefore, it is important to ensure the correct choice and justification of the system of features that will determine the principle of speech construction. The main features responsible

for the individual colouring of speech can be divided into two groups: those related to the physiological

mechanisms of speech production and those related to the ways of putting it into action (activity, articulation).



Above: a natural male voice with the trajectories of narrowband speech components highlighted.

At the bottom, an artificial male voice synthesized according to a given sample.

The maximum power of the studied signal in the frequency-time grid node is indicated in white, the minimum power in black, and the intermediate values in gray.

Fig. 3. Sonogram of the phrase "Kharkiv is a city of traditions"

The first group of features is based on the well-known model of the speech tract, which consists of a transmission function of the resonant system and an excitation signal pulse generator. The transfer function almost completely characterizes the individual geometric shape of the cavities of the speech apparatus. The main parameters here are the characteristics of the four formant regions (average frequency, frequency range, and energy), spectrum envelope, formant trajectories and derivatives of these parameters.

To calculate parameters related to the physiological characteristics of the speech tract, spectral-time

analysis methods are most often used. Such methods of speech signal analysis are adequate to the natural mechanism of speech perception. Such methods are often based on classical Fourier analysis or parametric autoregressive analysis (linear prediction as a special case).

The second group of parameters also includes intonational characteristics of the speech stream, such as intensity, intonation, stress system, and rhythmic pattern of the speech phrase.

Among the parameters of the speech signal that determine the individuality of a person's voice,

it is necessary to distinguish integral parameters of speech that cannot be attributed to any of the groups considered, but they are strongly correlated with them and are formed under the influence of the anatomical features of the speech-forming tract and human articulation. That is, the analysis of integral parameters makes it possible to determine the peculiarities of individual pronunciation for speech segments of different phonetic content.

The creation of high-quality voice changers based on standard office equipment is possible when implementing the proposed approach through image processing of its graphic images. Specialized software of such a computer system should modify both the harmonic structure of the speech signal, which usually contains individual features of the speaker.

Such procedures can already be carried out on images of dynamic sonograms with the subsequent synthesis of a new artificial speech signal from the modified graphic image. A combination of such actions with correctly performed calculations will likely achieve the desired result. Some difficulties may arise when modifying paused areas. Therefore, the task of reliable detection of tonal and noise areas in the speech stream requires a solution.

It is clear that only through software implementation on standard hardware will such a voice changer be not only much cheaper than existing analogues, but also provide a better, truly natural sounding artificial speech signal. Software implementation will allow for smoother voice changes from male to female, from child to adult.

Compression of speech messages

The task of compressing speech messages can also be solved by processing sonogram images. The processing scheme is as follows: first, the speech message is converted into its graphical image – a sonogram within the selected analysis window during dynamic spectral analysis – synthesis of sounds and speech; then this sonogram image is compressed using one of the image compression methods, and the compression ratios are transmitted to the communication channel; using the received compression ratios, the image of the original sonogram is reconstructed at the receiving end of the communication channel, which is then used to synthesize a new speech message. The advantage of this method of speech coding is that

only one initial description of the speech message is used – a sonogram with traces of phono objects, based on which it is possible to obtain almost any required speech coding rate, which is determined by the bandwidth of the communication channel at a given time. At the same time, the maximum possible intelligibility and sound quality of the restored speech is preserved. The results of some recent studies have shown that by applying fractal or special wavelet-based compression methods to sonogram images, a minimum encoding rate of 800 bps can be achieved while maintaining verbal intelligibility of about 80%.

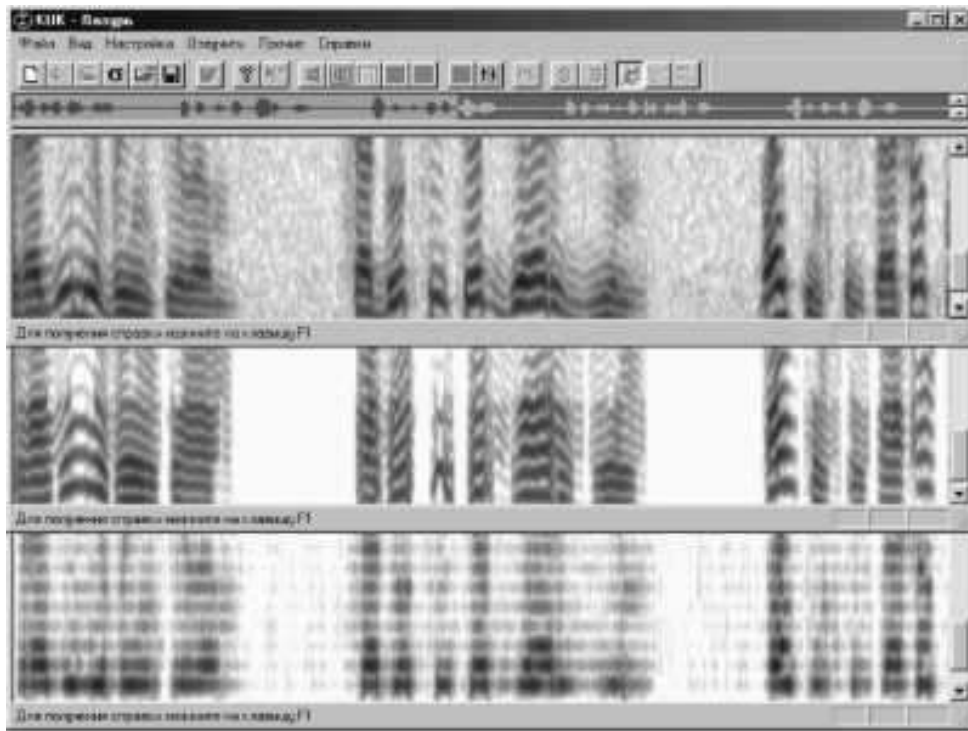
The sonogram of the initial speech area, the image of which will be used for compression by digital image processing methods, is shown in the upper panel of Fig. 4. A rough oscillogram of the entire speech message under study is drawn above the sonogram, indicating the location of the selected fragment.

A sonogram of the same speech segment restored after compression using the proposed method to a rate of 1000 bits/s and a sonogram of the same speech segment restored after compression to 800 bits/s by extracting information about the melody of the main tone using digital image processing methods are shown in the middle and lower panels of Fig. 4. It is possible to see that the sonogram of the speech recovered after compression at 1000 bits/s is more similar to the sonogram of the original speech message than the sonogram of the signal recovered after compression of the image obtained by means of the fundamental tone equalization. That is why the first restored speech message sounds better and more natural than the second, despite their equal high intelligibility.

Hidden transmission of acoustic information

At present, measures to ensure the security of voice communications can be aimed not only at preventing unauthorized acquisition of acoustic information, but also at concealing the very fact of its transmission, by using standard technical means, conventional, traditional information exchange protocols and publicly available communication channels for these purposes.

In recent years, this area of information security in computer telecommunication systems, called "stegology" (sometimes "stealthology"), has been actively developing around the world.



Above: a sonogram of the original speech fragment under study.

In the center, a sonogram of the speech signal recovered after compression at 1000 bits/s using one of the image compression algorithms of the original sonogram.

Bottom – a sonogram of the speech signal restored after compression to 800 bits/s with the exclusion of information about the fundamental tone.

Fig. 4. Examples of speech compression

A particularly popular part of steganology has recently become steganography, which is used to hide confidential information in graphic images transmitted over computer networks. At the same time, the progress made in the development of acoustic information transmission devices, as well as in computer technology, opens up new opportunities for both covert transmission of confidential information in analogue and digital audio signals and speech, and for covert transmission in information containers of various kinds, based on the use of new multimedia technologies, computer and cellular telephony, etc. This area of digital technology in the field of protecting confidential information covertly present inside or over an openly transmitted audio signal is now commonly referred to as "steganophony."

Currently, computerized steganography methods are widely used based on the use of natural noise containing digital arrays obtained by standard conversion methods from analogue acoustic and video signals. These noises are quantization errors and cannot be completely eliminated. The use of noise bits to transmit additional confidential information allows you

to create a hidden data channel. As noise bits, we usually consider the lowest bits of the count values, which are noise in terms of measurement accuracy and carry the least amount of information contained in the count. Such bits are commonly referred to as least significant bits (LSBs).

One of the most common methods of steganophonic concealment of confidential information is the method based on the use of Least Significant Bits of audio (and/or any other multimedia) data [12, 13].

Certain statistical criteria have been developed to detect the fact of concealing a confidential information message in the EIS of audio signals [14, 15].

The statistical analysis of the audio data revealed a number of significant properties that affect the secrecy of confidential data and, accordingly, the security of such methods using noise bits. Among these properties, the following should be highlighted:

- heterogeneity of sample sequences;
- the presence of certain dependencies between bits in the samples;
- the presence of certain dependencies between the samples themselves;

- unequal probability of conditional distributions in the sequence of samples;

- presence of long series of identical bits;
- correlation between UXO and high bits.

Today, we can offer the following requirements for hiding confidential acoustic information and setting steganophonic markers in signals, arrays and data formats of various nature:

- the perception of signals and data with confidential acoustic information embedded in them should be practically indistinguishable from the perception of the original, "open" message contained in this signal or array;

- confidential speech data transmitted over publicly available communication channels, masked by various signals or implicitly contained in their parameters, should not be easily detected in these carrier signals by widely used methods and technical means of analysis currently available;

- in a number of applications, the setting and detection of steganographic markers should not depend on the synchronization of these processes and on the availability of any standards;

- special methods for setting and detecting steganophonic markers should be implemented on the basis of standard computer equipment or special software and hardware based on it;

- it should be possible to embed and detect authenticity features in an acoustic (speech) signal that are detected when it is illegally copied or modified, regardless of the type of representation and transmission of this signal (analogue or digital);

- should provide the possibility of hiding confidential acoustic information in data sets regardless of the type of information presented in them.

Sonogram images can be used to transmit and store speech on paper as stegomarkers. When implementing "speech signature" technologies associated with a protected document, which are similar in meaning and content to an electronic digital signature, two to four minutes of telephone-quality speech in the form of various patterned drawings can be applied to a standard sheet of paper. In this case, the authenticity of the document can be established not only by the presence of the relevant signatures and stamps, but also by the information contained in the "speech signature", which can be scanned, synthesized and voiced to make it possible to hear the key points of the document's content voiced by the voice of the responsible person.

A discrepancy between the voiced information and the information contained in the document indicates that it has been falsified. It is virtually impossible to forge a "speech seal" or "speech signature". It should be noted that such a cheap "speech signature" technology can be implemented on standard office equipment: a computer with a sound card plus a printer and scanner.

Conclusion

Thus, based on the above, it can be assumed that one of the promising areas of acoustic information protection in communication channels and dedicated premises is the creation and development of computerized speech marking systems along with or in conjunction with traditional technologies for semantic protection of acoustic information, namely, the classification of speech signals based on cryptographic algorithms.

The choice of specific methods and means of speech masking as one of the types of semantic protection of acoustic information will depend on the practical requirements for the speech protection system and the technical characteristics of the acoustic information transmission channel.

Computer technologies for digital signal and image processing are becoming more and more widely used in modern security systems for voice communications. The main requirements for today's systems that provide protection of acoustic information in critical computer systems are the speed and efficiency of various speech signal processing procedures using standard inexpensive technical means of computer telephony, namely: a personal computer, sound card, telephone line interface device and/or modem. These requirements can be met by applying digital methods of dynamic spectral analysis, i.e., synthesis of speech and audio signals.

The given examples of using the proposed approach to solve the most common problems of ensuring the security of speech messages have shown its high potential capabilities in the implementation of various, even very complex and new audio signal processing algorithms that are already applicable today to create computer systems for protecting speech messages in public communication channels. This approach can become the basis for the design of new acoustic information security systems and the evaluation of the effectiveness of the use of speech message protection devices that already exist on the market of special equipment.

Further research is desirable to analyze the possible use of methods for synthesizing large ensembles of quasi-orthogonal discrete signals with improved ensemble, structural, and correlation properties to ensure higher security of acoustic channels in computer systems for critical applications.

References

1. 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. 75–81. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.046>
2. 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>
3. Karen Bailey, Kevin Curran. *Steganography*. – *BookSurge Publishing*, 2005 p. – 118 p.
4. Johnson N., Duric Z., Jajodia S. *Information Hiding: Steganography and Watermarking – Attacks and Countermeasures*, New York – NY.: Kluwer Academic Pub, 2000 p. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-25096-4_6
5. Elad Barkan. Instant Ciphertext-Only Cryptanalysis of GSM. Encrypted Communication. / Elad Barkan, Eli Biham, Nathan Keller. // *Journal of Cryptology*. Volume 21, Number 3, July 2008, P. 392–429 (38).
6. J. Golub. Cryptanalysis of Alleged A5 Stream Cipher. – Proceedings of EUROCRYPT'97, LNCS 1233, P. 239–255, Springer-Verlag 1997.
7. Alex Biryukov. Real Time Cryptanalysis of A5/1 on a PC. / Alex Biryukov, Adi Shamir, David Wagner – Springer Berlin / Heidelberg, 2001. – ISBN: 978-3-540-41728-6. URL: <https://cryptome.org/a51-bsw.htm>
8. Mozhaiev O. Development of a method for determining the general criteria of abnormal behavior of a computer system based on the improved criterion of uniformity of input data samples / Mozhaiev O., Semenov, S., Kuchuk, N., Mozhaiev, M., Tiulieniev, S., Gnusov, Y., Yevstrat, D., Chyrva, Y., Kuchuk, H. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (4 (120)), P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269128>
9. Mozhaiev O. Crypto-resistant methods and random number generators in internet of things (iot) devices/ Mozhaiev O., Klimushyn P., Solianyk T., Gnusov Y., Manzhai O., Svitlychnyi V. // *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 2022 № 2 (20), P. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.20.022>
10. Mozhaiev O. Potential application of hardware protected symmetric authentication microcircuits to ensure the security of internet of things/ Mozhaiev O, Klimushyn P., Solianyk T., Kolisnyk T. // *Advanced Information Systems*, 2021. Vol. 5, No 3. P. 103–111. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.14>
11. Klimushyn, P., (2021), "Hardware support procedures for asymmetric authentication of the internet of things"/ Klimushyn, P., Solianyk, T., Mozhaev, O., Nosov, V., Kolisnyk, T., Yanov V. // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (18), P. 31-39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.18.031>
12. J. Friedrich, G. Miroslav, R. Du. Reliable Detection of LSB Steganography in Color and Grayscale Images. Binghamton, New York: SUNY, 2001. URL: http://www.ws.binghamton.edu/fridrich/research/acm_2001_03.pdf
13. J. Fridrich, R. Du, and L. Meng, "Steganalysis of LSB Encoding in Color Images", *ICME 2000*, New York City. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICME.2000.871000>
14. W. Brock. W. Dechert and J. Scheinkman. "A test for independence based on the correlation dimension", *Working Paper, University of Wisconsin*, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1177/1536867X211025796>
15. Wu H. C., Wu N. I., Tsai C. S., Hwang M. S. Image Steganographic Scheme Based on Pixel-Value Differencing and LSB Replacement Methods // *IEEE Transactions on Image and Signal Processing*, 2005. – № 5. – P. 611–615. DOI: <https://doi.org/10.1049/IP-VIS:20059022>

Received 28.03.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Можасьв Михайло Олександрович – доктор технічних наук, Науково-дослідний центр судової експертизи з питань інтелектуальної власності Міністерства юстиції України, заступник директора, Київ, Україна; e-mail: mozhaev.misha89@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1566-9260>

Можасьв Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет внутрішніх справ, професор кафедри кібербезпеки та DATA-технологій, Харків, Україна; e-mail: mozhaev1957@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1412-2696>

Гнусов Юрій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет внутрішніх справ, завідувач кафедри кібербезпеки та DATA-технологій, Харків, Україна; e-mail: duke6969@i.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9017-9635>

Струков Володимир Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет внутрішніх справ, професор кафедри кібербезпеки та DATA-технологій, Харків, Україна; e-mail: struk_vm@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4722-3159>

Клімушин Петро Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет внутрішніх справ, доцент кафедри протидії кіберзлочинності, Харків, Україна; e-mail: klimushyn@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1020-9399>

Євстрат Дмитро Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, доцент кафедри інформаційних систем, Харків, Україна; e-mail: dmitry.yevstrat@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8393-6063>

Mozhaiev Mykhailo – Doctor of Technical Sciences, Scientific Research Centre for Forensic on Intellectual Property of the Ministry of Justice of Ukraine, Deputy Director, Kyiv, Ukraine.

Mozhaiev Oleksandr – Doctor of technical science, professor, Kharkiv National University of Internal Affairs, professor of Cyber Security and DATA-Technologies Department, Kharkiv, Ukraine.

Gnusov Yurii – Candidate of technical science, associate professor, Kharkiv National University of Internal Affairs, head of department Cyber Security and DATA-Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Strukov Volodymyr – Candidate of technical science, associate professor, Kharkiv National University of Internal Affairs, professor of Cyber Security and DATA-Technologies Department, Kharkiv, Ukraine.

Klimushin Petro – Candidate of technical science, associate professor, Kharkiv National University of Internal Affairs, associate professor of Countering Cybercrime Department, Kharkiv, Ukraine.

Yevstrat Dmytro – Candidate of technical science, associate professor, Simon Kuznets Kharkiv National Economic University, associate professor of Department of Information Systems, Kharkiv, Ukraine.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ АКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Предмет дослідження – процес захисту акустичної інформації в комп'ютерних системах критичного застосування для забезпечення необхідного рівня безпеки системи. **Метою** статті є аналіз методів захисту акустичної інформації в комп'ютерних системах критичного застосування за допомогою маскування для забезпечення неможливості несанкційного доступу до системи. У роботі вирішуються такі **завдання**: проаналізовано програмно-технічне маскування мови; досліджено маскування мовних повідомлень з метою введення невпізнання; визначено особливості стиснення мовних повідомлень; вивчено приховану передачу акустичної інформації. **Результатами** роботи, отриманими за допомогою математичних методів перетворення інформації в комп'ютерних системах, є потенційно можливі методи маскування мовних повідомлень для забезпечення неможливості несанкційного доступу до системи. Аналіз функціонування запропонованих методів дав змогу сформулювати конкретні **висновки**. Одним із перспективних напрямів захисту акустичної інформації в каналах зв'язку й виділених приміщеннях є створення та розвиток комп'ютеризованих систем маскування мови за умови їх сумісного використання з традиційними технологіями смислового захисту акустичної інформації, а саме засекречуванням мовних сигналів на основі криптографічних алгоритмів. Нині основними вимогами, що висуваються до систем, які забезпечують захист акустичної інформації в комп'ютерних системах критичного застосування, є швидкість і ефективність виконання різних процедур оброблення мовного сигналу з використанням стандартних недорогих технічних засобів комп'ютерної телефонії, зокрема: персонального комп'ютера, звукової карти, пристрою стику з телефонною лінією і/або модема. Задовольнити зазначені вимоги можна, застосовуючи цифрові методи динамічного спектрального аналізу-синтезу мовних і аудіосигналів. Вибір конкретних методів і засобів маскування мови як одного з видів смислового захисту акустичної інформації залежатиме від практичних вимог, що висуваються до системи мовного захисту й технічних характеристик каналу передачі акустичної інформації. Подальші дослідження буде присвячено аналізу можливого використання методів синтезу великих ансамблів квазіортогональних дискретних сигналів із поліпшеними ансамблевими, структурними й кореляційними властивостями для забезпечення вищих показників захищеності акустичних каналів у комп'ютерних системах критичного застосування.

Ключові слова: акустична інформація; маскування акустичної інформації; технічний захист; криптографічний захист; стеганографічний (стеганофонічний) захист; модифікація мови; стиснення мовних повідомлень; комп'ютерні системи.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Можаєв М. О., Можаєв О. О., Гнусов Ю. В., Струков В. М., Клімушин П. С., Євстрат Д. І. Аналіз методів захисту акустичної інформації в системах критичного застосування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 96–107. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.096>

Mozhaiev, M., Mozhaiev, O., Gnusov, Y., Strukov, V., Klimushin, P., Yevstrat, D. (2023), "Analysis of acoustic information protection methods in critical applications", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 96–107. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.096>

I. RUBAN, V. LEBEDIEV

METHOD FOR DETERMINING THE RATIONAL NUMBER OF UAV FLOTILLA TAKING INTO ACCOUNT THE RELIABILITY OF THE AIRCRAFT

The conducted studies showed that projects of analysis and assessment of emergencies at critical infrastructure facilities have been initiated in Ukraine and abroad. The purpose of such a system is the formation of data for the development of architecture, demonstration analytics and a prototype of decision support capabilities, taking into account the use of currently available data and analytical methodologies. Unmanned aerial vehicles (UAVs), which work with ground and air control points in emergencies, are planned as the basis for the construction of such a system. **The subject of the study** is methods of determining the rational number of UAV flotillas taking into account the assigned tasks and characteristics. Currently, there is no method for determining the rational number of a UAV flotilla, taking into account the reliability of the aircraft. **An urgent scientific and technical task** is the task of creating a rational number of the UAV flotilla, taking into account the reliability of the aircraft and the necessary quality of monitoring the situation in emergencies. **The purpose of the article** is to develop a method for determining the rational number of UAV flotillas taking into account the reliability of the aircraft and the necessary quality of monitoring the situation in emergencies. **Research methods** – provisions of risk theory, probability theory, combinatorics, mathematical apparatus of reliability theory, mathematical methods of optimization. **Research results:** an analysis of factors affecting the structure of the UAV grouping was carried out; the dependence of task performance on the probability of UAV failure under the influence of interfering factors was obtained; it is shown that in conditions with a low impact of interfering factors, the reliability of individual UAVs does not have a significant impact on the performance of assigned tasks. It has been established that with increasing influence of interfering factors, the probability of completing tasks depends on the reliability of the aircraft. **Conclusions:** The proposed method makes it possible to create a rational number of UAV flotillas taking into account the reliability of the aircraft and the necessary quality of monitoring the situation with a rational number of UAVs in emergencies.

Keywords: UAV flotilla control; UAV grouping; rational number; emergencies; reliability of functioning.

Introduction

A number of publications by domestic and foreign scientists have been devoted to ensuring and assessing the reliability, survivability, and safety of technical systems, in particular those intended for monitoring, control, and management in emergencies. In Ukraine and abroad, projects have been initiated to analyze [1, 4], assess the occurrence of emergencies [5, 6], generate data for architecture development [2, 3], and demonstrate analytics and prototype decision support capabilities using currently available data and analytical methodologies to prevent accidents and incidents [3, 5]. Unmanned aerial vehicles (UAVs) working with ground and airborne control centers in emergencies can become the basis for building such a system. The idea of such systems is quite simple. A UAV or a group (fleet) of UAVs operate in the emergency zone. The number of aircraft is determined by the list of tasks assigned to the UAV group. In addition, each of the aircraft is capable of duplicating the assigned tasks to a neighboring UAV.

Analysis of recent research and publications

The construction of an information management system involves structural and numerical redundancy of UAVs. Paper [7] proposes a methodology for assessing the probability of performing a task by a fixed number of flotilla taking into account the reliability characteristics of UAVs. This approach provides for maximum redundancy of the grouping, as well as the use of highly reliable aircraft, and therefore expensive UAVs, and does not allow for rational construction of aircraft groups.

Paper [8] considers risk models in information systems and formulates the tasks of building self-healing systems.

Studies [9, 10] solve the problem of detecting covert attacks using false data in intelligent networks. At the same time, the network structures for detecting attacks are not substantiated and algorithms for building a system in case of network degradation are not considered.

Works [11, 12] predict the load in an intelligent network based on long-term and short-term memory. The results obtained make it possible to solve the problem of predicting the state of the system, but do not

allow solving the problem of self-healing of the system in the event of failure of its elements.

The following papers [13, 14] consider the impact of cyber-physical attacks on data in real-time smart grids. A mechanism for detecting cyber-physical attacks with false data is proposed to protect the operation of power transmission and distribution systems by automatically determining the main physical relationships using cross-sensory analytics.

The study [15] raises the issue of the ability of the smart grid to self-heal and receive new energy. The results obtained can be applied to power systems that combine different energy sources to maximize the safety of system operation.

Despite the significant number of developed methods and models, a number of important issues remain outside the scope of research, namely

- development of models and methods for ensuring self-healing in information systems for the management and operation of the UAV flotilla;

- organization of a multi-level information system for the management and operation of the UAV flotilla and creation of a method for assessing the characteristics of such systems;

- development of self-healing methods in information systems of UAV fleets with multi-stage degradation and recovery;

- creation of a model for deploying multi-purpose self-healing unmanned systems for monitoring and analyzing emergencies.

In addition, it is necessary to emphasize the lack of information technology to plan the use and ensure the reliable operation of UAV fleets, given the existing capabilities of unmanned aircraft to measure, transmit and analyze information about the state of objects.

Existing approaches to determining the number of UAVs in a flotilla are aimed at some redundancy of aircraft and do not take into account the ability of UAVs to operate under specific destabilizing factors and threats. Currently, there is no method for determining the rational number of UAV flotillas, taking into account the reliability of the aircraft. The rational number of a UAV flotilla will be understood as the minimum number of aircraft capable of performing the assigned tasks with a given probability.

Therefore, the task of creating a rational number of UAV flotilla taking into account the reliability of the aircraft and the required quality of control of the situation in emergencies is relevant.

The purpose of the article is to develop a method for determining the rational size of a UAV flotilla, taking into account the reliability of the aircraft and the required quality of control of the situation in emergencies.

Materials and methods of the study

Advances in probabilistic accident modeling and data analysis make it possible to explain and predict events and incidents with greater accuracy using large amounts of available data and sophisticated analytical tools. Unmanned aerial vehicles (UAVs) that work with ground and airborne control centers in crises can be the basis for building such a system. The idea of the system is quite simple. A UAV or a group (fleet) of UAVs operates in a crisis area (Fig. 1). The number of UAVs is determined by the list of tasks assigned to the UAV group. In addition, each UAV is capable of duplicating the tasks assigned to a neighboring UAV.

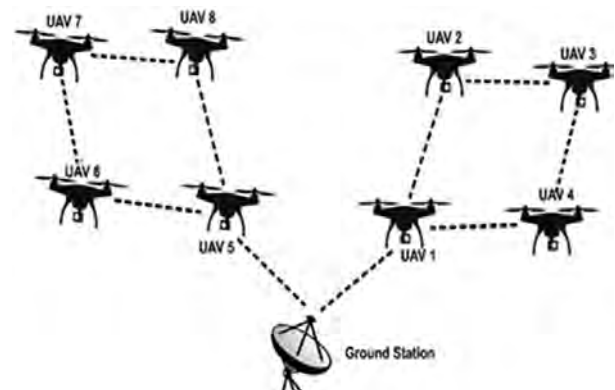


Fig. 1. UAV grouping

An analysis of the tasks assigned to UAV groupings that require decision-making shows that the same typical elements are usually present in these processes (Fig. 2). These elements include the following:

The analysis of Fig. 2 shows that, depending on the required probability of completing tasks, increasing the impact of interference, the quality of the UAV fleet depends on both the reliability of the aircraft and the quality of the control system.

Let F be the functional describing the quality of the UAV grouping control system under threats [9, 10]:

$$F\{G(h,R), I(R), S(L), V(e), T(t)\}, \quad (1)$$

where $G(h,R)$ is a function characterizing the energy parameters of the control system;

$I(R)$ is a function characterizing the resistance to external influences;

$S(L)$ is a function characterizing the structural reliability of the control system software;

$V(e)$ is a function that characterizes the speed characteristics of the control system;

$T(t)$ is a function characterizing the time parameters of the control system.

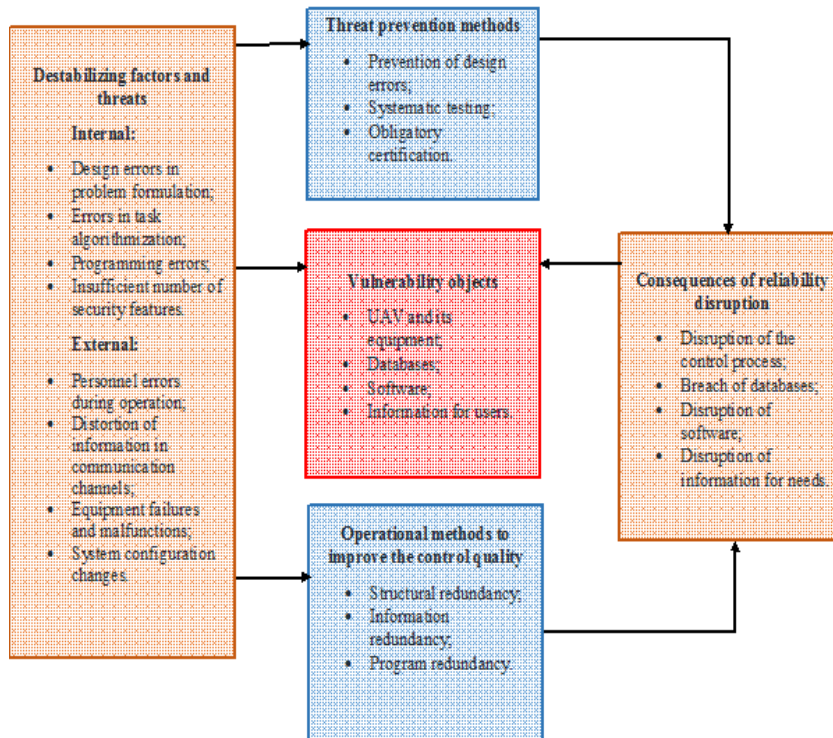


Fig. 2. Typical elements and factors affecting the structure of a UAV grouping

Thus, the task of synthesizing a self-healing system is to develop methods and algorithms that maximize the functional of the form (1). Mathematically, this can be expressed through the objective function $\gamma(x)$, which is written in the form [3]:

$$\gamma(x) = \max \{ F \{ G(h, r), I(R), S(L), V(r), T(t) \} \}, \quad (2)$$

where $x = (h, r, R, L, e, t)$.

In addition, the following restrictions must be met:

$$\begin{aligned} G(h, R) &\geq g_{all}, \\ I(R) &\leq I_{all}, \\ S(L) &\geq S_{all}, \\ V(e) &\leq V_{all}, \\ T(t) &\leq T_{all}, \end{aligned} \quad (3)$$

where g_{all} is the minimum allowable value of the energy parameters of the control system;

I_{all} is the required value of resistance to external influences;

S_{all} is the set value of structural reliability of the control system software;

V_{all} is the minimum allowable value of the speed characteristics of the control system;

T_{all} is the maximum allowable time for executing control commands.

Thus, expression (2), taking into account the constraints (3), describes in a generalized form the main task of research – the synthesis of the control system – and ensures the maximum quality of the system in the complex under the conditions of given probabilistic and temporal characteristics and the influence of interference.

The studies conducted have shown [11] that the synthesis task that ensures conditions (2) in the case of their limitations (3) is an extreme task. The variational nature of the problem of constructing a self-healing system implies the use of ideas and methods as a mathematical apparatus, including theoretical-numerical and combined-multiple methods. Solving the problem of rational allocation of resources of the system of

aircraft operating in emergencies is associated with the following areas [7]:

1. Creation of a UAV fleet with some redundancy of aircraft that ensures guaranteed mission performance in case of failure or destruction of a part of the UAV;

2. Creation of a UAV grouping, taking into account the possibility of self-healing of the system of both the aircraft itself and the redistribution of management resources of the grouping itself.

The elements considered in (2) and (3) are interdependent. The objective function cannot be formed without identifying those variables and parameters that

determine the outcome of the operation. An in-depth analysis of the relationships and correlations between the parameters and variables is also necessary. The choice of an objective function optimization method depends entirely on the specific form of its representation, which reflects the content of the mathematical model.

In the course of the research, a structural scheme for managing a UAV flotilla was developed, taking into account the self-healing of the system in the conditions of degradation of the control system in the event of the influence of destabilizing factors and threats. The structural and functional diagram is shown in Fig. 3.

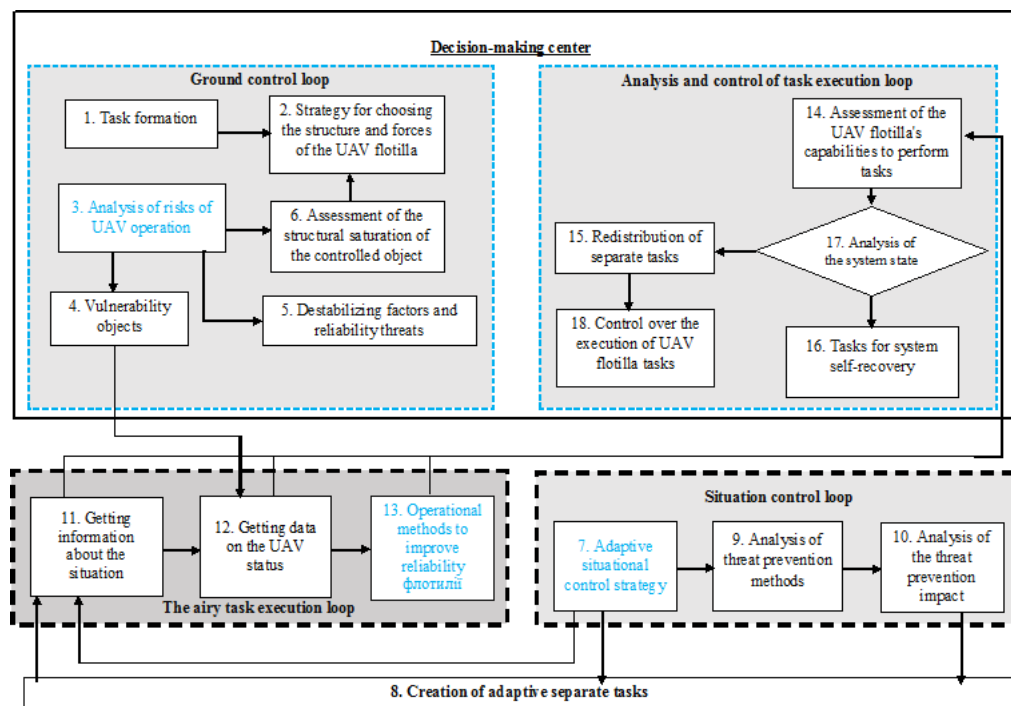


Fig. 3. Block diagram of UAV flotilla control

In the course of research, we analyzed the proposed method.

Let the probability of completing a task by a fleet of UAVs be equal to P_{comp} . Each UAV has its own task. The probability of each UAV completing its task is equal to P_i .

Assuming that a UAV flotilla contains n UAVs whose failures are random and independent events, the probability P_{comp} of the flotilla completing a task can be taken as equal to the product of the probabilities of an individual UAV completing a task [13]:

$$P_{comp} = \prod_{i=1}^n P_i.$$

When using a single UAV, taking into account the effects of obstacles, the probability of completing the task is written in the form [6]:

$$P_f = P_{int}P_c + (1 - P_{int})P_w, \quad (4)$$

where P_{int} is the probability of an interference effect on the UAV at a particular time;

P_c is the probability of UAV failure under the condition of interference;

P_w is the probability of UAV failure without interference.

The probability of UAV failure in case of interference depends on the UAV failure rate and the

adopted failure model. In known studies, a simple failure model is considered.

In the context of a UAV grouping, let's assume that if one UAV fails, its tasks are instantly assigned to another vehicle. The probability of such an event is equal to [3].

$$P_0 = P_{ci}P_{cj/i}, \tag{5}$$

where P_{ci} – the probability of failure of the i -th UAV if the UAV is affected by interference;

$P_{cj/i}$ – is the conditional probability of failure of the j -th UAV in case of interference, after the failure of the i -th UAV.

UAVs can be in one of two possible states during a task: operable or failed. In [3], it is shown that in this case of a UAV failure after it is turned on in the active mode of operation, the Bernoulli scheme can be applied. As a result, we have:

$$P = \sum_{i=t+1}^n C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i}. \tag{6}$$

Using expressions (4)–(6), we analyze the probabilities of performing a UAV task in the face of interference. Fig. 4 shows the dependence of P_f on P_c if P_w has different values.

These dependencies make it possible to justify the number of UAVs and the probability of obtaining information for analyzing the situation in the face of interference. The results obtained are taken into account in the process of emergency response.

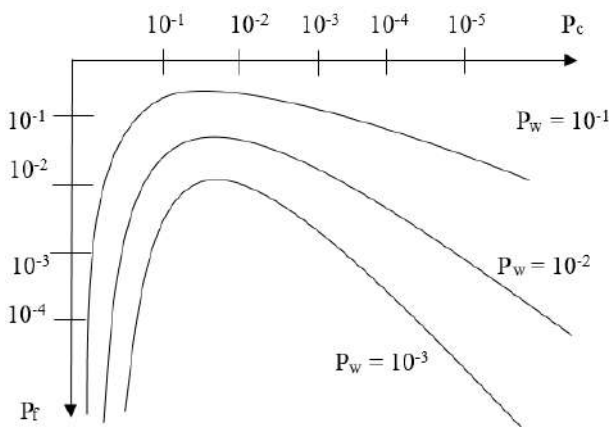


Fig. 4. Dependence of task performance on the probability of UAV failure in case of interference and when using aircraft with different reliability

Fig. 4 shows that in conditions with insignificant interference, the reliability of individual UAVs does not significantly affect the performance of tasks. As the impact of interference increases, the probability of completing tasks depends on the reliability of the aircraft.

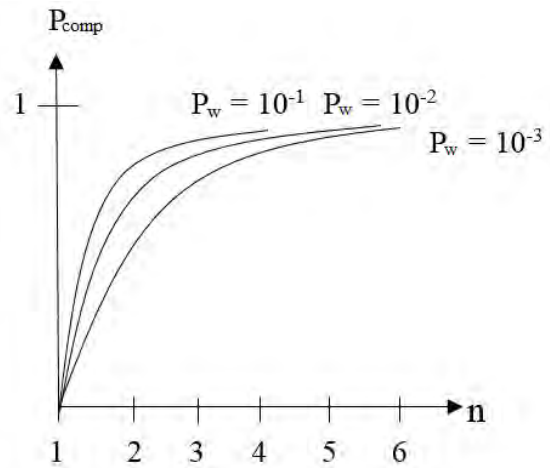


Fig. 5. Dependence of the UAV flotilla's mission performance on the number of aircraft

Implementation of the functions of reallocation of group management resources will allow efficient use of each aircraft.

Fig. 5 shows the probability of completing a task by a UAV flotilla depending on the number of aircraft. The figure demonstrates that, given the required probability of completing a task, the size of the UAV fleet depends on the reliability of the aircraft.

Conclusion

Thus, the proposed method makes it possible to substantiate the rational size of the UAV flotilla, taking into account the reliability of the aircraft and the required quality of control of the situation in emergencies. The obtained results allow us to determine the rational size of the UAV flotilla depending on the required probability of performing tasks, the growing influence of interference and the reliability of aircraft. The basis for building such a system should be unmanned aerial vehicles that work with ground and airborne control centers in emergencies.

Given the results obtained, the developers of the emergency control system can justify a strategy for choosing a rational number of UAV flotilla and the reliability of the aircraft used. The question is whether to choose a large number of cheap but less reliable UAVs, or to choose aircraft that are more reliable with a smaller number. The results of the study can serve as a basis for economic justification of the size of the UAV flotilla and the quality of the aircraft used.

References

1. Sachenko A. et al. NPP post-accident monitoring system based on unmanned aircraft vehicle: concept, design principles // *Nuclear and radiation safety*. – 2017. – №. 1 (73). P. 24–29. DOI:10.32918/nrs.2017.1(73).04
2. An Internet of Drone-based multi-version postsevere accident monitoring system: structures and reliability / Fesenko H., Kharchenko V., Sachenko A. et al. Dependable IoT for human and industry modeling, architecting, implementation (Kharchenko V., Kor A., Rucinski A. eds.). *Denmark, The Netherlands: River Publishers*, 2018. P. 197–217. DOI: 10.1201/9781003337843-12
3. Stekolnikov Y. I. Survivability of systems / Y. I. Stekolnikov. – St. Petersburg: *Polytechnic*, 2002, 155 p.
4. Babak S. V. Environmental monitoring of nuclear power plants using video surveillance systems and exposure dose rate measurement based on an unmanned 55 aircraft complex. *Information processing systems*. 2015. Rel. 7 (132). P. 190–194.
5. Zabulonov Y. L., Burtnyak V. M., Odukalets L. A. System for effective remote control and monitoring of radiation situation based on Unmanned Aerial Vehicle. *Science and Innovation*. 2017. № 4(13). P. 46–53. DOI: 10.15407/scine13.04.040.
6. Tahtawi A., Andika E., Yusuf M., Harjanto W. Design of quadrotor UAV and Internet-of-Things based air pollution monitoring systems. *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 4. P. 120–126. DOI: 10.22146/ijitee.5120.
7. Fesenko G. V., Lyashenko G. A., Cherepnyov I. A. Use of a combinatorial approach to assessing the survivability of a fleet of unmanned aerial vehicles when performing monitoring of potentially dangerous objects. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture*, Rel. 203 "Problems of energy supply and energy saving in the agricultural sector of Ukraine". 2019. P. 152–154.
8. Lebediev V. O. Methodology of risk analysis in information systems. *Collection of scientific works: "Modern information systems" STJ*. – K.: National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 2021 y. Vol 5, №4, P. 60–63.
9. Petritoli E., Leccese F., Ciani L. Reliability assessment of UAV systems // *2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. – IEEE, 2017. – P. 266–270. DOI:10.1109/MetroAeroSpace.2017.7999577
10. Hildmann H., Kovacs E. Using unmanned aerial vehicles (UAVs) as mobile sensing platforms (MSPs) for disaster response, civil security and public safety // *Drones*. – 2019. – T. 3. – №. 3. – 59 p. DOI:10.3390/drones3030059
11. Petritoli E., Leccese F., Ciani L. Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles // *Sensors*. – 2018. – T. 18. – №. 9. – 3171 p. DOI:10.3390/s18093171
12. Semenov, S., & Zhang, M. J. (2022), "Comparative studies of methods for improving the cyber security of unmanned aerial vehicles with the built-in ADS-B system", *Advanced Information Systems*, 6 (4), P. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.4.10>.
13. Kharchenko V. A., Fesenko H. N. Doukas Stochastic continues-time model of the drone fleet: research of survivability and choice of parameters. *International Journal of Instrumentation and Measurement*. 2017. Vol. 2. P. 25–30.
14. Kharchenko V. An approach to the drone fleet survivability assessment based on a combinatorial model / V. Kharchenko, H. Fesenko, N. Bardis // *Math. Methods and Computational Techniques in Sci. and Eng. (MMCTSE 2018): Proc. AIP Conf.* 2018. Vol. 1982. P. 47–49. DOI:10.1063/1.5045453
15. Zhurahivskiy A. V. Reliability of electric power systems and electric networks: textbook / A. V. Zhurahivskiy, S. V. Kazanskyi, Y. P. Mateyenko, O. R. Pastukh. – Kyiv: *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ed. "Polytechnic"*, 2017. – 456 p. – Bibliography. P. 450–452. ISBN 978-966-622-86

Рубан Ігор Вікторович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, перший проректор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; ihor.ruban@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4738-3286>

Лебедєв Валентин Олегович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харків, Україна; valentyn.lebediev@nure.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0095-7481>

Ruban Igor – First Vice-Rector, Doctor of Technical Sciences, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

Lebediev Valentyn – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student of the Department of Electronic Computers, Kharkiv, Ukraine.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ЧИСЕЛЬНОСТІ ФЛОТИЛІЇ БПЛА З УРАХУВАННЯМ НАДІЙНОСТІ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

Проведені дослідження показали, що в Україні та за кордоном ініційовано проекти аналізу й оцінювання виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури. Мета інформаційної системи управління – формування даних для розроблення архітектури, демонстраційної аналітики та прототипу можливостей підтримки прийняття рішень з урахуванням використання наявних на сьогодні даних і аналітичних методологій. Основою побудови такої системи можуть бути безпілотні літальні апарати (БПЛА), що працюють із наземними й повітряними пунктами керування в надзвичайних ситуаціях. **Предметом** дослідження є методи визначення раціональної чисельності флотилії БПЛА з урахуванням покладених завдань та характеристик. Нині відсутній метод визначення раціональної чисельності флотилії БПЛА з урахуванням надійності літального апарата. **Актуальним науково-технічним завданням** є створення раціональної чисельності флотилії БПЛА з урахуванням надійності літального апарата та необхідної якості контролю обстановки в умовах надзвичайних ситуацій. **Мета статті** – розробити метод визначення раціональної чисельності флотилії БПЛА з урахуванням надійності літального апарата й необхідної якості контролю обстановки в умовах надзвичайних ситуацій. **Методи** дослідження: положення теорії ризиків, теорії ймовірності, комбінаторики, математичного апарату теорії надійності, математичних методів оптимізації. **Результати досліджень:** проаналізовано чинники, що впливають на структуру угруповання БПЛА; отримано залежності виконання завдання від ймовірності виходу з ладу БПЛА під час дії дестабілізаційних факторів; показано, що в умовах з незначною дією перешкод надійність окремих БПЛА істотно не впливає на виконання поставлених завдань; установлено, що зі зростанням впливу перешкод ймовірність виконання завдань залежить від надійності літального апарата. **Висновки:** запропонований метод дає змогу створити раціональну чисельність флотилії БПЛА з урахуванням надійності літального апарата й необхідної якості контролю обстановки за умови раціональної кількості БПЛА під час надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: управління флотилією БПЛА; угруповання БПЛА; раціональна чисельність; надзвичайні ситуації; надійність функціонування.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Рубан І. В., Лебедєв В. О. Метод визначення раціональної чисельності флотилії БПЛА з урахуванням надійності літального апарата. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 108–114. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.108>

Ruban, I., Lebediev, V. (2023), "Method for determining the rational number of UAV flotilla taking into account the reliability of the aircraft", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 108–114. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.108>

О. Черняк, Н. Сороколат, В. Бурдейна, Л. Фатєєва, І. Багаєв

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СЕРЕДНІХ ПРЯМОКУТНИКІВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА БЕЗПЕКИ ПРАЦІ

Предметом дослідження є метод визначення комплексного показника безпеки праці. **Мета роботи** – розроблення методики отримання комплексної оцінки безпеки праці з урахуванням особливостей шкідливих і небезпечних виробничих чинників. У статті вирішується таке **завдання**: дослідити можливість застосування методу чисельного інтегрування для отримання комплексного показника безпеки праці, тобто використати принцип визначення площі та об'єму під криволінійними поверхнями як на площині, так і в просторі, що створені шляхом об'єднання оцінок одиничних показників шкідливих чинників на безрозмірній шкалі. Застосовуються **методи** кваліметрії та математичної статистики. Здобуто такі **результати**: проаналізовано низку сучасних наукових праць, у яких розглянуто кількісне оцінювання якості об'єктів кваліметрії різної природи, що мають неоднакові показники якості та різні шкали вимірювання; обґрунтовано необхідність оцінювання безпеки праці на робочому місці. Унаслідок аналізу сучасних наукових досліджень доведено актуальність теми й визначено необхідність розроблення методики отримання комплексного показника безпеки праці, буде придатна для оцінювання умов праці на будь-якому виробництві. Для отримання комплексного показника безпеки праці запропоновано встановити оцінку за кожним шкідливим виробничим чинником, а потім визначити єдину оцінку, враховуючи всі характеристики. Для визначення комплексного показника шкідливого виробничого чинника рекомендовано застосувати метод інтегрування, тобто знайти площу під ламаною поверхнею, отриману внаслідок з'єднання точок на площині системи координат ХОУ. Для цього застосовано квадратурні формули з використанням методу середніх прямокутників. Запропоновано покроковий алгоритм визначення комплексного показника безпеки праці з допомогою інтегрування методом середніх прямокутників. Апробовано методику визначення комплексного показника безпеки праці на виробництві. Визначено шкідливі чинники на виробництві, отримано дійсні показники та визначені їх оцінки на безрозмірній шкалі. Графічно побудовано часовий ряд змін показників шкідливих чинників з плином часу. Визначено комплексний показник безпеки праці на виробництві для прийняття рішення щодо подальших дій для поліпшення умов праці. **Висновки**: для комплексного оцінювання безпеки праці на виробництві запропоновано застосовувати кваліметричні методи, а саме: визначати оцінку за кожним шкідливим і небезпечним виробничим чинником, після цього визначати єдину комплексну оцінку умов праці. Описано методику винайдення комплексного показника безпеки праці із застосуванням чисельного інтегрування методом середніх прямокутників. Запропонована методика вважається універсальною, оскільки її можна застосовувати для будь-яких приміщень і підприємств.

Ключові слова: кваліметрія; комплексний показник; оцінювання; метод інтегрування; метод середніх прямокутників; безпека праці.

Вступ

У сучасних умовах посилюється адаптація українського законодавства до міжнародного та європейського. Водночас частіше застосовується в Україні світовий досвід і поглиблюється міжнародне співробітництво у сфері безпеки й гігієни праці. Наслідком цього є підвищення промислової безпеки, попередження нещасних випадків і аварій, посилення профілактики виробничого травматизму й професійних захворювань. Необхідним інструментом інтеграції України до ЄС та підвищення ефективності дій суб'єктів господарювання щодо запобігання травматизму є використання стандартів, запроваджених в Україні Міжнародною організацією зі стандартизації (ISO).

Стандарт ДСТУ ISO 45001:2019 "Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці.

Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT)" установлює вимоги до системи управління охороною здоров'я та безпекою праці (ОЗіБП), а також містить настанови щодо їх використання. Це необхідно, щоб дати змогу організації створювати безпечні та здорові умови праці на робочому місці, запобігати травмам і погіршенню стану здоров'я працівників та активно вдосконалювати діяльність у сфері ОЗіБП.

Однак стандарт не містить конкретних методів оцінювання, тобто кожне підприємство самостійно має вирішувати питання щодо вибору механізму оцінювання. Для ефективного забезпечення безпеки праці на підприємстві необхідно розробити науково обґрунтовані методики й процедури оцінювання рівня безпеки. Необхідно, щоб вони були уніфіковані та мали статус нормативного документа. Такий підхід

дасть змогу ефективно вирішувати питання забезпечення безпеки праці на підприємствах.

На практиці оцінювання умов праці зводиться до ідентифікації шкідливих і небезпечних чинників, пов'язаних із трудовою діяльністю, та встановлення кількісного ступеня ризику порушення здоров'я працівника. Для належного прогнозування та мінімізації шкідливих і небезпечних чинників необхідно, щоб їх оцінки мали кількісний вираз.

Методи кваліметрії використовують для отримання кількісних показників якості різних об'єктів, зокрема системи шкідливих виробничих чинників, що можуть вплинути на здоров'я та життя працівників. Кваліметрія є наукою, що вивчає методологію кількісної оцінки якості об'єктів і процесів різної природи. Розглянемо систему шкідливих і небезпечних виробничих чинників як об'єкт кваліметрії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наявний рівень механізації та автоматизації на виробничих підприємствах зумовлює вплив на працівників комплексу шкідливих чинників виробничого середовища та трудового процесу: вібрація, шум, промислові аерозолі, хімічні речовини, нервово-психічне напруження, переміщення та підйом вантажу вручну, фіксована та вимушена робоча поза тощо [1]. Шкідливі виробничі чинники праці можуть формувати професійні та розвивати загальні захворювання [2, 3]. Отже, механізм забезпечення безпеки праці на виробничих підприємствах має передбачати ідентифікацію та кількісне оцінювання явних і потенційних небезпек для їх прогнозування й запобігання.

Визначення комплексного показника безпеки праці пов'язане з отриманням єдиної оцінки, яка кількісно виражає безпеку через окремі показники. У кваліметрії математична залежність є невід'ємною частиною багатьох процесів оцінювання та порівняння різноманітних показників. Наприклад, у роботі [4] використовуються математичні залежності для оцінювання якості інвестицій, враховуючи реальні значення інвестицій та їх оцінки на безрозмірній шкалі. Автори праці [5] застосовують кваліметричний підхід до оцінювання особистих і професійних якостей персоналу виробничого підприємства, а в роботі [6] запропоновано оцінювати кількісні характеристики комплексного безпекового показника якості, що дасть змогу визначити миттєвий

стан безпеки системи та її стан у певний період часу. У науковому дослідженні [7] використовується нечітка логіка (*Fuzzy Logic*) та метод розгортання функцій якості (QFD) для кваліметричного оцінювання наданої споживачу послуги. У роботах [8–10] для оцінювання показників процесів безпеки й гігієни праці застосовуються різні функціональні залежності між вимірними показниками небезпечних чинників та їх оцінкою на безрозмірній шкалі. Отже, методики, в яких використовуються математичні залежності, є ефективним інструментом для оцінювання, порівняння та розв'язання складних завдань у різних галузях. Вони мають більш точне застосування значень різних показників і забезпечують об'єктивність та наукову точність у проведених дослідженнях [11–13].

Мета роботи – розробити методику отримання комплексної оцінки безпеки праці з урахуванням особливостей шкідливих і небезпечних виробничих чинників.

Вирішення завдання

Для комплексного оцінювання безпеки праці пропонується визначити показник за кожним шкідливим і небезпечним виробничим чинником, у подальшому визначити комплексну оцінку безпеки праці. Для цього пропонується використовувати метод чисельного інтегрування.

Спочатку необхідно оцінити кожний шкідливий і небезпечний чинник і отримати часовий ряд їх змін із плином часу. На рис. 1 показано кількісні значення відносної вологості повітря. Показник вимірювався та фіксувався в робочій зоні цеху машинобудівного підприємства.

Залежність, яку пропонується застосувати для отримання оцінки показників шкідливих чинників на безрозмірній шкалі (від 0 до 1) має вигляд [14]:

$$S_q = \begin{cases} 0 & (r) \\ \frac{q_i - q_{i \min}}{q_{i \max} - q_{i \min}} & q_i \leq q_{i \min} \\ 1 & q_i \geq q_{i \max} \end{cases}; \quad q_{i \min} < q_i < q_{i \max}, \quad (1)$$

де q_i – дійсне значення показника шкідливого чинника; $q_{i \min}$ – мінімальне допустиме значення показника шкідливого чинника; $q_{i \max}$ – максимальне допустиме значення показника шкідливого чинника; r – параметр форми, що змінює форму залежності.

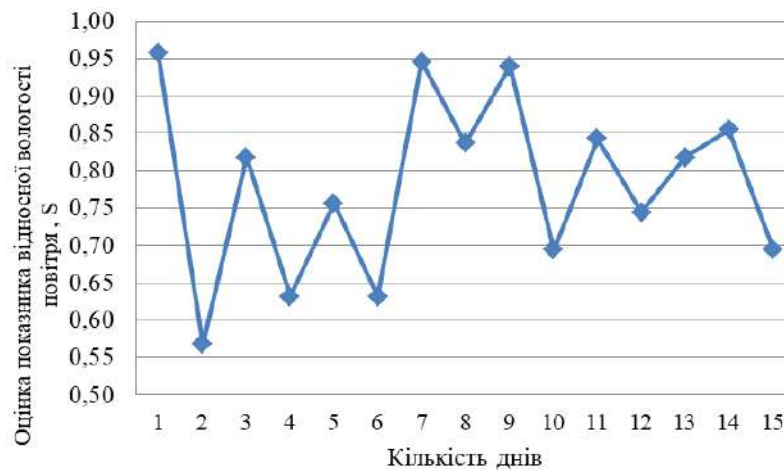


Рис. 1. Часовий ряд зміни оцінок

Якщо оптимальний (найкращий) показник шкідливого чинника спрямовується до середини межі допустимих значень, то залежність матиме вигляд:

$$S_q = \begin{cases} \left[\frac{q_i - q_{i\min}}{t_i - q_{i\min}} \right]^{(r)} & q_{i\min} \leq q_i \leq t_i \\ \left[\frac{q_i - q_{i\max}}{t_i - q_{i\max}} \right]^{(r)} & t_i < q_i \leq q_{i\max} \\ 0 & q_{i\min} > q_i > q_{i\max} \end{cases}, \quad (2)$$

де t_i – середина межі допустимих значень.

Для визначення комплексного показника безпеки праці пропонується застосувати метод чисельного інтегрування, тобто потрібно знайти площу під ламаною поверхнею, яка будується внаслідок об'єднання оцінок показників на безрозмірній шкалі протягом певного часу спостережень. Для цього застосовуємо квадратурні формули відповідно до методу середніх прямокутників.

Розглянемо докладно метод прямокутників для наближеного обчислення певного інтеграла [15]. Сутність методу середніх прямокутників у графічному вигляді показано на рис. 2.

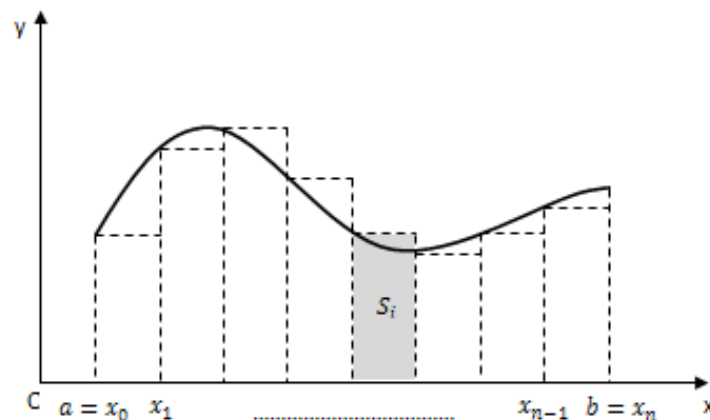


Рис. 2. Графічна ілюстрація методу середніх прямокутників

Якщо відрізок інтегрування $[a; b]$ розбити на рівні частини довжини h точками: $a = x_0$, $x_1 = x_0 + h$, $x_2 = x_0 + 2h$, $x_3 = x_0 + 3h$, ..., $x_{(n-1)} = x_0 + (n-1)h$, $x_n = x_0 + nh = b$, і точками ξ_i вибрати середини

елементарних відрізків $(h = x_{i-1}; x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, то можна записати інтеграл у вигляді:

$$\int_a^b f(x) dx \approx h \sum_{i=1}^n f\left(x_{i-1} + \frac{h}{2}\right). \quad (3)$$

Формулу (3) називають формулою методу середніх прямокутників через спосіб вибору точок ξ_i з кроком розбиття відрізка $[a; b]$

$$h = (b - a) / n. \quad (4)$$

Для обчислення площі під ламаною лінією (рис. 2) необхідно знайти площу прямокутників:

$$S_i = f(\xi_i)h. \quad (5)$$

Складемо площі всіх прямокутників:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{n} \cdot (f(\xi_1) + f(\xi_2) + \dots + f(\xi_n)). \quad (6)$$

Абсолютна похибка формули прямокутників на відрізку $[a; b]$ дорівнює сумі похибок на кожному елементарному інтервалі, тому [15]:

$$\delta_n = \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} (f(x) - f(x_{i-1} + h/2)) dx. \quad (7)$$

Для визначення комплексної оцінки безпеки праці на виробництві протягом певного періоду часу вимірювання їх одиничних показників пропонується застосувати таку формулу:

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f(x_i, y_j) \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} dx \int_{y_{j-1/2}}^{y_{j+1/2}} dy, \quad (8)$$

де $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$.

У цьому разі отримуємо об'єм під криволінійною поверхнею, що і буде комплексною оцінкою безпеки праці.

Пропонується методика визначення комплексної оцінки умов праці, що складається з кількох кроків:

Крок 1. Вимірюються дійсні показники шкідливих і небезпечних чинників в одиницях їх вимірювання.

Крок 2. Використовуючи одну із залежностей (1) або (2), визначають оцінки показників шкідливих чинників на безрозмірній шкалі.

Крок 3. Застосовуючи формулу (4), визначають величину кроку інтегрування, сума яких дорівнює 1.

Крок 4. Будують часовий ряд зміни оцінки шкідливих чинників із часом у вигляді, показаному на рис. 1.

Крок 5. Використовуючи формулу (5), визначають площу кожного прямокутника.

Крок 6. Застосовуючи формулу (6), визначають площу під ламаною лінією. Ця площа буде узагальненою оцінкою шкідливого чинника.

Крок 7. З допомогою формули (6) визначають площі під ламаними лініями за всіма критеріями.

Крок 8. Використовуючи формулу (8), визначають об'єм під ламаною площиною, яка будується внаслідок об'єднання всіх оцінок одиничних критеріїв показників шкідливих чинників протягом певного проміжку часу. Величина об'єму під ламаною площиною буде комплексною оцінкою умов праці на виробництві з плином часу.

Для підтвердження працездатності методики з оцінювання безпеки праці проведено дослідження на машинобудівному підприємстві. З метою оцінювання розглядалися шкідливі виробничі чинники в цеху. Визначено, що основними шкідливими виробничими чинниками в цеху є мікроклімат (температура повітря, відносна вологість повітря, швидкість руху повітря), шум, локальна вібрація.

Значення згаданих чинників вимірювалися й фіксувалися на робочих місцях та у виробничій зоні. Для вимірювання температури повітря, відносної вологості повітря та швидкості руху повітря використано комбінований прилад FLIR EM54. Вимірювання рівня шуму та загальної вібрації здійснювалося цифровим вимірником рівня звуку GM1351 та віброметром AR63A (GM63A). Допустимі норми шкідливих чинників визначено на підприємстві відповідно до нормативних документів.

Отримані експериментальні значення наведених вище показників шкідливих чинників і результати математичних перетворень наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати впровадження методики оцінювання безпеки праці

Температура повітря, °C		Відносна вологість повітря, %		Швидкість руху повітря, м/с		Шум, дБа		Локальна вібрація, м/с ²	
q_i	S	q_i	S	q_i	S	q_i	S	q_i	S
25,00	0,93	72,67	0,96	0,10	0,62	67,67	0,62	0,75	0,72
22,00	0,99	51,67	0,57	0,10	0,61	72,67	0,80	0,85	0,68
24,67	0,94	65,00	0,82	0,07	0,55	65,00	0,50	0,71	0,74
26,67	0,88	55,00	0,63	0,09	0,59	66,33	0,56	0,95	0,64
20,33	0,99	61,67	0,76	0,10	0,62	71,67	0,76	0,52	0,81
27,67	0,84	55,00	0,63	0,09	0,60	67,33	0,61	0,69	0,74
25,00	0,93	72,00	0,95	0,13	0,67	62,67	0,37	0,90	0,66
23,33	0,97	66,00	0,84	0,10	0,61	71,00	0,74	0,53	0,81
22,33	0,98	71,67	0,94	0,06	0,52	71,67	0,76	0,81	0,69
27,00	0,87	58,33	0,69	0,11	0,63	70,67	0,73	0,48	0,83

Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2023. №1 (23)

Будемо часовий ряд змін оцінки за кожним шкідливим виробничим чинником (рис. 3).

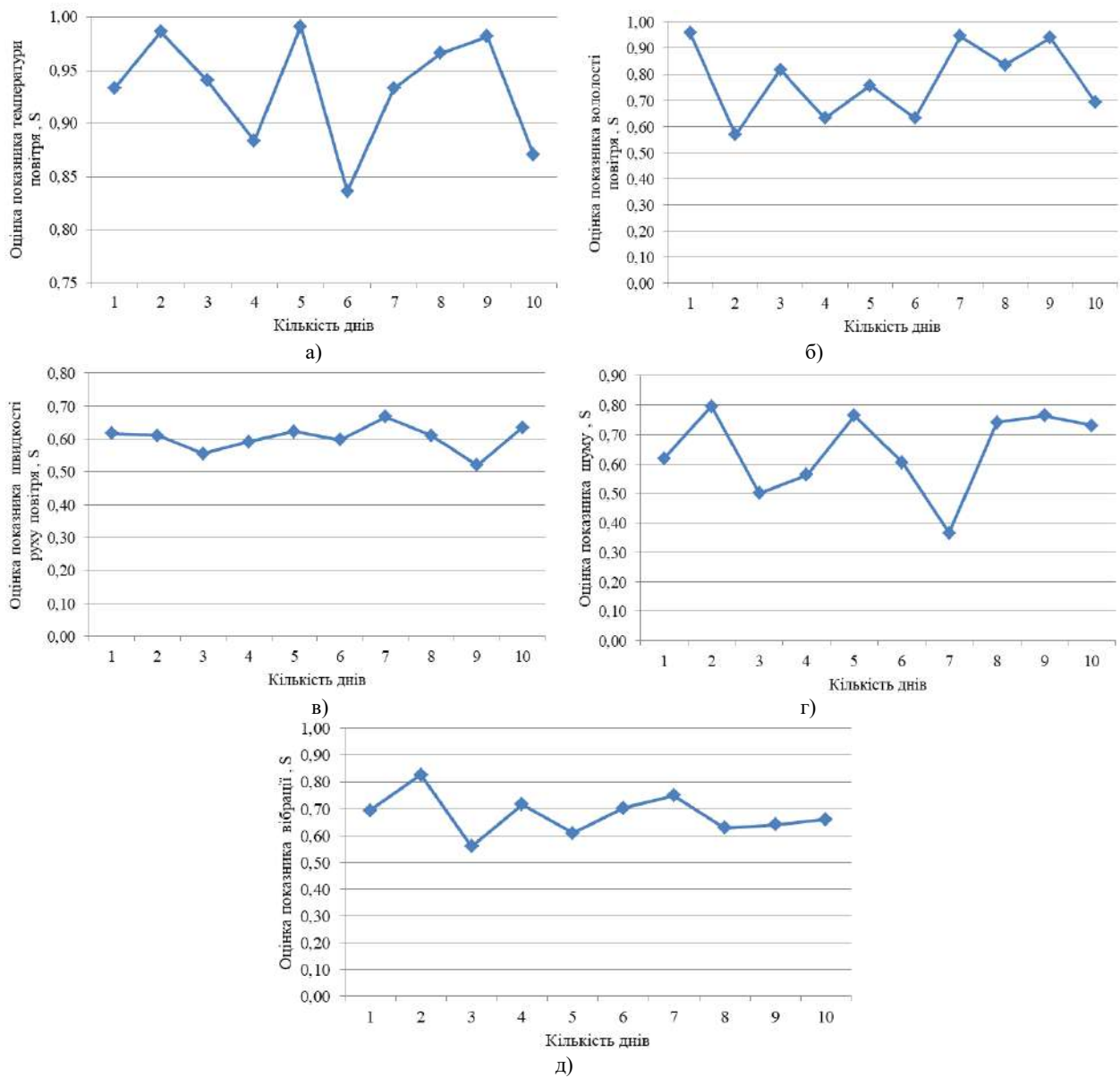


Рис. 3. Часовий ряд зміни оцінок: а) температури повітря; б) відносної вологості повітря; в) швидкості руху повітря; г) шуму; д) локальної вібрації

На рис. 4 показано ламану поверхню за умови об'єднання всіх часових рядів зміни показників шкідливих чинників.

Знайдемо комплексний показник, застосувавши формулу (8).

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f(x_i, y_j) \int_{x_i-y_j}^{x_i+y_j} dx \int_{y_j-y_j}^{y_j+y_j} dy = 0,78.$$

У цьому разі отримаємо об'єм під криволінійною поверхнею, що й буде комплексним показником безпеки праці на виробництві.

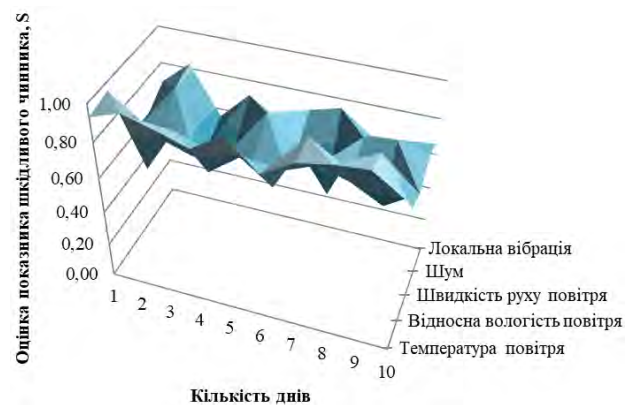


Рис. 4. Часовий ряд усіх оцінок показників шкідливих чинників

Висновки

Для комплексного оцінювання безпеки праці на виробництві запропоновано застосовувати кваліметричні методи, а саме: визначати оцінку за кожним шкідливим і небезпечним виробничим чинником, після цього визначати єдину комплексну оцінку умов праці. Описано методику винайдення комплексного показника безпеки праці з використанням чисельного інтегрування методом середніх прямокутників. Запропоновану методику

вважаємо універсальною, оскільки її можна застосовувати для будь-яких приміщень і підприємств.

Для подальшого розвитку поставленого завдання необхідно розглянути застосування інших методів визначення комплексного показника безпеки праці й математичних залежностей між вимірними показниками шкідливих чинників та їх оцінкою на безрозмірній шкалі. Доцільно було б розробити комп'ютерну програму з використанням запропонованої методики, що дасть змогу автоматизувати процес оцінювання.

Список літератури

1. Kukhar V., Yelistratova N., Burko V. Nizhelska Y., Aksionova O. Estimation of occupational safety risks at energetic sector of Iron and Steel Works. *International Journal of Engineering Technology*. 2018. №7. P. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11922>
2. Schulte P. A. Characterizing the Burden of Occupational Injury and Disease. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2005. № 47. P. 607–622. DOI: <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000165086.25595.9d>
3. Schulte P. A., Delclos G., Felkner S. A., Chosewood L. C. Toward an Expanded Focus for Occupational Safety and Health: A Commentary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. №16. 4946. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16244946>
4. Trishch R., Sichinava A., Bartoš V., Stasiukynas A., Schieg M. Comparative assessment of economic development in the countries of the european union. *Journal of Business Economics and Management*. 2023. № 24(1). P. 20–36. DOI: <https://doi.org/10.3846/jbem.2023.18320>
5. Сльникова Г. В., Горбенко Л. В. Кваліметричний підхід до оцінки персоналу виробничого підприємства. *Адаптивне управління: теорія і практика. Економіка*. 2018. № 5.
6. Рудик Ю. І. Оцінювання безпеки складних організаційно-технічних систем кваліметричними методами з урахуванням ризиків: дис. д-ра техн. наук: 05.01.02 "Стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення". 2021. Львів, 312 с.
7. Бойко Т. Г., Мельник В. В. Кваліметричне оцінювання інтернет-магазинів з використанням FUZZY logic та QFD. *Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво: матеріали I міжнар. наук.-практ. конф., м. Суми, 17–20 травня 2016 р. Суми, 2016. С. 38–40.*
8. Trishch R., Cherniak O., Kupriyanov O., Luniachek V., Tsykhanovska I. Methodology for multi-criteria assessment of working conditions as an object of qualimetry. *Engineering Management in Production and Services*. 2021. №13 (2). P. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.2478/emj-2021-0016>.
9. Черняк О. М., Сороколат Н. А., Багаєв І. О., Фатєєва Л. Ю. Застосування функціональної залежності для багатокритеріального оцінювання безпеки праці, як об'єкта кваліметрії. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 1 (19). С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.076>
10. Сороколат Н. А., Фатєєва Л. Ю. Оцінювання якості процесів системи управління безпекою праці, згідно вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018. *Машинобудування*. 2022. № 29. С. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-89-96>
11. Argotti Y., Baron C., Esteban P. Quality quantification in Systems Engineering from the Qualimetry Eye. *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2019. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2019.8836756>.
12. Кім Н. І. Узагальнений показник якості об'єктів кваліметрії різної природи. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2021. Вип. 1. С. 94–101. DOI: [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1\(109\)-12](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1(109)-12)
13. Ginevicius R., Trishch H., Petraskevicius V. Quantitative assessment of quality management systems' processes. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 2015. №28(1). P. 1096–1110. DOI: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1087676>
14. Черняк О. М., Лис Ю. С., Грінченко Г. С., Каницька І. В. Багатокритеріальне оцінювання умов праці на виробництві. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. 2020. № 3 (5). С. 28–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2020.01.04>
15. Крилик Л. В., Богач І. В., Лісовенко А. І. Чисельні методи. *Чисельне інтегрування функцій: навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2019. 74 с.

References

1. Kukhar, V., Yelistratova, N., Burko, V. Nizhelska, Y., Aksionova, O. (2018), "Estimation of occupational safety risks at energetic sector of Iron and Steel Work". *International Journal of Engineering Technology*, No. 7, P. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11922>
2. Schulte, P. A. (2005), "Characterizing the Burden of Occupational Injury and Disease". *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, No. 47, P. 607–622. DOI: <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000165086.25595.9d>.

3. Schulte, P. A., Delclos, G., Felknor, S. A., Chosewood, L. C. (2019), "Toward an Expanded Focus for Occupational Safety and Health: A Commentary". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, No. 16, 4946. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16244946>
4. Trishch, R., Sichinava, A., Bartoš, V., Stasiukynas, A., Schieg, M. (2023), "Comparative assessment of economic development in the countries of the european union". *Journal of Business Economics and Management*, No 24(1), P. 20–36. DOI: <https://doi.org/10.3846/jbem.2023.18320>
5. Yelnykova, H., Horbenko, L. (2018), "Qualimetric approach to the staff estimation of the industrial enterprise" ["Kvalimetrychnyi pidkhid do otsinky personalu vyrobnychoho pidpriemstva"], *Adaptive management: theory and practice. Economy*, No. 5.
6. Rudyk, Y. I (2021), "Safety assessment of complex organizational and technical systems by risk-based qualimetric methods" ["Otsiniuvannya bezpeky skladnykh orhanizatsiino-tekhnichnykh system kvalimetrychnymy metodamy z urakhuvanniam ryzykiv"], dissertation of doctor of technical sciences: 05.01.02 "Standardization, certification and metrological support", Lviv, 312 p.
7. Boiko T. H., Melnyk B. B. (2016), "Qualitative evaluation of online stores using FUZZY logic and QFD" ["Kvalimetrychne otsiniuvannya internet-mahazyniv z vykorystanniam FUZZY logic ta QFD"]. *Systems of development and delivery of products for production: materials of the 1st international science and practice conference*, May 17–20, Sumy. Sumy, P. 38–40.
8. Trishch, R., Cherniak, O., Kupriyanov, O., Luniachek, V., Tsykhanovska, I. (2021), "Methodology for multi-criteria assess-ment of working conditions as an object of qualimetry". *Engineering Management in Production and Services*, No. 13 (2), P. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.2478/emj-2021-0016>
9. Cherniak, O., Sorocolat, N., Bahaiev, I., Fatieieva, L. (2022), "Application of functional dependence for multi-criterial assessment of labor safety as an object of qualimetry" ["Zastosuvannya funktsionalnoi zalezhnosti dlia bahatokryterialnoho otsiniuvannya bezpeky pratsi, yak obiekta kvalimetrii"], *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (19), P. 76-84. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.076>
10. Sorocolat, N., Fatieieva, L. (2022), "Quality assessment of the occupational safety management system processes according to the requirements of the ISO 45001:2018 international standard" ["Otsiniuvannya yakosti protsesiv systemy upravlinnia bezpekoiu pratsi, zghidno vymoh mizhnarodnoho standartu ISO 45001:2018"], *Engineering*, No. 29, P. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-89-96>
11. Argotti, Y., Baron, C., Esteban, P. (2019), "Quality quantification in Systems Engineering from the Qualimetry Eye". *2019 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/SYSCON.2019.8836756>.
12. Kim, N. I. (2021), "Generalized indicator of qualimetry objects quality of various nature" ["Uzahal'nenyy pokaznyk yakosti ob'yektiv kvalimetriyi riznoyi pryrody"], *Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Coast*, No. 1, P. 94–101. DOI: [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1\(109\)-12](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2021-1(109)-12).
13. Ginevičius, R., Trishch, H. Petraškevičius, V. (2015), "Quantitative assessment of quality management systems' processes", *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, No. 28:1, P. 1096–1110. DOI: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1087676>.
14. Cherniak, O., Lys, Y., Hrinchenko, H., Kanytska, I. (2020), "Multicriteria assessment of working conditions in the workplace" ["Bahatokryterialne otsiniuvannya umov pratsi na vyrobnytstvi"], *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, No. 3 (5), P. 28–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2020.01.04>.
15. Krylyk, L. V., Bogach, I. V., Lisovenko, A. I. (2019), *Chyselni metody. Chyselne intehruvannya funktsii: navchalnyi posibnyk*. [Numerical methods. Numerical integration of functions: a tutorial], Vinnytsia: VNTU, 74 p.

Received 26.03.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Черняк Олена Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, старший викладач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харків, Україна; e-mail: olena-cherniak@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6167-8809>

Сороколат Наталія Андріївна – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харків, Україна; e-mail: n.a.sorokolat@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0140-9364>

Бурдейна Вікторія Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри мехатроніки та електротехніки, Харків, Україна; e-mail: zamorskavika@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0026-1900>

Фатєєва Ліна Юрївна – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харків, Україна; e-mail: linafat81@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6460-0772>

Багаєв Ігор Олександрович – Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, Харків, Україна; e-mail: i.a.bagayev@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9101-5114>

Cherniak Olena – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Senior Lecturer of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Sorocolat Nataliia – Engineering Pedagogics Academy, Postgraduate Student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Burdeina Viktoriia – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Associate Professor of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Fatieieva Lina – Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Postgraduate Student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Bahaiev Ihor – Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Postgraduate Student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies, Kharkiv, Ukraine.

APPLICATION OF THE METHOD OF AVERAGE RECTANGLES TO OBTAIN A COMPLEX INDICATOR OF LABOR SAFETY

The **subject matter** of the article is the method of determining comprehensive indicator of labor safety. The **goal** of the work is to develop a methodology for obtaining a comprehensive assessment of labor safety, taking into account the characteristics of harmful and dangerous production factors. The article solves the following **task**: to investigate the possibility of applying the method of numerical integration to obtain a comprehensive indicator of occupational safety, that is, to apply the principle of determining the area and volume under curved surfaces both on the plane and in space, which are created by combining estimates of unit indicators of harmful factors on a dimensionless scale. **Methods** are used: qualimetry and mathematical statistics. The following **results** were obtained: a number of modern scientific works were considered, substantiating the need to assess occupational safety at the workplace. A number of modern scientific works related to the quantitative assessment of the quality of qualimetric objects of different nature, which have different quality indicators and different measurement scales, have been analyzed. As a result of the analysis, the relevance of the topic has been proven and the need to develop a methodology for obtaining a comprehensive assessment of labor safety, which will be suitable for assessing working conditions at any production, has been determined. In order to obtain a comprehensive index of labor safety, it is proposed to determine an estimate for each harmful production factor, and then to determine a single estimate, taking into account all characteristics. To determine the complex indicator of a harmful production factor, it is proposed to apply the integration method, that is, to find the area under the broken surface, which resulted from the connection of points on the plane of the XOY coordinate system. For this, quadrature formulas using the method of average rectangles are used. A step-by-step algorithm for determining the comprehensive indicator of labor safety, using integration by the method of average rectangles, is proposed. The method of determining the comprehensive indicator of labor safety in production was tested. Harmful factors in production were determined, valid indicators were obtained and their estimates on a dimensionless scale were determined. A time series of changes in indicators of harmful factors over time is graphically constructed. A comprehensive indicator of occupational safety in production was determined as a basis for making decisions regarding further actions to improve working conditions. **Conclusions**: It is suggested to use qualitative methods for comprehensive assessment of labor safety in production. Namely, to determine an assessment for each harmful and dangerous production factor and, then, to determine a single comprehensive assessment of working conditions. The method of determining the complex indicator of labor safety, using numerical integration by the method of average rectangles, is proposed. The proposed method can be considered universal, as it can be used for any premises and enterprises.

Keywords: qualimetry; complex indicator; assessment; integration method; middle rectangle method; labor safety.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Черняк О. М., Сороколат Н. А., Бурдейна В. М., Фатєєва Л. Ю., Багаєв І. О. Застосування методу середніх прямокутників для отримання комплексного показника безпеки праці. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.115>

Cherniak, O., Sorocolat N., Burdeina, V., Fatieieva, L., Bahaiev, I. (2023), "Application of the method of average rectangles to obtain a complex indicator of labor safety", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.115>

D. SHEVCHENKO, M. UGRYUMOV, S. ARTIUKH

MONITORING DATA AGGREGATION OF DYNAMIC SYSTEMS USING INFORMATION TECHNOLOGIES

The subject matter of the article is models, methods and information technologies of monitoring data aggregation. The **goal** of the article is to determine the best deep learning model for reducing the dimensionality of dynamic systems monitoring data. The following **tasks** were solved: analysis of existing dimensionality reduction approaches, description of the general architecture of vanilla and variational autoencoders, development of their architecture, development of software for training and testing of autoencoders, conducting research on the performance quality of autoencoders for the problem of dimensionality reduction. The following models and **methods** were used: data processing and preparation, data dimensionality reduction. The software was developed using the Python language. Scikit-learn, Pandas, PyTorch, NumPy, argparse and others were used as auxiliary libraries. Obtained **results**: the work presents a classification of models and methods for dimensionality reduction, general reviews of vanilla and variational autoencoders, which include a description of the models, their properties, loss functions and their application to the problem of dimensionality reduction. Custom autoencoder architectures were also created, including visual representations of the autoencoder architecture and descriptions of each component. The software for training and testing autoencoders was developed, the dynamic system monitoring data set, and the steps for pre-training the data set were described. The metric for evaluating the quality of models is also described; the configuration of autoencoders and their training are considered. **Conclusions**: The vanilla autoencoder recovers the data much better than the variational one. Looking at the fact that the architectures of the autoencoders are the same, except for the peculiarities of the autoencoders, it can be noted that a vanilla autoencoder compresses data better by keeping more useful variables for later recovery from the bottleneck. Additionally, by training on different bottleneck sizes, you can determine the size at which the data is recovered best, which means that the most important variables are preserved. Looking at the results in general, the autoencoders work effectively for the dimensionality reduction task and the data recovery quality metric shows that they recover the data well with an error of 3–4 digits after 0. In conclusion, the vanilla autoencoder is the best deep learning model for aggregating monitoring data of dynamic systems.

Keywords: data dimensionality reduction; deep learning; autoencoders.

Problem statement and its relevance

A dynamic system is one where the function describes the time dependence of a point in the surrounding space. An example of such a system is an economic system based on monitoring data, where there is a time dependence of system variables (days, months, years, etc.). The results of monitoring can be:

– data samples. These are sets of values for a certain period of time, which can vary significantly depending on the conditions of the system;

– time series. They are presented as sets of measurements of a variable that are closely related to each other and obtained within a certain period of time during which the values of the variable do not change significantly. Time series are discrete models for monitoring the state of a dynamic system, which usually contain parametric uncertainties, are non-stationary and noisy.

In order to solve the problem of dimensionality reduction, it is necessary to define the basic provisions on this issue. Dimensionality reduction is the transformation

of data from a high-dimensional space to a low-dimensional space in such a way that the low-dimensional representation preserves some significant properties of the original data, ideally close to its intrinsic dimensionality. Working in high-dimensional spaces can be undesirable for many reasons: raw data is often sparse due to the curse of dimensionality, and data analyses are usually hard to compute (difficult to control or work with). The main advantages of using dimensionality reduction methods are:

- removal of variables that do not have important information;
- reduction of multicollinearity in the data;
- reduction of the required data storage space;
- reducing the time required for data-related calculations;
- presenting the data in a way that allows for visualisation.

Usually, it is necessary to preprocess the data in time series and data samples by removing missing values and preparing the data for submission to dimensionality reduction techniques. Once the data has been

preprocessed, the dimensionality reduction techniques can be used.

The task of reducing the dimensionality of monitoring data in dynamic systems should be defined as a sequential performance of interrelated tasks, namely:

- monitoring the state of a dynamic system;
- pre-processing of the data, which makes it possible to give them a certain form that is allowed for the use of dimensionality reduction methods;
- reduction of the dimensionality of the monitoring data of a dynamic system.

Considering the theoretical and practical problems of the dimensionality reduction of monitoring data of dynamic systems is of great interest to scientists in Ukraine and abroad. To date, a number of papers have been published describing models and methods for dimensionality reduction [1–15]. V. Hrusha's work [1] discusses basic methods for dimensionality reduction, such as: the use of geometric parameters of the FEM; selection of FEM values on a nonlinear scale; use of coefficients of approximating polynomials; application of the principal components method. In their studies, V. Martsenyuk, Y. Droniak, I. Tsikorska [2] and E. Kozak [3] rely on the principal component method to solve data aggregation problems. Paper [4] outlines the theoretical and practical foundations of using a deep learning model to predict monitoring data of dynamic systems using data aggregation modules. Researchers M. Korabliov and S. Lutskyi in [5] described the main methods for information processing, where they

identified the task of dimensionality reduction as one of the important components of processing. The existing methods and models for dimensionality reduction are considered in [6–8, 11, 15]. The authors theoretically described various methods and models without practical support. It is also worth mentioning [9, 14], where scientists developed new deep learning models for dimensionality reduction based on supervised learning. The use of autoencoders for unsupervised learning is discussed in [10], where an autoencoder is defined as the main model for dimensionality reduction and data recovery. It is also worth mentioning foreign works by the following authors: P. May, H. Rekabdarkolae [12], K. Matchev, K. Matcheva, A. Roman [13] and others.

There are two basic approaches to dimensionality reduction: *Feature Selection* and *Dimensionality Reduction*. The feature selection approach is based on the fact that the most important variables are selected, thus reducing the dimensionality of the data. In addition, the methods of the dimensionality reduction approach perform certain transformations in order to obtain data of lower dimensionality. The classification of dimensionality reduction models and methods is shown in Fig. 1.

The classification offers most of the popular models and methods for dimensionality reduction, which are actively used depending on the requirements and goals. In this paper, we will consider deep learning models [16] in more detail, namely the autoencoder and the variational autoencoder.

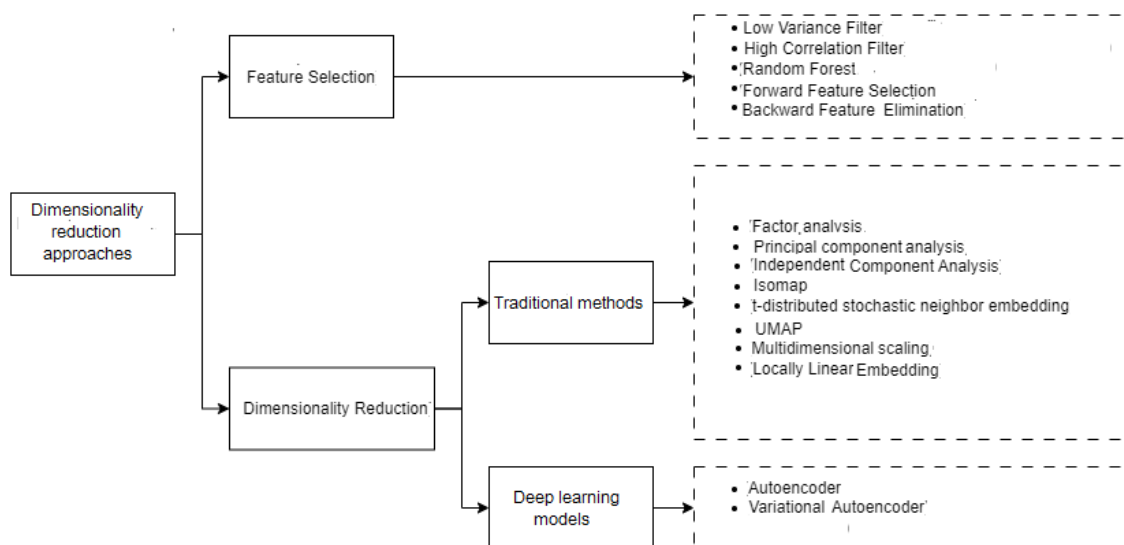


Fig. 1. Classification of models and methods of dimensionality reduction

Having analysed the works devoted to solving dimensionality reduction problems, it should be emphasised that they do not determine the best deep learning model, which are shown in Fig. It is also worth noting that the information support developed to date does not allow solving the problem of dimensionality reduction in data samples and time series with a high level of reliability. Therefore, there is a need to choose the best deep learning model and information technology implementation tools to reduce the dimensionality of monitoring data, which determines the relevance of the study.

The purpose of the study is to determine the best deep learning model for reducing the dimensionality of monitoring data of dynamic systems. The object is dynamic systems, and the subject is models, methods and information technologies for aggregating monitoring data.

1 Standard autoencoder

A standard autoencoder can be described as a type of feed-forward neural network where the input is the same as the output. It compresses the input data into a bottleneck (lower dimensional data) and then reconstructs the output data from this representation. The bottleneck is a compact summation or compression of the input data, also called a latent space representation.

An autoencoder has three components: an encoder, a bottleneck, and a decoder. The encoder compresses the input data and creates a narrow throat, the decoder then reconstructs the input data using only this throat. The architecture of the autoencoder is shown in Fig. 2, which shows all the main components of the neural network.

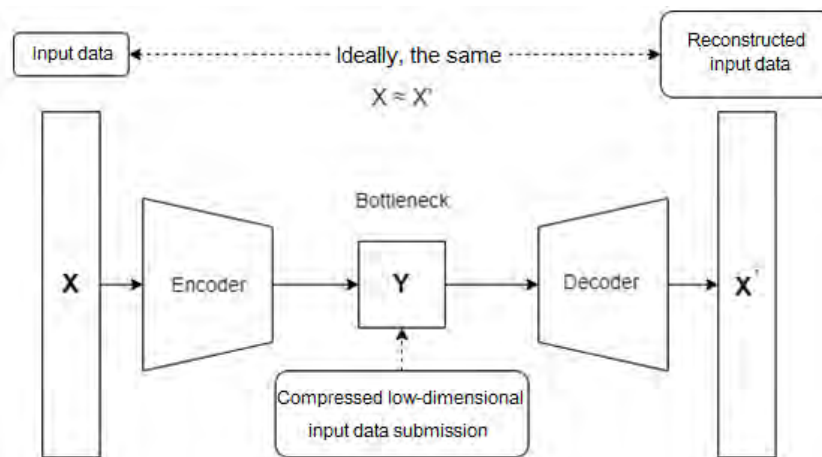


Fig. 2. General architecture of a standard autoencoder

An autoencoder is basically a dimensionality reduction (or aggregation) algorithm with several important properties:

- data dependence. An autoencoder is only able to compress the data significantly, similar to what it has been trained on. Since it learns functions specific to the given training data, it differs from a standard data compression algorithm. Therefore, it should not be used on data that differs from the training distribution;
- there are losses. The output of the autoencoder (or the reconstructed input data) will not be the same as the input data. It will be a close but degraded representation;
- learning without a teacher. The autoencoder belongs to mathematical models with unsupervised learning techniques, as it does not need explicit labels to learn, but only needs to be given input. However, to be more precise, the autoencoder is self-supervised, as

it generates its own labels from the training data. The model is trained by minimising a chosen loss function that explores the error between the input and reconstructed data.

Considering an autoencoder for the task of data dimensionality reduction, it can be determined that the data generated in the bottleneck is the target data. That is, to use an autoencoder for dimensionality reduction, it is necessary to train it on the input data and apply the encoder to obtain dimensionality-reduced data.

2 Variational autoencoder

A variational autoencoder is an extension of the above autoencoder. The variational autoencoder shares properties with the standard autoencoder, including data dependence, loss, and unsupervised learning.

The difference is that the variational autoencoder provides a probabilistic way to describe an observation in a bottleneck (latent space). So, instead of designing an encoder that outputs a single value to describe each attribute of the latent state, an encoder is created to describe the probability distribution for each latent attribute.

The architecture of the variational autoencoder (see Fig. 3) is similar to that of the standard one, except for the bottleneck. Now, the encoder extracts two values, such as the mean and variance, which are used in the subsequent formation of the bottleneck.

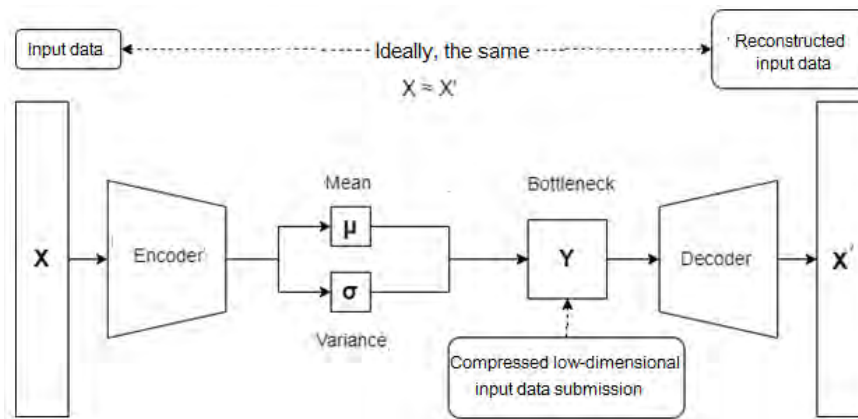


Fig. 3. General architecture of a variable autoencoder

Considering the process of training such a mathematical model, it can be noted that the loss function used is different from the one used in the autoencoder. Instead of the root mean square error, the loss function is used, defined as follows:

$$L = MSE(X, X') + KL(\mu, \sigma), \quad (1)$$

where MSE – standard error; KL – Kulbak–Leibler divergence.

If we consider a variational autoencoder for the dimensionality reduction task, then, similarly to an autoencoder, the data generated in the narrow throat is targeted. This means that you need to train the variational autoencoder on the input data and take the data from the bottleneck in order to obtain the reduced dimensionality data.

3 Description of autoencoder architecture

There are many variations in the architecture of autoencoders depending on the type and complexity of the task. If you use an autoencoder to reduce the dimensionality of tabular data, you should use a conventional feed-forward neural network. In this case, it makes no sense to use convolutional neural networks, as they are usually required for working with images.

Both types of autoencoders have been designed with the same architecture, except for the difference between

a standard and a variation autoencoder. The auto-encoders have three linear layers in the encoder, one layer in the narrow throat and three linear layers in the decoder. The same architecture was chosen in order to determine the best model for dimensionality reduction with high accuracy, based on studies where the difference in their results depends only on the specific differences that characterise standard and variation autoencoders.

3.1 Architecture of a standard autoencoder

The architecture of the standard autoencoder that will be used in this paper is shown in Fig. 4. The diagram clearly identifies three parts of the autoencoder: the encoder, the bottleneck, and the decoder. The labels above the arrows indicate the size of the data fed to the next layer of the neural network. The size is determined by variables that can be controlled, namely:

- *batch_size* characterises the size of the data packet fed to the neural network;
- *input_dim* defines the size of input state variables;
- *h1*, *h2* are the sizes of the hidden layers of the neural network;
- *latent_dim* – is the size of the data in the bottleneck. This variable determines the dimensionality of the data that will be obtained after dimensionality reduction.

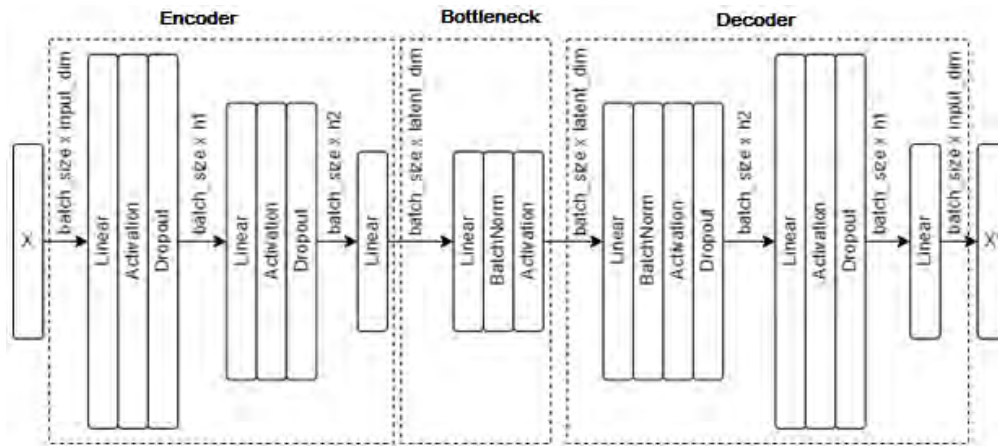


Fig. 4. Autoencoder architecture

Also in Fig. 4, the variables characterising the types of neural network layers are defined, in particular:

- *Linear*. This layer uses a linear transformation to the input data: $y = x \times A^T + b$.
- *Activation*. Uses the activation function before the input data.
- *Dropout*. During training, the layer randomly zeroes some of the input data elements with a certain probability using samples from the Bernoulli distribution. It has been proven as an effective method of regularization and prevention of neuronal coadaptation, as described in [17].
- *BatchNorm*. Applies batch normalization to input data with dimension 2 (for example, data with dimension 16 x 128), as described in [18].

3.2 Architecture of the variational autoencoder

The architecture of the variational autoencoder that will be used in this paper is shown in Fig. 5. The diagram identifies four main parts: the encoder, μ and σ , the narrow throat, and the decoder. The labels above the arrows indicate the data size, similar to the diagram of a standard autoencoder. Their definitions are described in p. 3.1.

The diagram shows the variables characterizing the types of neural network layers. They are similar to those described in section 3.1. The variational autoencoder provides distribution parameters (μ and σ), which are then used to generate data in the narrow throat.

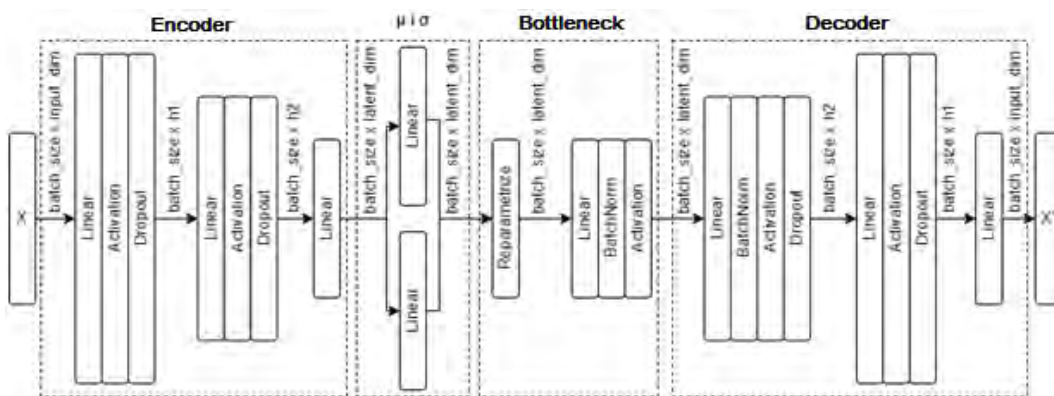


Fig. 5. Architecture of the variational autoencoder

This process of sampling from the distribution parameterized by the model cannot be differentiated. Therefore, an additional layer type was added – *Reparametrize*. It allows you to build a gradient path through a non-stochastic node and further differentiate this node. The main idea of this layer is to add noise, which is obtained from the normal distribution, to μ and σ .

This layer can be described by the following formula:

$$y = \mu + \sigma \times \epsilon, \quad (2)$$

where μ is the mean; σ is the variance; ϵ is the noise obtained randomly from a normal distribution. Thus, the random element was separated from the studied parameterization, and now it is possible to differentiate the model completely.

4 Overview of model results and performance

4.1 Data set

To train and test the auto-coders, we use a proprietary dataset that reproduces monitoring data in an economic dynamic system. It reproduces the socio-economic development of countries for 2012–2020. The set consists of 115 alternatives with 32 state variables.

The overview part of the dataset is shown in Fig. 6.

This dataset was preprocessed by removing/replacing missing values, applying min-max normalization in the range from 0 to 1 inclusive, and given a form that is acceptable for training and testing of autoencoders. Moreover, the dataset is divided into two parts to be used for training and testing, where 70% of all data relates to the training part and the rest to the testing part.

Country Name	EGI_2020	EPI_2020	OSI_2020	HCI_2020	TII_2020	EGI_2018	EPI_2018	OSI_2018	HCI_2018	TII_2018	...	OSI_2012	HCI_2012	TII_2012	NRI_19	ICT_17
Albania	0.663864	0.816848	0.802953	0.741263	0.527862	0.608831	0.707435	0.683307	0.714727	0.473528	...	0.290315	0.741815	0.377144	0.404424	0.476126
Algeria	0.346680	0.000000	0.102246	0.607300	0.528087	0.268064	0.033907	0.058322	0.548508	0.420335	...	0.080691	0.572671	0.197836	0.218389	0.412005
Argentina	0.789256	0.830928	0.810274	0.883510	0.694473	0.730152	0.544200	0.699988	0.809057	0.673032	...	0.419371	0.883774	0.490160	0.482007	0.701228
Armenia	0.626389	0.704212	0.627745	0.724566	0.612406	0.523342	0.476144	0.474979	0.670384	0.515933	...	0.169402	0.819379	0.359535	0.458402	0.560709
Australia	0.953548	0.957761	0.934359	1.000000	0.870089	0.985578	0.979535	0.966639	1.000000	0.860136	...	0.830598	1.000000	0.742318	0.870419	0.899045
...
United States of America	0.934312	1.000000	0.934359	0.901501	0.910278	0.943354	0.979535	0.983319	0.849906	0.876007	...	1.000000	0.903588	0.778801	0.961538	0.890859
Uruguay	0.820747	0.830928	0.802953	0.807662	0.841833	0.807910	0.897917	0.866675	0.693496	0.801984	...	0.443553	0.880754	0.500518	0.560746	0.751705
Viet Nam	0.559561	0.647894	0.569301	0.583096	0.630193	0.521409	0.625817	0.683307	0.535474	0.420459	...	0.290315	0.689984	0.446081	0.453945	0.379263
Zambia	0.214021	0.183034	0.080283	0.578695	0.258696	0.250818	0.272100	0.375015	0.420720	0.167886	...	0.153239	0.395071	0.058465	0.068174	0.121419
Zimbabwe	0.324736	0.352106	0.408736	0.499741	0.291793	0.188522	0.122427	0.191648	0.417898	0.203968	...	0.137199	0.594539	0.115779	0.000330	0.173261

115 rows × 32 columns

Fig. 6. Data set

4.2 Quality assessment metrics

In order to determine the best model for dimensionality reduction, the root mean square error is used as a metric to evaluate the quality of the model. This metric is calculated by the following formula:

$$MSE(X, X') = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X'_i)^2, \quad (3)$$

where, in the case of autoencoders, X is the input data; X' is the reconstructed input data. There is an inverse relationship between the metric and the quality of the model. That is, the lower is the metric value, the higher is the quality of the model, and it reduces the data dimensionality better, preserving more useful variables.

4.3 Autoencoders configuration and training

Part 3 describes the architectures of autoencoders and introduces variables that control the sizes of data and the corresponding layers of the neural network. Also, such layers as *Dropout* and *Activation* have their own parameters. All the values of variables and parameters are shown in Table 1.

An optimization algorithm called *Adam* [19] was used to train autoencoders.

Standard parameters for this algorithm were used, namely:

- learning rate = $1e-3$;
- coefficient used to calculate the gradient moving averages = 0.9;
- the coefficient used to calculate the square of the gradient = 0.999.

Table 1. Configuration of autoencoders

Variable, parameter	Value
batch_size	16
input_dim	32
h1	128
h2	64
latent_dim	20
Probability with a layer <i>Dropout</i>	0.2
Activation function in the layer <i>Activation</i>	ReLU

The loss functions used in training the autoencoders are also defined. They are different for the standard and variational autoencoders. Thus, the MSE loss function (3) is used for the autoencoder, and the function defined in (1), which is a combination of MSE and Kulbak-Leibler divergence, is used for the variational autoencoder.

4.4 Software

The software was developed using the Python language. The following libraries were used as auxiliary libraries:

- *scikit-learn* for applying normalisation, quickly dividing the data set into training and testing parts;
- *Pandas* for working with data, processing it, etc.
- *PyTorch* for working with neural networks, training and testing them, creating loss functions, etc.
- *NumPy* for working with matrix calculations and initialising model parameters;
- *argparse* for working with console parameters
- and others, which are insignificant for their description.

As a result, a console application was developed that allows you to perform the following actions:

- loading a tabular dataset, extracting the specified state variables, and splitting it into training and testing parts;
- training of standard and variation autoencoders using configuration parameters;
- saving the best version of the autoencoder;
- continue training the model with the existing version of the model;
- calculation of performance indicators and loss functions;
- testing standard and variation autoencoders using configuration parameters;
- use of trained autoencoders with four options: encoding, encoding + sampling, decoding, and full model pass.

The software supports the execution of the program on the central processing unit (CPU) and the graphics processing unit (GPU). It should be noted that the use of the GPU significantly increases the speed of training and testing of autoencoders.

4.5 Results of training and testing of autoencoders

The training of the autoencoders was carried out with a fixed number of epochs, namely 1000 epochs for each training. After every ten epochs, the models were tested using the metric described in Section 4.2. Based on the test results, the best version of the model was selected after the training. Additionally, the training was performed by changing the *latent_dim* parameter, which is responsible for the dimensionality of the data placed in the bottleneck, i.e. the target data for the dimensionality reduction task. The results of testing the autoencoders are presented in Table 2.

Based on the results of testing the autoencoders, it can be determined that the standard autoencoder recovers data much better than the variational one. Given that the architectures of the autoencoders are identical, except for the features of the autoencoders, it can be noted that the standard autoencoder compresses data better, preserving more useful variables for further recovery from the bottleneck. Also, by training on different sizes of the bottleneck, you can determine the most effective size at which the data is recovered best, which means that the most important variables are preserved. In this case, if the size is 10, both autoencoders work most efficiently.

Table 2. Results of autoencoders testing

Autoencoder type	latent_dim	MSE
Standard	20	7.1×10^{-4}
Variational		16.7×10^{-4}
Standard	15	6.8×10^{-4}
Variational		15.8×10^{-4}
Standard	10	6.6×10^{-4}
Variational		14.8×10^{-4}
Standard	5	7.6×10^{-4}
Variational		15.2×10^{-4}
Standard	2	12.6×10^{-4}
Variational		15.4×10^{-4}
Standard	1	10.9×10^{-4}
Variational		14×10^{-4}

It should be noted that when aggregating to dimension 1, the variational autoencoder recovers the data best. This phenomenon encourages future research. On the other hand, it is a good reason to reduce the dimensionality for data visualisation.

Accordingly, general autoencoders work well for the dimensionality reduction task, and the data recovery quality metric shows that they recover data well with an error of 3–4 digits after 0.

Results and conclusions

The paper presents a classification of models and methods for reducing the dimensionality of monitoring data of dynamic systems, which involves the division into two approaches, such as variable selection and dimensionality reduction. Considering deep learning models in relation to the dimensionality reduction approach, standard and variational autoencoders are selected.

A general overview of the selected autoencoders is offered, including a description of the models, their

properties, loss functions, and their application to the task of data dimensionality reduction. We also created our own autoencoder architectures, described in Section 3, including a visual representation of the autoencoder architecture and a description of each component.

To train and test the autoencoders, we developed software using the *Python* language and auxiliary libraries (see p. 4.4). We also present the monitoring data set of the dynamic system used in this work. Additionally, the steps for preliminary preparation of the dataset to give it a form that can be used in the developed software are described. In the course of the study of training and testing of autoencoders, a metric for evaluating the quality of models is described, the configuration of autoencoders and their training is considered, the sizes of autoencoder layers, parameters of the optimisation algorithm, loss functions, etc. are given.

References

1. Grusha, V. M. (2017), "Chlorophyll fluorometer data normalization and dimensionality reduction" ["Normalizaciya ta zmeshennya rozmirnosti dany'x xlorofil-fluorometriv"], *Computer facilities, networks and systems*, No. 16, P. 76–86.
2. Martseniuk, V. P., Dronyak, Y. V. and Tsikorska, I. V. (2019) "Reduction of dimension for prediction of progress in problems of medical education: an approach based", *Medical Informatics and Engineering*, No. 4, P. 16–24.
3. Kozak, Ye. B. (2021), "A complex algorithm for creating control automata based on machine learning" ["Kompleksny'j alghorytm stvorenniya keruyuchy'x avtomativ na bazi mashy'nnogo navchannya"], *Technical engineering*, No. 2 (88), P. 35–41. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-35-41](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-35-41).
4. Bakurova, A. et al. (2021), "Neural network forecasting of energy consumption of a metallurgical enterprise", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 14–22. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2021.15.014>.
5. Korablyov, M. and Lutskyy, S. (2022), "System-information models for Intelligent Information Processing", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (21), P. 26–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2022.21.026>.
6. Xie, H., Li, J. and Xue, H. (2018), "A survey of dimensionality reduction techniques based on random projection", *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.04371>
7. Espadoto, M. et al. (2021), "Toward a quantitative survey of dimension reduction techniques," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, No. 27 (3), P. 2153–2173. DOI: <https://doi.org/10.1109/tvcg.2019.2944182>
8. Velliangiri, S., Alagumuthukrishnan, S. and Thankumar joseph, S.I. (2019), "A review of dimensionality reduction techniques for efficient computation", *Procedia Computer Science*, No. 165, P. 104–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.079>
9. McInnes, L., Healy, J. and Melville, J. (2020), "UMAP: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction", *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03426>
10. Chorowski, J. et al. (2019), "Unsupervised speech representation learning using WaveNet autoencoders", *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, No. 27 (12), P. 2041–2053. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2019.2938863>
11. Jia, W. et al. (2022), "Feature dimensionality reduction: A Review", *Complex & Intelligent Systems*, No. 8 (3), P. 2663–2693. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00637-x>
12. May, P. and Reabdarkolae, H.M. (2022), "Dimension reduction for spatially correlated data: Spatial predictor envelope", *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.01919>
13. Matchev, K.T., Matcheva, K. and Roman, A. (2022), "Unsupervised machine learning for exploratory data analysis of Exoplanet Transmission Spectra", *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.02696>
14. Björklund, A., Mäkelä, J. and Puolamäki, K. (2022), "SLISEMAP: Supervised dimensionality reduction through local explanations", *Machine Learning*, No. 112 (1), P. 1–43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10994-022-06261-1>
15. Bhandari, N. et al. (2022), "A comprehensive survey on computational learning methods for analysis of Gene Expression Data", *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.02958>
16. Bank, D., Koenigstein, N. and Giryas, R. (2021), "Autoencoders", *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.05991>
17. Hinton, G.E. et al. (2012), "Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors", *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1207.0580>

18. Ioffe, S. and Szegedy, C. (2015), "Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift", *International conference on machine learning*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1502.03167>
19. Kingma, D.P. and Ba, J. (2017), "Adam: A method for stochastic optimization", *arXiv.org*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>

Received 31.03.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Шевченко Дмитро Олександрович – аспірант, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна; e-mail: dimyich24@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0902-2735>

Угрюмов Михайло Леонідович – доктор технічних наук, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, професор кафедри теоретичної та прикладної системотехніки; Харків, Україна; e-mail: ugryumov.mykhaylo52@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0902-2735>

Артюх Сергій Володимирович – кандидат медичних наук, Державна установа "Інститут медичної радіології та онкології ім. С. П. Григор'єва Національної академії медичних наук України", старший науковий співробітник; Харківський національний медичний університет, асистент кафедри; e-mail: artiukhsergii@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-3614>

Shevchenko Dmytro – V. N. Karazin Kharkiv National University, Postgraduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Ugryumov Mykhaylo – doctor of Engineering Sciences, V. N. Karazin Kharkiv National University, professor of Theoretical and Applied Systems Engineering Department, Kharkiv, Ukraine.

Artiukh Sergii – Candidate of Medical Sciences (PhD), State Organization "Grigoriev Institute for Medical Radiology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", senior researcher; Kharkiv National Medical University, assistant of the department.

АГРЕГУВАННЯ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Предметом роботи є моделі, методи та інформаційні технології агрегування даних моніторингу. **Мета статті** – визначити найкращу модель глибокого навчання для зменшення розмірності даних моніторингу динамічних систем. **Завдання**, що вирішуються: аналіз наявних підходів зменшення розмірності, опис загальної архітектури стандартного й варіаційного автокодувальників, розроблення їх архітектури, створення програмного забезпечення для тренування й тестування автокодувальників, дослідження якості роботи автокодувальників для зменшення розмірності. Застосовано такі **методи**: підготовка та оброблення даних, зменшення розмірності даних. Програмне забезпечення було розроблено за допомогою мови *Python*. Допоміжними бібліотеками використані такі: *scikit-learn*, *Pandas*, *PyTorch*, *NumPy*, *argparse* тощо. Здобуті **результати**: у роботі запропоновано класифікацію моделей і методів для зменшення розмірності та подано загальні характеристики стандартного й варіаційного автокодувальників, що містять опис моделей, їх властивості, функції втрат та їх застосування для зменшення розмірності даних. Також створено власні архітектури автокодувальників, зокрема візуальне подання архітектури автокодувальників та опис кожного складника. Розроблено програмне забезпечення для тренування й тестування автокодувальників, розглянуто набір даних моніторингу динамічної системи та дії з попередньої підготовки набору даних. Крім того, описано метрику для оцінювання якості моделей, розглянуто конфігурацію автокодувальників та їх тренування. **Висновки**: стандартний автокодувальник відновлює дані набагато краще, ніж варіаційний. Зважаючи на те, що архітектури автокодувальників однакові, за винятком особливостей автокодувальників, можна зазначити, що стандартний автокодувальник стискає дані краще, зберігаючи більше корисних змінних для подальшого відновлення з вузького горла. Також за допомогою тренувань на різних розмірах вузького горла можна визначити розмір, за умов якого дані відновлюються найкраще, а це означає, що зберігаються найважливіші змінні. Відповідно до загальних результатів автокодувальники ефективно працюють над завданням зменшення розмірності, і метрика якості відновлення даних показує, що вони добре відновлюють дані з похибкою, яка становить 3–4 знаки після 0. Отже, стандартний автокодувальник є найкращою моделлю глибокого навчання агрегування даних моніторингу динамічних систем.

Ключові слова: зменшення розмірності даних; глибоке навчання; автокодувальники.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Шевченко Д. О., Угрюмов М. Л., Артюх С. В. Агрегування даних моніторингу динамічних систем із використанням інформаційних технологій. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 123–131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.123>

Shevchenko, D., Ugryumov, M., Artiukh, S. (2023), "Monitoring data aggregation of dynamic systems using information technologies", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 123–131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.123>

М. КАРПУШЕНКО, О. КАРПУШЕНКО

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ КОМПЛАСНС-КОНТРОЛЮ

У сучасних умовах комплаєнс є основою для вдосконалення процесу прийняття управлінських рішень, сприяє досягненню встановлених стратегічних і тактичних цілей підприємства й забезпечує його сталий розвиток у довгостроковій перспективі. Відповідно до цього функції комплаєнс-контролю значно розширюються. **Предмет дослідження** – система комплаєнс-контролю, що є комплексом вбудованих у бізнес-процеси суб'єктів господарювання видів контролю, які встановлені для дотримання певних нормативів. **Мета роботи** – удосконалення теоретичних і практичних аспектів формування системи комплаєнс-контролю на підприємствах. Для досягнення мети необхідно вирішити конкретні **завдання**: систематизувати теоретико-методологічні підходи до поняття "комплаєнс-контроль", узагальнити напрями регулювання діяльності компанії за допомогою комплаєнс-контролю, конкретизувати види комплаєнс-ризиків, розглянути особливості комплаєнс-контролю, його складники та структуру комплаєнс-програми. Для досягнення мети застосовано загальнонаукові **методи**: абстрактно-логічне узагальнення; порівняльне зіставлення, групування; аналіз і синтез. Унаслідок проведеного дослідження конкретизовані напрями, види й характеристика комплаєнс-контролю та комплаєнс-ризиків, особливості складу комплаєнс-програми. **Висновки**: упровадження комплаєнс-контролю надає підприємствам безперечні переваги у вигляді поліпшення іміджу, спрощення алгоритмів взаємодії з наглядовими й регулювальними органами; зростання рівня корпоративної культури – безперервне здійснення моніторингу ризикових ситуацій і плавне впровадження в роботу компанії процедур комплаєнсу сприяє вдосконаленню бізнес-процесів і формуванню динамічного середовища для створення інноваційного клімату й появи "корпоративного духу", що передбачає чітке дотримання етичних норм щодо контрагентів, установлення нових партнерських відносин; можливість присутності на міжнародних ринках – упровадження комплаєнсу в транснаціональних компаніях і підприємствах, що планують вийти на міжнародний рівень, підвищує до них довіру з боку іноземних стейкхолдерів.

Ключові слова: комплаєнс-контроль; комплаєнс-контролери; комплаєнс-програма.

Вступ

Інтеграція бізнесу у світову економіку обумовлює необхідність комплаєнс-контролю, що потребує дотримання встановлених правил внутрішньої взаємодії, процедур і процесу прийняття рішень відповідно до міжнародних вимог, а також виявлення, оцінювання та моніторинг комплаєнс-ризиків, пов'язаних із професійним веденням бізнесу. Дійсно, необхідність формування системи комплаєнс-контролю пов'язана з глобалізацією та інтернаціоналізацією світової фінансової системи, що обумовлено зростанням рівня нефінансових ризиків. В умовах політичної нестабільності та появи загроз підприємствам необхідно звертати особливу увагу на встановлення чіткого контролю за всіма процесами, що відбуваються та формуються в поточному періоді. Хоча комплаєнс є інструментом проведення контролю на підприємстві, але економічні вигоди від його впровадження виправдані саме витратами, що можуть бути завдані підприємству за відсутності такого контролю. Перевага комплаєнсу полягає не тільки в здійсненні контролю над фінансовими потоками,

але й у можливості генерувати для компанії додаткові доходи способом збільшення її інвестиційної привабливості.

З огляду на зазначене необхідно розглянути теоретичні й практичні аспекти комплаєнс-контролю та запропонувати конкретну систему, яка б враховувала всі суттєві аспекти його проведення.

Аналіз проблеми й наявних методів

Проблеми розвитку комплаєнс-контролю вивчали такі вчені, як Н. Москаленко [5], М. Карпушенко [2, 3], О. Ковалишин [4], О. Новіков [6], Т. Швидка [9], Н. Сметаніна [8], М. Яценко [10], Шон Дж. Гріффіт [11] та ін.

Слово "комплаєнс" у перекладі з англійської мови означає згоду, відповідність. За визначенням International Compliance Association (Міжнародна комплаєнс-асоціація), "комплаєнс – це забезпечення відповідності діяльності встановленим вимогам і стандартам" [12].

Н. Сметаніна зазначає, що комплаєнс та його правове регулювання з'явилися на початку ХХ ст.,

коли було створено Агентство Міністерства охорони здоров'я та соціальних служб США (FDA – Food and Drug Administration). Агентство почало розробляти правила, яких мали дотримуватися учасники підприємницької діяльності в галузі фармацевтичної та харчової промисловості. FDA стало регулятором на ринку США. А вже впродовж 60–70-х рр. XX ст. унаслідок корупційних скандалів був прийнятий Закон США "Про боротьбу з практикою корупції за кордоном" 1977 р. (Foreign Corrupt Practices Act), що встановив жорсткі правила контролю, увів вимоги до бухгалтерської та фінансової документації, установив правила взаємин із державними чиновниками. У кінці 1970-х рр. у США створюється ціла низка регуляторів в інших сферах підприємницької діяльності. Згодом корупційні скандали 1980-х рр. спрямували розвиток комплаєнсу не тільки на дотримання імперативних приписів, а й етичних правил ведення бізнесу. Протягом 1990-х рр. приймаються Роз'яснення про порядок застосування кримінального покарання для організацій (Federal Sentencing Guidelines) [8].

Розглядаючи поширення комплаєнсу в різних галузях, Н. Москаленко наголошує, що дослідивши практику західних компаній, можна стверджувати, що комплаєнс присутній практично в усіх галузях господарства, наприклад: страхуванні, фінансах, кредиті, виробництві, торгівлі, медицині [5].

Вивчаючи ризики, М. Яценко [10] стверджує, що комплаєнс – це той елемент системи управління й внутрішнього контролю на підприємстві, який спрямований на запобігання комплаєнс-ризиків, що можуть спричинитися невідповідністю, недотриманням законодавства, державних і галузевих стандартів, кодексів етичної поведінки тощо.

Для побудови й підтримки корпоративного управління світова практика, на думку Т. Швидкої, пропонує використання концепції "три лінії захисту", відповідно до якої основними функціями другої лінії захисту господарського товариства є встановлення певних підрозділів, що здійснюють контроль за діяльністю товариства, зокрема: ризик-менеджмент, управління бізнес-процесами, служба безпеки та комплаєнс [9].

Шон Дж. Гріффіт [11] у своїх дослідженнях наголошує, що сучасна функція комплаєнсу спростовує уявлення про те, що механізми корпоративного управління мають бути результатом угоди між акціонерами й менеджерами, підтверджує необхідність враховувати законодавчі норми, установлені урядом.

Варто звернути увагу, що внаслідок спільної роботи команди аудиторів, менеджерів, бухгалтерів та інженерно-технічних фахівців на міжнародному рівні створені документи щодо внутрішнього контролю за господарською діяльністю, а саме:

– стандарт "Цілі контролю у використанні інформаційних технологій" (COBIT – the Information Systems Audit and Control Foundation's Control Objectives for Information and Related Technology), що забезпечує вирішення питань про відповідність застосовуваних інформаційних технологій наявним бізнес-процесам і є основою для створення загальних правил надійності та механізму контролю за ефективністю використання інформаційних систем [13];

– документ "Внутрішній контроль: інтегрований підхід" (COSO – the Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission's Internal control – Integrated Framework) містить основні принципи організації системи внутрішнього контролю в компанії та є верхньорівневим керівництвом для її створення та вдосконалення [14];

– документ "Контроль і аудит систем" (SAC – the Institute of Internal Auditors Research Foundation's Systems Auditability and Control) пропонує підтримку внутрішнім аудиторам у питаннях контролю аудиту інформаційних систем і становить інтерес щодо впровадження їх у діяльність сільськогосподарських виробничих кооперативів [15].

Підсумовуючи всі вищезгадані дослідження та розробки, можна сформулювати власне визначення. На нашу думку, комплаєнс-контроль – напрям професійної діяльності, що здійснюється менеджментом і співробітниками підприємств для контролю відповідності процесів чинному законодавству, правилам, стандартам як внутрішнім, так і зовнішнім, що забезпечує їм сталий розвиток у поточній і стратегічній перспективі. Цей контроль є різновидом системи внутрішнього контролю, особливістю якого є не стільки контроль фінансових показників і фінансових ризиків, як здебільшого контроль нефінансових показників, дотримання всіх правових норм у різних сферах діяльності корпорації. Для створення системи комплаєнс-контролю на підприємстві пропонується низка заходів, що будуть детально розглянуті в цій статті.

Метою роботи є теоретичні та практичні аспекти формування системи комплаєнс-контролю на підприємствах. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання: систематизувати теоретико-методологічні підходи до поняття "комплаєнс-

контроль", узагальнити напрями регулювання діяльності компаній за допомогою комплаєнс-контролю, конкретизувати види комплаєнс-ризиків, розглянути особливості комплаєнс-контролю, його складники та структуру комплаєнс-програми.

Вирішення завдання

Комплаєнс-контроль – багатоаспектне поняття, метою проведення якого є зведення до мінімуму ризиків залучення підприємств у процеси, що можуть стати для них не тільки фінансовими втратами, але й втратою довіри з боку суспільства, зокрема регулювальних органів, інвесторів, партнерів, акціонерів, клієнтів.

Розглядаючи сутність комплаєнс-контролю, необхідно наголосити, що він пов'язаний із ризиками, і, насамперед, варто виокремити три основні ризики, що беруться до уваги під час контролю:

- репутаційний: опублікування негативної інформації про організацію або його працівників, акціонерів, членів органів управління, афілійованих осіб у засобах масової інформації;
- правовий: недотримання законодавства, наслідком чого є суперечки з наглядовими органами;
- операційний: порушення внутрішніх правил і документів організації, що спричинили збитки, недотримання відповідальними особами й акціонерами законодавства, установчих і внутрішніх документів економічного суб'єкта.

Належне дотримання основних принципів комплаєнс-контролю та його ефективна реалізація сприяють мінімізації правових і репутаційних ризиків, а також безпосередньо впливають на успіх і цілісність самої організації та добробут її персоналу, що зрештою підвищує ефективність бізнесу.

У дослідженні деталізовані складники системи комплаєнс-контролю, яка забезпечує постійний моніторинг ризиків та оцінку якості внутрішніх контрольних процедур. На рис. 1 запропонована схема, що зображує основні напрями регулювання діяльності компанії, які здійснюють комплаєнс-контролери.

Нині особливу увагу необхідно звернути на те, що збільшення каналів комунікації призводить до зростання кількості потенційних репутаційних ризиків – будь-яка інформація дуже швидко може потрапити в мережу Інтернет і нанести підприємству суттєвий репутаційний і фінансовий збиток.

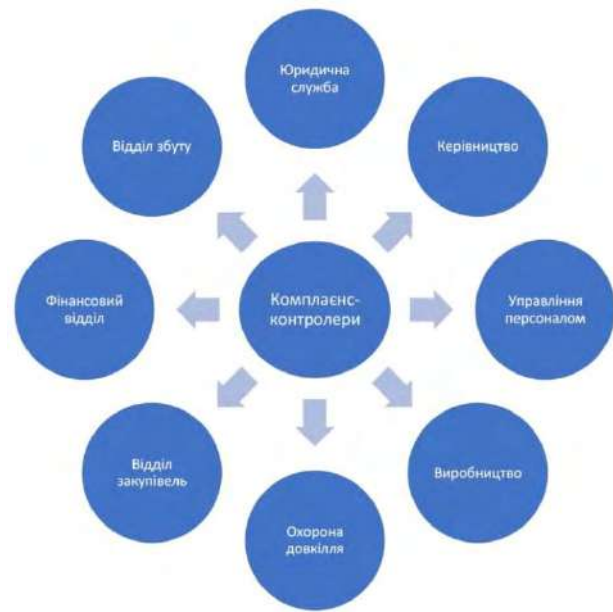


Рис. 1. Основні напрями регулювання діяльності компанії за допомогою комплаєнс-контролю

Наведені напрями комплаєнс-контролю вказують на те, що він передбачає постійну аналітичну роботу, яка сприяє доцільності формування команди, що узгоджено працює над контролем ризиків.

За визначенням багатьох дослідників, комплаєнс-контроль має багатоаспектний характер у всіх сферах діяльності корпорації. Усі види контролю об'єднує їх спрямованість на досягнення однієї глобальної мети – допомогти бізнесу уникнути ризиків банкрутства й забезпечити стійкий і стабільний розвиток у часі, використовуючи свої особливі методи та інструменти.

Л. Амелічева звертає увагу на "комплаєнс у трудових відносинах як умову праці, якій притаманні такі ознаки:

- належність до категорії нормативних умов трудового договору (закріплення не лише в антикорупційному законодавстві у сфері праці, але й безпосередньо в письмовому трудовому договорі, а також у посадовій інструкції працівника, Правилах внутрішнього трудового розпорядку та Антикорупційній програмі роботодавця);

- трансформування антикорупційного комплаєнсу як умови трудового договору в систему прав і обов'язків сторін трудових відносин щодо дотримання ними вимог законів України та різних країн, інших нормативних документів, стандартів і етичних норм (кодексів поведінки) щодо боротьби з корупцією, у межах їх правомірної (позитивної) поведінки на роботі;

- гарантування державою заборони дискримінації, незаконного звільнення, переведення, зміни істотних

умов праці та порушення інших трудових прав працівників-викривачів корупції" [1].

Так, Т. Швидка [9] виокремлює податковий комплаєнс, під яким розуміє систему заходів, метою яких є дотримання господарським товариством як платника податків вимог законодавства зі сплати єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, податкового законодавства, а також належна та вчасна сплата податків, зборів та інших платежів. Авторка вважає, що система управління комплаєнс-контролю – це заходи, що мають на меті проведення аналізу та дослідження діяльності господарського товариства щодо дотримання всіма співробітниками встановлених правил, і забезпечують діяльність такого товариства в правовому полі. Іншими словами, завданням комплаєнс-контролю є створення системи внутрішнього контролю для запобігання виникненню ризиків і/або їх ліквідація на підприємстві. На думку Т. Швидкої, функціями комплаєнс-контролю є розроблення та закріплення на локальному рівні підприємства корпоративної політики, стандартів у сфері діяльності підприємства, серед яких – комплаєнс-програми, проведення аналізу відповідності корпоративної політики чинному законодавству України, перевірки на дотримання всіх сучасних норм і правил регулювання діяльності підприємства.

О. Новіков [6] виокремлює антикорупційний комплаєнс, що має певні особливості та містить як обов'язкові, так і додаткові елементи. Обов'язковими елементами автор визначає наявність антикорупційної програми юридичної особи, особи, відповідальної за її реалізацію, системи оцінки корупційних ризиків, а також антикорупційних політик, стандартів та процедур. На думку вченого, антикорупційний комплаєнс може містити такі антикорупційні політики:

- 1) кодекс корпоративної етики (Code of Ethics);
- 2) кодекс поведінки (Code of Conduct);
- 3) політику протидії легалізації ("відмиванню") доходів, здобутих злочинним шляхом, та фінансуванню тероризму (Fight against Money Laundering and Terrorist Financing);
- 4) політику приймання й дарування подарунків (Gift policy);
- 5) політику повідомлення про порушення (Whistleblowing policy);
- 6) політику регулювання конфлікту інтересів (Conflict of interest management policy);

7) політику взаємодії з керівними й правоохоронними органами (Policy of working with Law Enforcement bodies);

8) політику "належної добросовісності" (Due Diligence);

9) політику ідентифікації контрагентів ("Know your costumer" policy);

10) політику конфіденційності (Privacy policy) тощо [6].

О. Ковалишин досліджує поняття "корпоративний комплаєнс" і наголошує, що воно є достатньо широким і не має чітких окреслених меж. Поряд із Кодексом корпоративної поведінки корпоративний комплаєнс охоплює політику, що регулює конфлікт інтересів завдяки впровадженню етичних стандартів поведінки співробітників у разі виникнення подібних конфліктів (інтереси посадової особи суперечать інтересам суб'єкта господарювання, інтересам одного з клієнтів тощо); політика інформування про порушення етичних стандартів (whistleblowing policy), що надає змогу працівникам як офіційно, так і анонімно повідомляти про випадки корупції та інші порушення норм і стандартів поведінки; політика чесної конкуренції, що вимагає від кожного співробітника виконувати конкурентні правила й умови та спрямована на формування вільного ринку й відкритої конкуренції товарів і послуг тощо [4].

Корпоративний комплаєнс, як вважає О. Ковалишин, регулюється здебільшого на рівні локальних правових актів, таких як Кодекс корпоративної поведінки (Code of conduct), Кодекс корпоративної етики (Code of Ethics) тощо. Кодекс корпоративної поведінки є тим базовим локальним правовим актом, що містить норми поведінки посадових осіб виконавчого й наглядового органів товариства, співробітників у взаємовідносинах між собою та з контрагентами, постачальниками та іншими третіми особами, з якими має справу певна посадова особа (працівник) під час виконання своїх професійних обов'язків [4].

Вважаємо, що аналіз основних підходів до системи комплаєнс-контролю та оцінка основних напрямів його здійснення дають змогу конкретизувати це поняття з погляду суб'єктно-об'єктного підходу та визначити його як частину загального організаційно-економічного механізму підприємства, оснований на дотриманні інтересів усіх його стейкхолдерів шляхом здійснення безперервного моніторингу діяльності підприємства та попередження несприятливих ризикових подій, пов'язаних із незаконними діями

підприємства або співробітників, наявністю в системі корупційного складника, наданням недостовірної інформації про діяльність підприємства зацікавленим особам та іншими діями, що суперечать корпоративній етиці підприємства [2].

Аналіз поглядів і думок дослідників дав змогу згрупувати види й особливості комплаєнс-контролю (рис. 2).



Рис. 2. Види й особливості комплаєнс-контролю

На підставі проведених досліджень авторами статті виокремлено такі принципи комплаєнсу [3]:

– чітке дотримання чинного законодавства, а також внутрішніх нормативних і розпорядчих документів підприємства;

– розроблення та реалізація заходів, спрямованих на зниження комплаєнс-ризиків і постійне вдосконалення систем внутрішнього контролю у сферах діяльності з високими комплаєнс-ризиками;

– дотримання принципів комплаєнсу контрагентами в процесі реалізації договірних відносин підприємства;

– перевага співпраці з діловими партнерами, які дотримуються тих самих цінностей, що й підприємство;

– забезпечення можливості виявлення та врегулювання конфліктів інтересів, зокрема потенційних;

– надання працівникам і третім особам змоги конфіденційно й за бажанням анонімно повідомляти про можливе порушення стандартів комплаєнсу за допомогою "гарячої лінії" або електронною поштою;

– обов'язковість застосування заходів дисциплінарної відповідальності в разі порушення працівниками стандартів комплаєнсу;

– проведення постійного контролю за станом системи комплаєнсу в корпорації.

Серед функцій комплаєнс-контролю О. Овсієнко визначає такі:

– управління ризиками;

– підвищення рівня капіталізації бізнесу, зростання доходності та ринкової вартості акцій;

– дисциплінування менеджменту й найманих працівників;

– забезпечення лояльності стейкхолдерів;

– оновлення стратегії компанії, отримання додаткових конкурентних переваг;

– створення ефективних норм господарської поведінки [7].

Система комплаєнсу на підприємстві має бути оформлена у формі комплаєнс-програми, що є одним з інструментів управління. У комплаєнс-програмі варто закріпити всі основні цілі проведення комплаєнс-контролю, його функції, позначити ключові елементи програми, сформулювати принципи й стандарти комплаєнс-контролю, а також основних комплаєнс-процесів.

Н. Сметаніна наголошує, що "комплаєнс-програми допомагають усунути проблему на новому рівні: від зовнішнього контролю з боку суспільства до внутрішнього контролю та внутрішньої методології – комплаєнс-менеджменту. Такі менеджери працюють із колегами, щоб запобігти, знайти й усунути порушення законодавства, етичних та інших норм. Вони дають змогу іншим співробітникам краще розуміти закони й дотримуватися їх, тим самим реалізуючи в життя очікування керівництва компанії. У сучасному світі комплаєнс-програми впроваджуються у всіх країнах. У США, Ірландії, Південній Африці та інших регіонах уже створено професійні асоціації комплаєнс-менеджерів. В Організації корпоративного комплаєнсу й етики (Society of Corporate Compliance

and Ethics – SCCE) налічується 9 400 членів з понад 30 країн, і ця кількість швидко зростає. Міжнародним об'єднанням професіоналів у зазначеній сфері є International Compliance Association (далі – ICA) – компанія, створена у Великій Британії 2001 р. Вона охоплює більше ніж 50 юрисдикцій, має регіональні представництва в Дубаї та Сінгапурі й налічує понад 10 тис. учасників, які обмінюються інформацією та досвідом на базі ICA3. Комплаєнс-програми не тільки не збільшують кількість правил і регламентацій, а й дають змогу зменшити набір регламентів, що встановлюються державою для бізнесу. Комплаєнс-програму ефективно роблять її інструменти – аудит, розслідування, заохочення, механізми анонімних повідомлень, підвищення кваліфікації, етичні норми, оцінювання ризиків і зворотний зв'язок із керівництвом" [8].

Засадничими принципами формування системи комплаєнс-контролю мають стати [3]:

– розподіл обов'язків. Необхідно, щоб відповідальність між працівниками підприємства розподілялася таким чином, щоб жодна людина не відповідала за операцію загалом. Основна ідея полягає в тому, що особа, яка дозволяє здійснення господарської операції, не має бути також відповідальною за ресурси, що залучаються;

– дозвіл і схвалення. Ці процедури мають забезпечити схвалення всіх операцій відповідальними посадовими особами в межах тих обмежень, норм, нормативів і кошторисів, на які кожна з посадових осіб має повноваження. Сутність реалізації принципу полягає в тому, що робота будь-якої людини, наскільки це можливо, перевіряється іншим працівником без якого б то не було дублювання;

– фізичний контроль – різновид контролю, що здійснюється за доступом до активів і документів. Ця система контролю може виявитися складною для підприємства з багатонаменклатурними видами ресурсів і територіальною віддаленістю підрозділів. Щоб керувати таким підприємством, необхідно, щоб його керівник, центри відповідальності мали план функціонування та схему підприємства (з визначенням обов'язків різних посадових осіб). Схема має містити будь-які невизначеності, що можуть призвести до різночитань. Без такої чіткості результатом може виявитися або відсутність контролю, або марне дублювання. Крім того, закріпивши відповідальність за конкретним центром, можна виявити шляхи делегування повноважень зверху

донизу через усі рівні ієрархії управління кооперативом і відповідні шляхи зворотного руху інформації.

Програма є елементом системи комплаєнс-контролю, в якій виокремлюються суб'єкти

управління, об'єкти управління й моніторинг за ефективністю запровадження процедур із запобігання комплаєнс-ризиків. Основні складники системи комплаєнс-контролю наведені на рис. 3.



Рис. 3. Складники комплаєнс-контролю

Комплаєнс-програма є об'єднанням функцій, пов'язаних із запобіганням і нейтралізацією комплаєнс-ризиків у систему, та є ефективною програмою дій, що передбачає процедури перевірки та забезпечує участь усіх співробітників компанії в здійсненні комплаєнс-контролю.

Існування уніфікованої базової системи комплаєнсу дозволить установити єдині для всіх підприємств норми, що дають змогу ефективно впроваджувати комплаєнс-програми у свою систему внутрішнього контролю, вчасно визначати й попереджати виникнення правопорушень, повною мірою відповідати вимогам наглядових і регулювальних органів.

Цей інструмент, що часто називають корпоративною ідеологією, пронизує абсолютно всю діяльність підприємств і забезпечує безперервний контроль процесів, що відбуваються в організаційній, виробничій, економічній, інвестиційній та соціальній сфері. Отже, основний функціонал комплаєнс-підрозділу на підприємстві полягає в акумулюванні всіх правил, якими має керуватися підприємство у своїй діяльності.

Зазначені напрями комплаєнс-контролю дають змогу зробити висновки, що моніторинг ризиками підприємства передбачає постійну аналітичну роботу команди, яка узгоджено працює над контролем ризиків.

М. Яценко зазначає, що "успіх управління комплаєнс-ризиками на підприємстві в умовах

глобалізаційних обмежень залежить від двох ключових факторів:

– наявність високопрофесійного фахівця з комплаєнсу. Попри відсутність офіційної професії в Україні в багатьох компаніях такий фахівець є. Називається посада по-різному: комплаєнс-менеджер, комплаєнс-офіцер, комплаєнс-контролер, комплаєнс-чемпіон, комплаєнс-амбасадор;

– грамотна й ефективна інтеграція системи комплаєнсу в пов'язані підсистеми: корпоративного управління, ризик менеджменту, систему внутрішнього контролю, корпоративної безпеки тощо" [10].

Тому для найкращого дотримання принципів і норм комплаєнсу в структурі підприємства доцільно створювати спеціальні підрозділи, у яких співробітники враховують вимоги нормативних документів незалежно від наявності або відсутності системи органів, що забезпечують правомірне й етичне ведення бізнесу.

Нами сформовані певні рекомендації, що дають змогу ще на етапі формування системи комплаєнс зробити її стійкою та ефективною:

1. Комплаєнс-контролери мають бути наділені широкими повноваженнями, що дадуть змогу їм проводити реорганізацію внутрішніх бізнес-процесів компанії. Оскільки мінімізація ризиків і зміцнення репутації компанії іноді потребують жорстких заходів, пов'язаних, наприклад, з відмовою від співпраці з колишніми партнерами або перепрофілювання видів діяльності, подібні зміни

можуть викликати опір колективу й керівництва. Тому становище комплаєнс-контролерів на службі має бути досить високим і давати відповідні повноваження.

2. Необхідно, щоб керівництво компанії та її власники координували дії контролерів і надавати їм усю необхідну інформацію, а також сприяли проведенню реорганізаційних процесів. Без узгодженої взаємодії трьох сторін буде неможливо налагодити ефективну систему управління ризиками. Також з боку співробітників компанії необхідне усвідомлення того факту, що не тільки комплаєнс-контролери мають брати участь у попередженні ризиків, але й вони самі, оскільки кожен працівник у межах своєї

сфери діяльності володіє найбільш повною інформацією про ризики, що виникають, і він же може запропонувати найбільш ефективні шляхи їх нейтралізації та зниження. Співробітники відділів компанії мають бути проінформовані про те, що комплаєнс-контролерам необхідно вчасно надавати актуальну інформацію про бізнес-процеси на підприємстві.

3. Усі співробітники, задіяні в управлінні ризиками, мають володіти повним обсягом професійних компетенцій у сфері ризик-менеджменту [2].

Крім того, необхідно передбачити наслідки порушень комплаєнсу для роботодавця й співробітників підприємства (рис. 4).

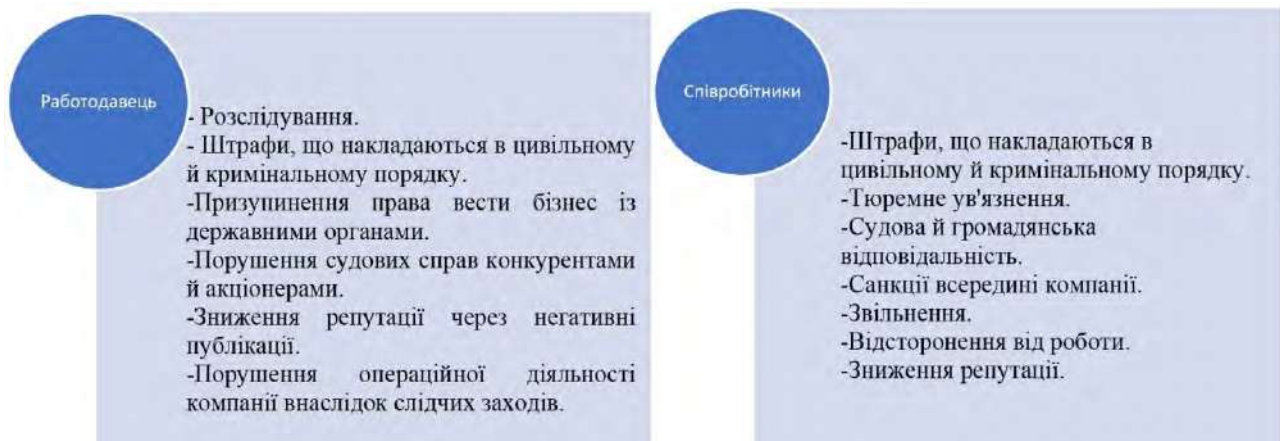


Рис. 4. Наслідки порушень комплаєнсу

Основна ідея комплаєнсу полягає в тому, що ця система спрямована не на уникнення відповідальності співробітників підприємства за прийняті рішення, а на суттєву зміну їхнього відношення до появи порушень законодавства та внутрішніх регламентів компанії, що в комплаєнс-системі сприймаються як неприпустимі й неприйнятні події. Зміна мислення співробітників, які працюють за правилами комплаєнс-системи, можлива в разі наявності в компанії корпоративної етики й культури. Це буде протидіяти вчиненню будь-якого порушення.

Світова практика підтверджує, що компанії з ефективно налагодженою роботою відділу комплаєнс-контролю заощаджують значні ресурси на оплату залучених фінансових і податкових консультантів, юристів, оскільки самостійно проводять контроль і приймають певні рішення з цих напрямів.

Висновки

Отже, у дослідженні доведено, що належне дотримання основних принципів комплаєнс-контролю та його ефективна реалізація сприяють мінімізації правових і репутаційних ризиків, а також безпосередньо впливають на успіх і цілісність самої організації та добробут її персоналу. Розглянуто основні напрями регулювання діяльності компанії за допомогою комплаєнс-контролю, види та особливості комплаєнс-контролю, його складники та структура комплаєнс-програми.

Конкретизовано теоретичні й практичні аспекти системи комплаєнс-контролю в практичній діяльності. Аргументовано, що це підвищує ефективність підприємств і має такі переваги:

– поліпшення іміджу – підприємство, що враховує всі законодавчі норми, не має адміністративних порушень, судових процесів,

є відповідальним партнером і може очікувати на підвищений інтерес інвесторів, а також на високу лояльність з боку постачальників і клієнтів;

– поліпшення взаємодії з наглядовими та регулювальними органами – дотримання компанією всіх законодавчих вимог формує її позитивний імідж у контрольно-наглядових органах;

– підвищення рівня корпоративної культури – безперервне здійснення моніторингу ризикових ситуацій і плавне впровадження в роботу компанії процедур комплаєнсу сприяє вдосконаленню бізнес-процесів і створенню середовища для сприятливого інноваційного клімату й появи "корпоративного духу", що передбачає дотримання певних етичних норм;

– установлення нових партнерських відносин – сприятливий імідж компанії формує гарні умови для пошуку й залучення стратегічних партнерів,

що дає змогу компанії вийти на нові щаблі ринку й збільшити сферу свого впливу;

– можливість присутності на міжнародних ринках – упровадження комплаєнсу в транснаціональних компаніях і в тих підприємствах, що планують вийти на міжнародний рівень, підвищує до них довіру з боку іноземних стейкхолдерів. Окрім того, відсутність чинної системи комплаєнсу здебільшого призводить до відмови від співпраці з підприємством;

– підвищення ймовірності отримання капіталу за кордоном – упровадження системи відповідності законодавчим нормам позитивно сприймається іноземними банками, значно збільшуючи шанси підприємства на отримання іноземного капіталу, а також полегшується вихід на найбільші світові фондові біржі.

Список літератури

1. Амелічева Л. П. Антикорупційний комплаєнс у трудових відносинах у світлі цифровізації та досягнення сталого розвитку: економіко-правове дослідження // *Економіка промисловості*. 2021. № 3 (95). С. 102–118. DOI: doi.org/10.15407/econindustry2020.03.102
2. Карпушенко М. Ю. Безпекоорієнтований механізм інтегрованої оцінки інвестиційного потенціалу суб'єктів господарювання: дис. докт. екон. наук. 21.04.02. Харків, 2021. 408 с.
3. Карпушенко М. Ю., Карпушенко О. О. Роль комплаєнс-контролю в системі протидії ризикам / *Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-аналітичне забезпечення безпеко-орієнтованого управління в умовах глобалізації»*, 17–18 листопада 2022 р., м. Харків. С. 78–79. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/62980/>
4. Ковалишин О. Р. Корпоративний комплаєнс: правове запозичення через практики суб'єктів господарювання // *Актуальні проблеми держави і права*. 2019. № 83. С. 69–76.
5. Москаленко Н. В. Теоретичні аспекти запровадження комплаєнс-контролю в країні // *Економічний вісник. Серія: Фінанси, облік, оподаткування*. 2018. Вип. 2. С. 106–112. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ehsfat_2018_2_17
6. Новіков О. Комплаєнс підхід до запобігання корупції у приватній сфері // *Наукові дослідження*. Харків, 2017. № 34. С. 63–75.
7. Овсієнко О. В. Комплаєнс у бізнес-адмініструванні та його роль у створенні ефективних норм господарської поведінки // *Економічний простір*. 2018. № 134. С. 173–185. DOI: doi.org/10.30838/P.ES.2224.050618.173.121
8. Сметаніна Н. В., Попова Д. І. Значення впровадження комплаєнс-програм для зростання прозорості українського бізнесу // *Часопис Київського університету права*. 2018. № 3. С. 266–269.
9. Швидка Т., Халецька К. Комплаєнс-контроль у системі корпоративного управління господарськими товариствами // *Господарське право і процес*. 2020. № 12. С. 85–90. DOI: <https://doi.org/10.32849/2663-5313/2020.12.14>
10. Яценко М. С., Коваленко А. Б. Управління комплаєнс-діяльністю підприємства в умовах глобалізаційних обмежень // *Економіка: реалії часу. Науковий журнал*. 2020. № 5 (51). С. 73–79. DOI: 10.15276/ETR.05.2020.10 DOI: 10.5281/zenodo.4541331
11. Griffith Sean J. Corporate Governance in an Era of Compliance. *William & Mary Law Review*. – 2016. – Vol. 57. – № 6. *Fordham Law Legal Studies Research Paper*. № 2766661. URL: <https://ssrn.com/abstract=2766661>
12. International Compliance Association URL: <https://www.int-comp.org/> (дата звернення 25.03.2023)
13. Information Systems Audit and Control Foundation's Control Objectives for Information and Related Technology. URL: <https://www.isaca.org/resources/cobit> (дата звернення 25.03.2023)

14. COSO – the Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission’s Internal control – *Integrated Framework*. URL: <https://www.coso.org/Shared%20Documents/CROWE-COSO-Internal-Control-Integrated-Framework.pdf> (дата звернення 25.03.2023)
15. SAC – the Institute of Internal Auditors Research Foundation’s Systems Auditability and Control. URL: <https://www.theiia.org/> (дата звернення 25.03.2023)

Reference

1. Amelicheva L. P. (2021) "Anti-corruption compliance in labor relations in the light of digitalization and the achievement of sustainable development: an economic and legal study" [Anticorruptzionniy complaens y trydovych vidnosinach y svitly zifrovizazii ta dosiagnennya stalogo rozvitky: ekonomiko-pravove doslidzennia], *Economy of industry*, No. 3 (95), P. 102–118.
2. Karpushenko M. Yu. (2021) "Security-oriented mechanism of integrated assessment of the investment potential of business entities" [Bezpekoorientovaniy mechanism integrovanoi ozinki investiziynogo potenzialy sybjektiv gospodaruvania]: thesis. dr. economy Science 21.04.02. Kharkiv, 408 p.
3. Karpushenko M. Yu., Karpushenko O. O. (2022) "The role of compliance control in the system of countering risks" [Rol kompliens-kontroly v systemi protidiji rizikam], *International scientific and practical conference "Information and analytical support of security-oriented management in the conditions of globalization"*, November 17–18, Kharkiv. P. 78–79. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/62980/>
4. Kovalishyn O. R. (2019) "Corporate compliance: legal borrowing through the practices of business entities" [Korporativniy compliens: pravove zapozichennija cherez praktiki sybjektiv gospodaruvania], *Actual problems of state and law*, No. 83. P. 69–76.
5. Moskalenko N. V. (2018) "Theoretical aspects of the introduction of compliance control in the country" [Teoretichni aspekti zaprovadgenja complajens-kontroly v kraini], *Economic Bulletin. Series: finance, accounting, taxation*, Issue 2, P. 106–112. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ehsfat_2018_2_17
6. Novikov O. (2017) "Compliance approach to preventing corruption in the private sphere" [Compliens pidchid do zapobigania korupzii y privatniy sferi], *Scientific research*, No. 34, P. 63–75.
7. Ovsienko O. V. (2018) "Compliance in business administration and its role in creating effective norms of economic behavior" [Compliens biznes-administryvanni ta jogo rol y stvorenni efektyvnych norm gospodarskoi povedinky], *Economic space*, No. 134, P. 173–185.
8. Smetanina N. V., Popova D. I. (2018) "The importance of implementing compliance programs for increasing the transparency of Ukrainian business" [Znachennia vprovadgenja complajens-program dlia zrostantia prozorosti ukrainskogo biznesy], *Journal of the Kyiv University of Law*, No. 3, P. 266–269.
9. Shvydka T., Khaletska K. (2020) "Compliance control in the system of corporate management of economic societies" [Complajens-control y sistemi korporativnogo upravlinnja gospodarskimi tovaristvami], *Economic law and process*, No. 12, P. 85–90.
10. Yatsenko M. S., Kovalenko A. B. (2020) "Management of compliance activities of the enterprise in the conditions of globalization restrictions" [Upravlinnja Complajens – dijalnisty pidpriemstva v umovach globalizazii obmegen], *Economics: realities of time. Scientific journal*, No. 5 (51), P. 73–79.
11. Griffith Sean J. (2016) "Corporate Governance in an Era of Compliance", *William & Mary Law Review*, Vol. 57 № 6. *Fordham Law Legal Studies Research Paper*. № 2766661. URL: <https://ssrn.com/abstract=2766666>
12. International Compliance Association. URL: <https://www.int-comp.org/> (дата звернення 25.03.2023).
13. Information Systems Audit and Control Foundation’s Control Objectives for Information and Related Technology. URL: <https://www.isaca.org/resources/cobit> (дата звернення 25.03.2023).
14. COSO – the Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission’s Internal control – *Integrated Framework*. URL: <https://www.coso.org/Shared%20Documents/CROWE-COSO-Internal-Control-Integrated-Framework.pdf> (дата звернення 25.03.2023р.).
15. SAC – the Institute of Internal Auditors Research Foundation’s Systems Auditability and Control. URL: <https://www.theiia.org/> (дата звернення 25.03.2023).

Карпушенко Марія Юрївна – доктор економічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, доцент кафедри фінансів, обліку і безпеки бізнесу, Харків, Україна; e-mail: mariamaria1864@gmail.com; ORCID: 0000-0001-9280-4812

Карпушенко Олег Олексійович – Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, аспірант, Харків, Україна; e-mail: oleh.karpushenko@nure.ua

Karpushenko Maria – Doctor of Economics Sciences, Associate Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, Associate Professor at the Department of Financial and Economic Security, Accounting and Audit, Kharkov, Ukraine.

Karpushenko Oleh – O. M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, Postgraduate Student.

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF FORMING A COMPLIANCE CONTROL SYSTEM

In modern conditions, compliance is the basis for improving the management decision-making process, contributes to the achievement of the established strategic and tactical goals of the enterprise and ensures its sustainable development in the long term. In this connection, the functions of compliance control are significantly expanded. **The subject of the article's research** is the compliance control system, which is a complex of types of controls built into the business processes of economic entities, established to comply with certain standards. **The purpose of the work** is to improve the theoretical and practical aspects of the formation of the compliance control system at enterprises. To achieve the goal, the following tasks should be **solved**: to systematize the theoretical and methodological approaches to the concept of "compliance control", to generalize the areas of regulation of companies' activities with the help of compliance control, to specify the types of compliance risks. Consider the peculiarities of compliance control, its components and the structure of the compliance program. To achieve the goal of the work, a set of general scientific **methods** was applied: abstract-logical generalization; comparative comparison of playing; analysis and synthesis. As a result of the conducted research, directions, types and features of compliance control and compliance risks, features of the composition of the compliance program were specified. **Conclusions**: the implementation of compliance control provides enterprises with indisputable advantages in the form of image improvement; simplification of algorithms for interaction with supervisory and regulatory bodies; increasing the level of corporate culture – continuous monitoring of risk situations and smooth introduction of compliance procedures into the company's work contributes to the improvement of business processes and the formation of a dynamic environment for the creation of an innovative climate and the emergence of a "corporate spirit", which involves clear compliance with ethical standards in relation to counterparties; the possibility of establishing new partnerships; the possibility of presence on international markets – the implementation of compliance in transnational companies and companies that plan to enter the international level increases their trust on the part of foreign stakeholders.

Keywords: compliance control, compliance controllers, compliance program.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Карпушенко М. Ю., Карпушенко О. О. Теоретико-методологічні аспекти формування системи комплаєнс-контролю. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.132>

Karpushenko, M., Karpushenko, O. (2023), "Theoretical and methodological aspects of forming a compliance control system", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.132>

І. ХОДКОВА

ОПТИМІЗАЦІЯ ЦІЛЬОВИХ ПОКАЗНИКІВ ПОРТФЕЛЯ ПРОЄКТІВ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТУРИСТСЬКИХ ЦЕНТРІВ

Предметом дослідження є моделювання оптимальних цільових показників портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів. **Мета роботи** – підвищення ефективності процесів портфельного управління з допомогою розвитку транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів. **Завдання:** 1) розробити концептуальну модель узгодження цільових показників / параметрів продуктів проєктів для портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів; 2) визначити математичний опис основних показників як функцій від параметрів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів; 3) створити математичну модель визначення оптимальних і узгоджених цільових показників портфеля транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів. **Методи дослідження:** методологія та методи системного аналізу, методи дослідження операцій. Здобуто такі **результати:** уведено поняття "ієрархія туристських центрів", що є логістичною системою, яка пов'язана з відповідними транспортними хабами. Для управління проєктами транспортно-логістичного забезпечення в складі портфеля розроблено концептуальну й відповідну математичну модель визначення оптимальних і узгоджених цільових показників портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів у складі ієрархії. Узгодження формується на рівні туристських потоків з урахуванням їх можливого розподілу між туристськими центрами, а також єдиного джерела фінансування. Параметрами управління моделі є необхідні показники приросту пропускної здатності та якості обслуговування транспортно-логістичних систем туристських центрів однієї ієрархії. Цільова функція моделі відображає максимізацію економічного ефекту від реалізації проєктів щодо підвищення пропускної здатності та якості. Обмеження враховують можливості фінансування, ефективність інвестицій, цілі щодо розвитку туристських потоків кожного центру й умови узгодження туристських потоків у центрах однієї ієрархії (чи його частини). Здобуті результати враховують особливості формування економічних показників для ієрархії туристських центрів та становлять основу для оцінювання цінностей проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів. **Висновки:** результатами дослідження є концептуальна й відповідна математична моделі, що дають змогу формувати оптимальні та узгоджені параметри продуктів проєктів комплексного розвитку транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів. Модель враховує особливість параметрів транспортно-логістичного забезпечення, але ж її структура та принцип побудови можуть бути використані для формування моделей оптимізації та узгодження цільових показників проєктів портфелів, продукти яких є взаємозалежними.

Ключові слова: туристські центри; транспортно-логістична інфраструктура; узгодження; оптимізація; цільові показники; ієрархія.

Вступ

Туризм є одним із достатньо прибуткових і стабільно поширюваних секторів сучасної економіки, але його функціонування й розвиток неможливі без належного стану забезпечувальної інфраструктури, зокрема транспортно-логістичної. Туристський центр – місцевість (селище, місто, ландшафт), що приваблює туристів наявністю особливих ресурсів і є центром обслуговування туристів зі стійкими туристськими потоками, для яких провідною є відповідна транспортно-логістична система, її складниками є транспортно-логістична інфраструктура – дороги, шляхи сполучення, вокзали/пасажирські термінали й транспортні засоби. Транспортно-логістичне забезпечення туризму й безпосередньо туристських центрів полягає

у використанні цієї інфраструктури й транспортних засобів [1] і наданні відповідних послуг.

Транспортно-логістичне забезпечення відіграє значну роль у привабливості туристських центрів, оскільки навіть найбільш видовищні місця без відповідної транспортної інфраструктури та сервісів залишаються лише потенційними місцями туристського інтересу або визначаються низьким рівнем попиту без перспектив його зростання. Зазначимо, що інфраструктура туристських центрів здебільшого виконує подвійну функцію, забезпечуючи не лише обслуговування туристських потоків, а й пасажирських потоків самого туристського центру та прилеглих до нього територій.

Як правило, рішення щодо розвитку інфраструктури в будь-якому її контексті приймаються комплексно [2] з урахуванням її системного

характеру. Наприклад, розширення/реконструкція доріг, що пов'язують туристські центри однієї ієрархії, має бути узгоджено за параметрами з відповідними пасажирськими терміналами/вокзалами. Крім того, розмір парку транспортних засобів, що працюють на відповідних маршрутах у цьому напрямку, також має відповідати умовам пасажиропотоку та пропускної здатності вокзалів/терміналів тощо. Тому розвиток транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів, складником чого є відповідна інфраструктура, має здійснюватися комплексно й скоординовано, що зумовлює реалізацію цього розвитку за допомогою програми чи портфеля проєктів [3], продукти яких необхідно узгоджувати з урахуванням викладеного вище.

Аналіз проблеми й наявних методів

Коли йдеться про портфель проєктів, як правило, у дослідженнях розглядаються два основні підходи до його формування. Перший передбачає моделювання процесу відбору проєктів у портфель відповідно до системи критеріїв або одного комплексного критерію. Прикладами таких досліджень можуть бути праці [4–7]. Другий підхід передбачає оптимізацію структури портфеля, що забезпечує максимум економічного ефекту чи цінності з урахуванням системи обмежень. Прикладами досліджень оптимізації структури портфеля є роботи [8–10]. Зазначимо, що цільовим показником для портфеля [8, 10] у деяких сучасних дослідженнях пропонується "ентропія" відповідно до ентропійної концепції управління, але цей критерій доцільний для портфелів комплексного розвитку, що порушує різні аспекти діяльності компанії / організації / підприємства або навіть міста [4].

Але комплексний розвиток передбачає максимізацію заданого критерію за певних, передусім ресурсних, обмежень, а також необхідність узгодження показників розвитку й продуктів проєктів портфеля. Зазначені аспекти розвитку за допомогою портфелів і програм розглядалися в роботах [11–13]. Зокрема в дослідженні [13] пропонувалася модель для оптимізації параметрів продукту проєкту з урахуванням впливу його на інші аспекти розвитку, а саме транспортної інфраструктури. У роботі [14] детально розглянуто поняття "параметри продукту проєкту" на прикладі інфраструктурних проєктів у сфері водного транспорту й запропоновано відповідні моделі управління розвитком інфраструктури

з одночасним визначенням оптимальних параметрів взаємозалежних продуктів інфраструктурних проєктів.

Також необхідно зазначити, що проєкти, пов'язані з транспортним або транспортно-логістичним забезпеченням, мають певну особливість, що, зокрема, розглядалося у працях [15–18]. Отже, специфіка продуктів проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів і особливість процесів управління цими проєктами мають бути враховані для формування портфеля проєктів. Тому пропонується використовувати ідеї щодо структури моделей для оптимізації складу портфеля та параметрів продуктів відповідних проєктів, викладених у роботах [10–14], з метою розроблення моделі з оптимізації цільових показників (відповідних параметрів продуктів проєктів) портфеля транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів.

Мета дослідження з урахуванням викладеного вище – підвищення ефективності процесів портфельного управління з допомогою розвитку транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів.

Досягнення мети зумовлює необхідність вирішення **таких завдань**: 1) розробити концептуальну модель узгодження цільових показників / параметрів продуктів проєктів для портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів; 2) визначити математичний опис основних показників для математичної моделі як функцій від параметрів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів; 3) створити математичну модель визначення оптимальних і узгоджених цільових показників (параметрів продуктів проєктів) портфеля транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів.

Результати

З огляду на значущість туристського центру він може належати до однієї з категорій (рис. 1): міжнародного (національного рівня); рівня регіону (області); місцевого значення (рівня району). До того ж різнорівневі центри формують певні ієрархії з урахуванням географічної близькості. Тут необхідно зазначити, що центри одного рівня в одній ієрархії, виділені за географічною ознакою, можуть належати до різних областей (регіонів), що обґрунтовує інтегральний розгляд питань розвитку туристських центрів та узгодження стратегій і політики в цьому питанні різних регіонів, взаємопов'язаних географією

туризму. Такий інтегральний підхід, що враховує ієрархію туристських центрів, має бути основою

як стратегій розвитку туризму регіонів, так і туризму в країні загалом.

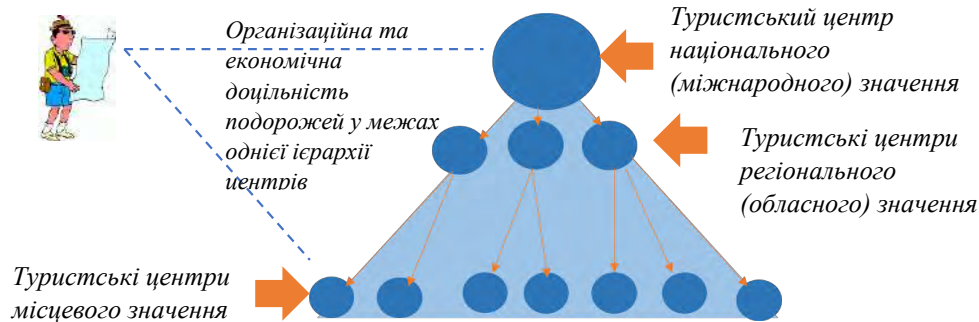


Рис. 1. Ієрархія туристських центрів

Ієрархія туристських центрів – це логістична система, пов'язана з відповідними транспортними хабами. За аналогією з логістикою виробництва, постачання та розподілу, транспортне забезпечення системи ієрархія туристських центрів – транспортні хаби формується з урахуванням інтеграції транспортно-логістичних систем центрів і хабів. Отже, під ієрархією туристських центрів розуміємо таку їх впорядковану сукупність, що визначається географічною близькістю та доступністю для туристів у межах однієї подорожі. Мається на увазі, що туристам, які відвідують один центр із певної ієрархії туристських центрів, організаційно (насамперед з погляду часу) та економічно доцільно відвідувати інші центри.

Розглянуті туристські центри (множина G) можуть бути згруповані за значущістю, що визначає рівні їх розгляду:

- множина $G_1, \gamma = \overline{1, \Gamma}$ – значущість лише на рівні країни (міжнародне значення), P – загальна кількість туристських центрів цієї категорії; прикладом може бути Буковель, Одеса;

- множина $G_{\gamma 2}, \gamma = \overline{1, \Gamma}$ – значущість на рівні регіону (області), V_γ – загальна кількість туристських центрів цієї категорії в територіальній близькості від туристського центру $\gamma = \overline{1, \Gamma}$;

- множина $G_{\gamma 3}, v = \overline{1, V_\gamma}, \gamma = \overline{1, \Gamma}$ – значущість для конкретного міста або регіону, меншого за рівнем, ніж область, B_v – загальна кількість туристських центрів цієї категорії у відповідному регіоні (більшого за ієрархією), що територіально тяжіє до туристського центру категорії $G_{\gamma 2}, \gamma = \overline{1, \Gamma}$.

Концепція узгодження цільових показників / параметрів продуктів проєктів для відповідного портфеля зображена на рис. 2. Це відповідає насамперед концепції логістики та самої сутності транспортно-логістичного забезпечення, що передбачає узгодження параметрів елементів логістичної системи для безперебійного проходження матеріального потоку. У цьому разі матеріальним потоком є туристський потік, як система – транспортно-логістична система туристського центру, що містить транспортно-логістичну інфраструктуру й парк транспортних засобів різних видів транспорту як самого центру, так і транспортних хабів, що з ним взаємопов'язані (якщо сам хаб не є туристським центром).

Отже, як було встановлено, основними цільовими показниками транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів є пропускна здатність P_{yl} та якість обслуговування I_{yl} для кожного виду транспорту $l = \overline{1, L}$, актуального для певного центру. Власне, ці показники відтворюють бажаний стан транспортно-логістичного забезпечення, що містить транспортно-логістичну інфраструктуру, парк транспортних засобів, сервіс і бізнес.

Транспортно-логістична інфраструктура й парк транспортних засобів формують транспортно-логістичну систему, параметри якої є визначальними для пропускної здатності та якості. Природно, що бізнес і організація сервісу також впливають на ці показники, але визначальною є транспортно-логістична система, тому більшість відповідних проєктів пов'язана саме з її об'єктами. Природно, що підсумкові (після реалізації проєктів) параметри транспортно-логістичних систем у межах ієрархічної

сукупності центрів мають бути узгоджені, тобто пропускна здатність частини систем, що пов'язує центри, має бути такою, щоб забезпечити проходження туристського потоку з урахуванням його розподілу (не весь туристський потік центру I рівня формує

туристський потік взаємопов'язаних центрів іншого рівня і под.), – це є окремим завданням дослідження й виходить за межі завдань, що вирішуються в цій роботі. Тому приймаємо, що такий розподіл відомий за наслідками окремих статистичних досліджень.

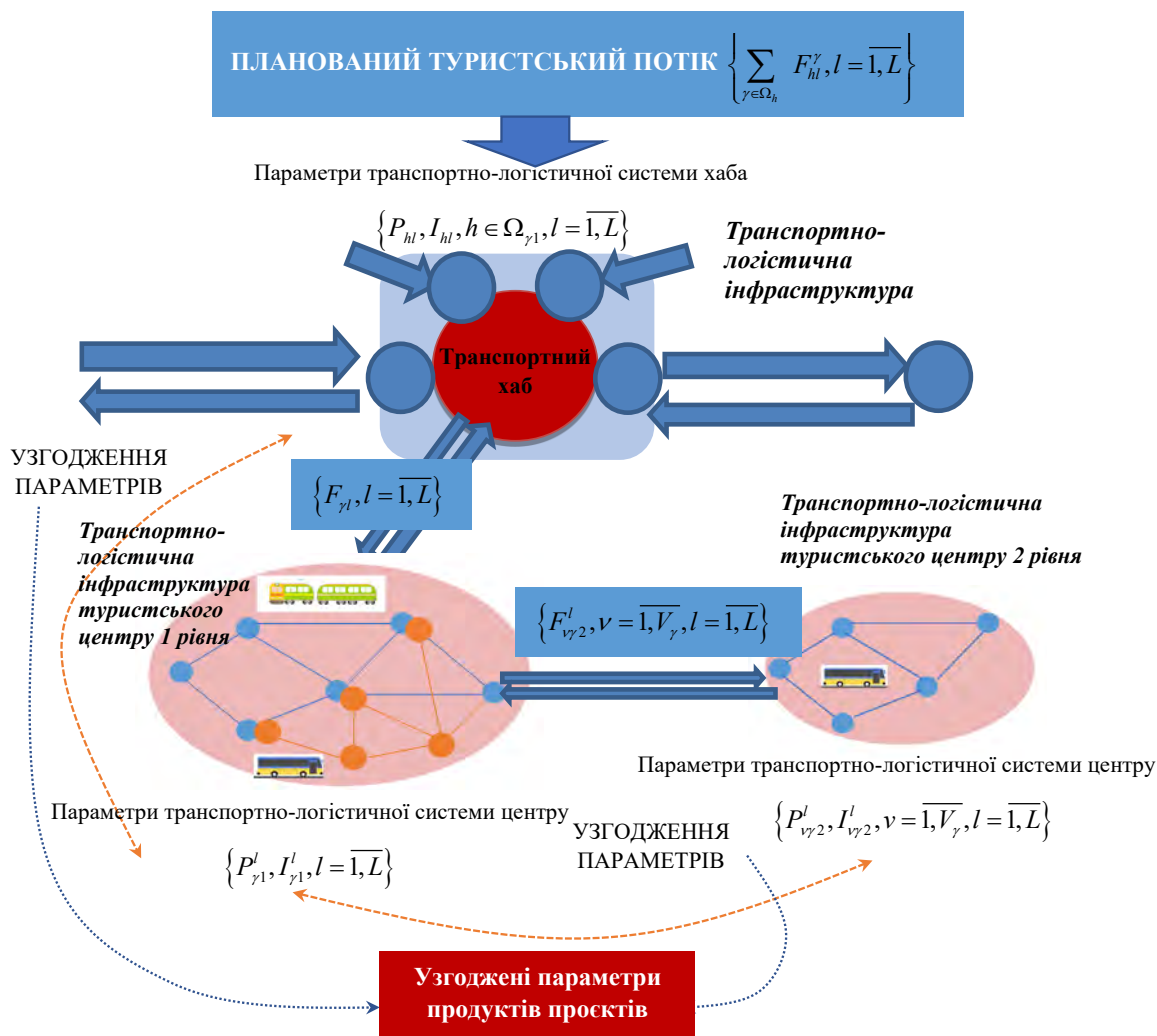


Рис. 2. Концептуальна модель узгодження цільових показників/параметрів продуктів проєктів для портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів

Позначимо відповідні туристські потоки в межах ієрархії туристських центрів так:

$F_{\gamma l}^l, l = \overline{1, L}$ – туристський потік центру I рівня, пов'язаний із транспортом l ;

$F_{\nu \gamma 2}^l, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L}$ – туристський потік центру II рівня, пов'язаний із транспортом l ;

$F_{b \nu \gamma 3}^l, b = \overline{1, B_{\nu}}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L}$ – туристський потік центру III рівня, пов'язаний із транспортом l .

Під туристським потоком розуміємо кількість туристів у межах певного проміжку часу, які користуються транспортно-логістичною системою центрів. Значимо, що в цьому випадку туристський

потік є інтегральною величиною та враховує туристів, які перебувають у конкретному центрі, і туристів, які пересуваються між центрами. Наприклад, до туристського центру "Білгород-Дністровський" багато людей можуть приїжджати на екскурсії безпосередньо з курортів Затока, Сергіївка тощо, минаючи Одесу, але більшість туристів цих центрів потрапляють туди через Одесу, яка є не лише туристським центром, а й хабом. Як зазначалося раніше, відповідні статистичні дослідження дають змогу оцінити розміри цих туристських потоків.

Оскільки ієрархія туристських центрів пов'язана з транспортними хабами, що можуть бути самі

туристськими центрами, то транспортно-логістична система ієрархії центрів виявляється ще й пов'язана з відповідною транспортно-логістичною системою транспортного хаба, параметри якої позначимо $\{P_{hl}, I_{hl}, h \in \Omega_{\gamma l}, l = \overline{1, L}\}$, де h – індекс хаба, $\Omega_{\gamma l}$ – множина хабів, пов'язаних із розглянутою ієрархією туристських центрів (γ – індекс центру I рівня, який формує цю ієрархію).

Оскільки кожен хаб може бути пов'язаний з кількома туристськими ієрархіями, то фактичний туристський потік для кожного хаба $\sum_{\gamma \in \Omega_h} F_{hl}^{\gamma}, l = \overline{1, L}$, де F_{hl}^{γ} – туристський потік через хаб h , що пов'язаний із центром γ , а Ω_h – множина центрів I рівня, пов'язаних із цим хабом.

Тут необхідно зазначити, що в ідеалі мають бути узгоджені параметри всіх задіяних транспортно-логістичних систем, зокрема система хабів, але практично такі питання належать до компетенцій різного рівня, тому фактично й практично можуть бути узгоджені лише параметри систем у межах ієрархії туристських центрів, що було обґрунтовано раніше. Отже, у цьому дослідженні розглядаємо лише питання узгодження параметрів (і відповідних цільових показників) транспортно-логістичних систем ієрархії туристських центрів, що є основою узгодження параметрів продуктів відповідних проектів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів. Під узгодженням параметрів транспортно-логістичних систем мають на увазі, що насамперед пропускна здатність аналізованих систем мають бути такою, щоб забезпечити безперешкодне проходження туристських потоків у цій ієрархії з урахуванням їх розподілу.

Величина туристського потоку визначається багатьма чинниками: передусім привабливістю об'єктів туристського інтересу й рівнем цих ресурсів (наприклад якість пляжів, гірськолижних трас тощо), а також усією взаємозалежною економічною (забезпечувальною) підсистемою – кількістю та якістю готелів, ресторанів, інших об'єктів харчування й навіть транспортно-логістичною інфраструктурою. Що більш розвинена остання, то привабливішим за інших рівних умов є туристський центр.

Отже, туристський потік визначається як пропускною здатністю транспортно-логістичної системи, так і рівнем якості транспортно-логістичного обслуговування (природно, що вища якість обслуговування, то привабливішим для туристів буде туристський центр, а вищий рівень пропускної здатності забезпечить також збільшення туристів):

$$F_{\gamma l}^l (P_{\gamma l}^l, I_{\gamma l}^l), l = \overline{1, L} \quad (1)$$

– для центру I рівня;

$$F_{v\gamma 2}^l (P_{v\gamma 2}^l, I_{v\gamma 2}^l), v = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L} \quad (2)$$

– для центру II рівня;

$$F_{bv\gamma 3}^l (P_{bv\gamma 3}^l, I_{bv\gamma 3}^l), b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L} \quad (3)$$

– для центру III рівня.

Зазначимо, що сутність та оцінка "якості транспортно-логістичного обслуговування" не розглядається в межах цього дослідження, також як і питання оцінки пропускної здатності системи. Тому в нашій роботі ці показники приймаються без деталізації. Проте необхідно наголосити на тому, що обидва зазначені показники є інтегральними, тобто формуються на базі оцінки та відповідного зіставлення пропускної здатності об'єктів транспортно-логістичної інфраструктури й провізної здатності парків транспортних засобів (за видами).

Отже, як поточний стан пропускної здатності транспортно-логістичних систем центрів $\Delta P_{\gamma l}^l, \Delta P_{v\gamma 2}^l, \Delta P_{bv\gamma 3}^l, b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L}$, так і їх плановий (перспективний) стан є, власне, векторними величинами, що описують пропуску / провізну здатність окремих об'єктів інфраструктури або парків транспортних засобів. Тому запропонована нижче модель може оперувати двома варіантами даних:

1) агрегованими величинами $\Delta P_{\gamma l}^l, \Delta P_{v\gamma 2}^l, \Delta P_{bv\gamma 3}^l, b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L}$ і встановлювати відповідно узгоджені агреговані по центрах цільові показники;

2) деталізованими величинами по кожному центру та встановлювати деталізовані цільові показники щодо кожного елемента транспортно-логістичної системи.

Як згадувалося вище, розподіл туристських потоків у межах ієрархії туристських центрів має певну закономірність, що призводить до таких залежностей:

$$F_{v\gamma 2}^l = \phi_{v\gamma 2}^l (F_{\gamma l}^l, \{F_{v\gamma 2}^l, v \in \Omega_{v\gamma 2}\}, \{F_{bv\gamma 3}^l, bv \in \Omega_{v\gamma 2}\}), l = \overline{1, L}, v = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L}, \quad (4)$$

де $\Omega_{v\gamma 2}$ – множина туристських центрів ієрархії (II й III рівнів), пов'язаних туристськими потоками (природно, що з центрів II рівня вилучено сам

$$F_{bv\gamma 3}^l = \phi_{bv\gamma 3}^l (F_{\gamma 1}^l, \{F_{v\gamma 2}^l, v \in \Omega_{bv\gamma 3}\}, \{F_{bv\gamma 3}^l, bv \in \Omega_{bv\gamma 3}\}, b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L}, \quad (5)$$

де $\Omega_{bv\gamma 3}$ – множина туристських центрів ієрархії (II й III рівнів), пов'язаних туристськими потоками (із центрів III рівня вилучено сам аналізований центр).

Формування основних показників для математичної моделі узгодження цільових показників портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів наведено на рис. 3.

Отже, як параметри управління (змінні) запропонованої моделі є приріст пропускної здатності

аналізований центр, який коригується за допомогою коефіцієнтів у відповідній функціональній залежності в числовому вигляді);

транспортно-логістичного забезпечення та якостей відповідного обслуговування туристських центрів однієї ієрархії. $\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l, \Delta P_{v\gamma 2}^l, \Delta I_{v\gamma 2}^l, \Delta P_{bv\gamma 3}^l, \Delta I_{bv\gamma 3}^l, b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L}$ за видами транспорту, що є актуальними для кожного центру. Результати приросту визначають безліч різних показників, пов'язаних безпосередньо або опосередковано через збільшення туристського потоку, що подано на рис. 3.

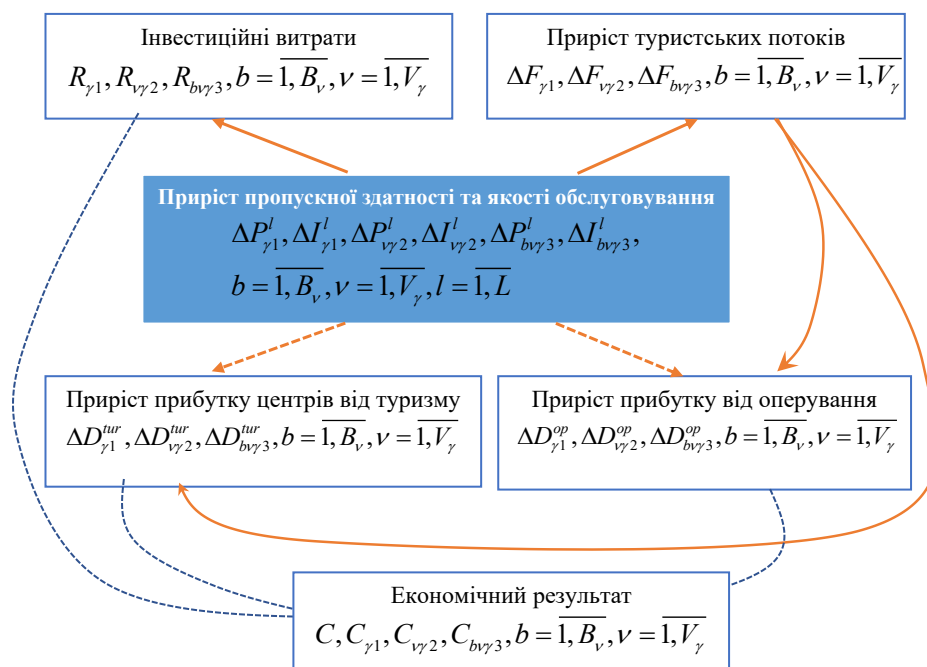


Рис. 3. Формування основних показників для математичної моделі узгодження цільових показників для портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів

Кожен показник приросту пов'язаний із інвестиціями $R_{\gamma 1}^l, R_{v\gamma 2}^l, R_{bv\gamma 3}^l, b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_\gamma}$, розмір яких є відповідною функцією від показників приросту:

$$R_{\gamma 1}^l = R_{\gamma 1}^l (\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l), l = \overline{1, L}; \quad (6)$$

$$R_{v\gamma 2}^l = R_{v\gamma 2}^l (\Delta P_{v\gamma 2}^l, \Delta I_{v\gamma 2}^l), v = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L}; \quad (7)$$

$$R_{bv\gamma 3}^l = R_{bv\gamma 3}^l (\Delta P_{bv\gamma 3}^l, \Delta I_{bv\gamma 3}^l), b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L}. \quad (8)$$

З іншого боку, аналізовані показники приросту $\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l, \Delta P_{v\gamma 2}^l, \Delta I_{v\gamma 2}^l, \Delta P_{bv\gamma 3}^l, \Delta I_{bv\gamma 3}^l, b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L}$ забезпечують збільшення туристських потоків $\Delta F_{\gamma 1}, \Delta F_{v\gamma 2}, \Delta F_{bv\gamma 3}, b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_\gamma}$, розмір яких також може бути описаний відповідними функціями від показників приросту:

$$\Delta F_{\gamma 1} = \Delta F_{\gamma 1} (\{\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l\}, l = \overline{1, L}); \quad (9)$$

$$\Delta F_{v\gamma 2} = \Delta F_{v\gamma 2} (\{\Delta P_{v\gamma 2}^l, \Delta I_{v\gamma 2}^l\}, v = \overline{1, V_\gamma}); \quad (10)$$

$$\Delta F_{bv\gamma 3} = \Delta F_{bv\gamma 3} (\{\Delta P_{bv\gamma 3}^l, \Delta I_{bv\gamma 3}^l\}, l = \overline{1, L}, b = \overline{1, B_v}, v = \overline{1, V_\gamma}). \quad (11)$$

Збільшення туристських потоків $\Delta F_{\gamma 1}, \Delta F_{\nu 2}, \Delta F_{b\nu\gamma 3}, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$ можуть бути отримані функції, що відтворюють залежність $\Delta D_{\gamma 1}^{tur}$, $\Delta F_{b\nu\gamma 3}, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$ забезпечує приріст прибутку туристських центрів $\Delta D_{\gamma 1}^{tur}, \Delta D_{\nu 2}^{tur}, \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{tur}, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$ від показників приросту туристських центрів $\Delta D_{\gamma 1}^{tur}, \Delta D_{\nu 2}^{tur}, \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{tur}, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$ – ідеться про прибуток від туризму з урахуванням усіх аспектів туристського обслуговування в центрі. Опосередковано через

$$\Delta D_{\gamma 1}^{tur} = \Delta D_{\gamma 1}^{tur} \left(\left\{ \Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right\} l = \overline{1, L} \right); \quad (12)$$

$$\Delta D_{\nu 2}^{tur} = \Delta D_{\nu 2}^{tur} \left(\left\{ \Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l \right\} \nu = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L} \right); \quad (13)$$

$$\Delta D_{b\nu\gamma 3}^{tur} = \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{tur} \left(\left\{ \Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right\} b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L} \right). \quad (14)$$

Крім збільшення прибутку центрів від туризму за рахунок власне туризму, центри (на рівні муніципалітетів, громад тощо) отримують ще й додатковий прибуток від оперування (експлуатації)

об'єктів транспортно-логістичної системи $\Delta D_{\gamma 1}^{l,op}, \Delta D_{\nu 2}^{l,op}, \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{l,op}, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$.

$$\Delta D_{\gamma 1}^{l,op} = \Delta D_{\gamma 1}^{l,op} \left(\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right), l = \overline{1, L}; \quad (15)$$

$$\Delta D_{\nu 2}^{l,op} = \Delta D_{\nu 2}^{l,op} \left(\Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l \right), \nu = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L}; \quad (16)$$

$$\Delta D_{b\nu\gamma 3}^{l,op} = \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{l,op} \left(\Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right), b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}, l = \overline{1, L}. \quad (17)$$

Значимо, що розмір інвестицій $R_{\gamma 1}^l, R_{\nu 2}^l, R_{b\nu\gamma 3}^l, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$ та додаткові доходи від оперування об'єктами транспортно-логістичної системи $\Delta D_{\gamma 1}^{l,op}, \Delta D_{\nu 2}^{l,op}, \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{l,op}, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$ належать до кожного конкретного виду транспорту. Показники приросту туристського потоку $\Delta F_{\gamma 1}, \Delta F_{\nu 2}, \Delta F_{b\nu\gamma 3}, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$ та приріст прибутку від туризму

$\Delta D_{\gamma 1}^{tur}, \Delta D_{\nu 2}^{tur}, \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{tur}, b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}$ ставляться до центрів загалом, оскільки ці показники мають враховувати певний ефект синергізму [11], що завжди проявляється за умови системного розвитку будь-якого об'єкта. Зокрема ці питання розглянуті в роботах [11, 12].

Отже, сумарні інвестиції в транспортно-логістичне забезпечення за кожним туристським центром:

$$R_{\gamma 1} = \sum_{l=1}^L R_{\gamma 1}^l = \sum_{l=1}^L R_{\gamma 1}^l \left(\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right); \quad (18)$$

$$R_{\nu 2} = \sum_{l=1}^L R_{\nu 2}^l = \sum_{l=1}^L R_{\nu 2}^l \left(\Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l \right), \nu = \overline{1, V_\gamma}; \quad (19)$$

$$R_{b\nu\gamma 3} = \sum_{l=1}^L R_{b\nu\gamma 3}^l = \sum_{l=1}^L R_{b\nu\gamma 3}^l \left(\Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right), b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}. \quad (20)$$

Відповідно, сумарний приріст доходів від оперування об'єктами транспортно-логістичної системи:

$$\Delta D_{\gamma 1}^{op} = \sum_{l=1}^L \Delta D_{\gamma 1}^{l,op} = \sum_{l=1}^L \Delta D_{\gamma 1}^{l,op} \left(\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right); \quad (21)$$

$$\Delta D_{\nu 2}^{op} = \sum_{l=1}^L \Delta D_{\nu 2}^{l,op} = \sum_{l=1}^L \Delta D_{\nu 2}^{l,op} \left(\Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l \right), \nu = \overline{1, V_\gamma}; \quad (22)$$

$$\Delta D_{b\nu\gamma 3}^{op} = \sum_{l=1}^L \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{l,op} = \sum_{l=1}^L \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{l,op} \left(\Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right), b = \overline{1, B_v}, \nu = \overline{1, V_\gamma}. \quad (23)$$

Ці показники формують підсумковий і загалом за ієрархією туристських центрів (27), економічний результат за кожним центром (24)–(26) що можуть бути подані таким чином:

$$C_{\gamma 1} = C_{\gamma 1} \left(\left\{ \Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) = \Delta D_{\gamma 1}^{op} + \Delta D_{\gamma 1}^{tur} - k_{\gamma 1} R_{\gamma 1}; \quad (24)$$

$$C_{\nu \gamma 2} = C_{\nu \gamma 2} \left(\left\{ \Delta P_{\nu \gamma 2}^l, \Delta I_{\nu \gamma 2}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) = \Delta D_{\nu \gamma 2}^{op} + \Delta D_{\nu \gamma 2}^{tur} - k_{\nu \gamma 2} R_{\nu \gamma 2}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}; \quad (25)$$

$$C_{b\nu\gamma 3} = C_{b\nu\gamma 3} \left(\left\{ \Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) = \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{ur} + \Delta D_{b\nu\gamma 3}^{op} - k_{b\nu\gamma 3} R_{b\nu\gamma 3}, b = \overline{1, B_{\nu}}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}; \quad (26)$$

$$C = C \left(\left\{ \Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right\}, \left\{ \Delta P_{\nu \gamma 2}^l, \Delta I_{\nu \gamma 2}^l \right\}, \left\{ \Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right\} \nu = \overline{1, V_{\gamma}}, b = \overline{1, B_{\nu}}, l = \overline{1, L} \right) = C_{\gamma 1} + \sum_{\nu=1}^{V_{\gamma}} \left[C_{\nu \gamma 2} + \sum_{b=1}^{B_{\nu}} C_{b\nu\gamma 3} \right], \quad (27)$$

де $k_{\gamma 1}, k_{\nu \gamma 2}, k_{b\nu\gamma 3}$ – коефіцієнти, що відображають ефективність інвестицій і дають змогу зіставляти прибуток за аналізований період з інвестиційними витратами.

Зазначимо, що (24)–(26) є функціями від усіх параметрів управління, пов'язаними з конкретним туристським центром, а (27) є функцією від усіх змінних, що розглядаються, – по всіх центрах і всіх видах транспорту.

У цьому разі в моделі не здійснюється декомпозиція за часовими періодами й усі показники належать до заданого часу, що дає змогу оцінити ситуацію загалом. Для отримання більш деталізованої інформації всі показники можуть бути розглянуті

в динаміці, і тоді економічним результатом можна розглядати NPV.

Вираз (27) пропонується використовувати як критерій оптимізації:

$$C = C_{\gamma 1} + \sum_{\nu=1}^{V_{\gamma}} \left[C_{\nu \gamma 2} + \sum_{b=1}^{B_{\nu}} C_{b\nu\gamma 3} \right] \rightarrow \max. \quad (28)$$

Система обмежень моделі має враховувати максимально доступний рівень інвестицій у транспортно-логістичну інфраструктуру, зокрема ці обмеження можуть стосуватися будь-якого виду транспорту для кожного центру, а можуть бути пов'язані лише з конкретним центром без деталізації за видами транспорту:

$$R_{\gamma 1} = \sum_{l=1}^L R_{\gamma 1}^l \left(\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right) \leq R_{\gamma 1}^{\max}; \quad (29)$$

$$R_{\nu \gamma 2} = \sum_{l=1}^L R_{\nu \gamma 2}^l \left(\Delta P_{\nu \gamma 2}^l, \Delta I_{\nu \gamma 2}^l \right) \leq R_{\nu \gamma 2}^{\max}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}; \quad (30)$$

$$R_{b\nu\gamma 3} = \sum_{l=1}^L R_{b\nu\gamma 3}^l \left(\Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right) \leq R_{b\nu\gamma 3}^{\max}, b = \overline{1, B_{\nu}}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}. \quad (31)$$

Також можна розглядати обмеження загалом щодо ієрархії центрів, якщо, наприклад, вони належать одному регіону й рішення щодо їх розвитку приймаються на одному рівні з необхідністю

неперевищення бюджету R_{TL}^{\max} на конкретний напрямок розвитку, у цьому випадку – на транспортно-логістичне забезпечення:

$$\sum_{l=1}^L \left[R_{\gamma 1}^l \left(\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right) + \sum_{\nu=1}^{V_{\gamma}} \left[R_{\nu \gamma 2}^l \left(\Delta P_{\nu \gamma 2}^l, \Delta I_{\nu \gamma 2}^l \right) + \sum_{b=1}^{B_{\nu}} R_{b\nu\gamma 3}^l \left(\Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right) \right] \right] \leq R_{TL}^{\max}. \quad (32)$$

Наступний комплекс обмежень оснований на необхідності врахування максимально можливого, на думку експертів, приросту туристських потоків. Навіть за чудово розвиненої інфраструктури відсутність інших важливих елементів туристського обслуговування, а в деяких випадках і фізичної можливості приймати певну кількість туристів,

приводить до того, що туристський потік має бути обмеженим. Крім того, таке обмеження може залежати від можливостей транспортних хабів, пов'язаних із певною ієрархією центрів. Тому за кожним туристським центром необхідно запровадити обмеження по верхній та нижній межах туристського потоку.

$$\Delta F_{\gamma 1}^{\max}, \Delta F_{\nu 2}^{\max}, \Delta F_{b\nu\gamma 3}^{\max}, \Delta F_{\gamma 1}^{\min}, \Delta F_{\nu 2}^{\min}, \Delta F_{b\nu\gamma 3}^{\min}, b = \overline{1, B_{\nu}}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}} :$$

$$\Delta F_{\gamma 1}^{\min} \leq \Delta F_{\gamma 1} \left(\left\{ \Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) \leq \Delta F_{\gamma 1}^{\max} ; \quad (33)$$

$$\Delta F_{\nu 2}^{\min} \leq \Delta F_{\nu 2} \left(\left\{ \Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) \leq \Delta F_{\nu 2}^{\max}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}} ; \quad (34)$$

$$\Delta F_{b\nu\gamma 3}^{\min} \leq \Delta F_{b\nu\gamma 3} \left(\left\{ \Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) \leq \Delta F_{b\nu\gamma 3}^{\max}, b = \overline{1, B_{\nu}}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}} . \quad (35)$$

Нижня границя туристського потоку $\Delta F_{\gamma 1}^{\min}$, $\Delta F_{\nu 2}^{\min}$, $\Delta F_{b\nu\gamma 3}^{\min}$, ΔF_{γ}^{\min} пов'язана зі стратегічними цілями з туризму для цих центрів і регіону загалом.

$$\Delta F_{\gamma 1} \left(\left\{ \Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) + \left(\sum_{\nu=1}^{V_{\gamma}} \Delta F_{\nu 2} \left(\left\{ \Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) \right) + \left(\sum_{b=1}^{B_{\nu}} \Delta F_{b\nu\gamma 3} \left(\left\{ \Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right\} l = \overline{1, L} \right) \right) \geq \Delta F_{\gamma}^{\min} . \quad (36)$$

Наступний блок обмежень пов'язаний безпосередньо з параметрами управління (змінними моделями) – приростом пропускної здатності та якості обслуговування для транспортно-логістичних систем $\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l, \Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l, \Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l, b = \overline{1, B_{\nu}}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L}$. Зазначені обмеження враховують

$$\begin{aligned} \Delta P_{\gamma 1}^{\min} \leq \Delta P_{\gamma 1}^l \leq \Delta P_{\gamma 1}^{\max}, \Delta I_{\gamma 1}^{\min} \leq \Delta I_{\gamma 1}^l \leq \Delta I_{\gamma 1}^{\max}, \Delta P_{\nu 2}^{\min} \leq \Delta P_{\nu 2}^l \leq \Delta P_{\nu 2}^{\max}, \Delta I_{\nu 2}^{\min} \leq \Delta I_{\nu 2}^l \leq \Delta I_{\nu 2}^{\max}, \\ \Delta P_{b\nu\gamma 3}^{\min} \leq \Delta P_{b\nu\gamma 3}^l \leq \Delta P_{b\nu\gamma 3}^{\max}, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^{\min} \leq \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \leq \Delta I_{b\nu\gamma 3}^{\max}, b = \overline{1, B_{\nu}}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L}. \end{aligned} \quad (37)$$

Як правило, у моделей, пов'язаних із розподілом інвестицій, обов'язковою умовою є або завдання нижньої межі економічного результату, або введення як обмеження додаткового показника ефективності інвестицій – рентабельності I^{inv} , наприклад [8, 9]. Незважаючи на те, що чимало проєктів, пов'язаних із транспортно-логістичним забезпеченням туристських

$$\frac{C_{\gamma 1} + \sum_{\nu=1}^{V_{\gamma}} \left[C_{\nu 2} + \sum_{b=1}^{B_{\nu}} C_{b\nu\gamma 3} \right]}{\sum_{l=1}^L \left[R_{\gamma 1}^l \left(\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l \right) + \sum_{\nu=1}^{V_{\gamma}} \left[R_{\nu 2}^l \left(\Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l \right) + \sum_{b=1}^{B_{\nu}} R_{b\nu\gamma 3}^l \left(\Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l \right) \right] \right]} \geq I^{inv} . \quad (38)$$

Отже, (28)–(38), а також співвідношення (4), (5), що "балансують" туристські потоки центрів однієї ієрархії, формують математичну модель формування оптимальних і узгоджених цільових показників для портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів однієї ієрархії (або її частини). Відповідно, зазначена модель установлює такі значення $\Delta P_{\gamma 1}^l, \Delta I_{\gamma 1}^l, \Delta P_{\nu 2}^l, \Delta I_{\nu 2}^l, \Delta P_{b\nu\gamma 3}^l, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^l, b = \overline{1, B_{\nu}}, \nu = \overline{1, V_{\gamma}}, l = \overline{1, L}$, що відповідають

Останнє може виражатися в інтегральній величині туристського потоку з ієрархії центрів (регіону):

доцільну верхню межу цих величин $\Delta P_{\gamma 1}^{\max}, \Delta I_{\gamma 1}^{\max}, \Delta P_{\nu 2}^{\max}, \Delta I_{\nu 2}^{\max}, \Delta P_{b\nu\gamma 3}^{\max}, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^{\max}$, а також необхідний мінімум $\Delta P_{\gamma 1}^{\min}, \Delta I_{\gamma 1}^{\min}, \Delta P_{\nu 2}^{\min}, \Delta I_{\nu 2}^{\min}, \Delta P_{b\nu\gamma 3}^{\min}, \Delta I_{b\nu\gamma 3}^{\min}$, пов'язаний також із стратегічними цілями центру / регіону:

центрів, як і багато інфраструктурних проєктів, є некомерційними [14], проте їх ефект проявляється в цьому випадку в прирості туристського потоку та додаткового прибутку для центру, що враховано в (28). Тому в модель може бути введено відповідне обмеження, наприклад, вигляду:

наведеним умовам. Як згадувалося вище, ця модель може бути подана в деталізованому вигляді, з урахуванням а) тимчасових етапів; б) конкретних об'єктів транспортно-логістичної системи. Сенс обмежень у цьому разі не змінюється, але зростає розмірність моделі й виникає необхідність використання більшого масиву деталізованої інформації для її практичної реалізації.

Висновки

Отже, розроблено концептуальну й відповідну математичну модель щодо визначення оптимальних і узгоджених цільових показників портфеля проектів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів. Погодження формується на рівні туристських потоків з урахуванням їх можливого розподілу між туристськими центрами, а також єдиного джерела фінансування. Параметрами управління моделі є необхідні показники приросту пропускної здатності та якості обслуговування транспортно-логістичних систем туристських центрів однієї ієрархії. Цільова функція моделі відтворює максимізацію економічного ефекту від реалізації проектів щодо підвищення

пропускної здатності та якості. Обмеження враховують можливості фінансування, ефективність інвестицій, цілі з туристських потоків кожного центру й навіть умови узгодження туристських потоків у центрах однієї ієрархії (чи його частини).

Цільові показники, що встановлюються таким чином, є основою для визначення цінностей проектів, пов'язаних із транспортно-логістичним забезпеченням туристських центрів.

Модель враховує особливості параметрів транспортно-логістичного забезпечення, але ж її структура й принцип побудови можуть бути використані для формування моделей оптимізації та узгодження цільових показників проектів портфелів, продукти яких є взаємозалежними.

Список літератури

1. Edirisinghe L., Silva S., Siriwardena S. (2021) The Future of Travel Business: A Conceptual Approach through Tourism Logistics Perspectives. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3992920>
2. Немчук О. О., Верещака М. А., Онищенко С. П. (2021). Сутність та специфіка інфраструктурних проектів на водному транспорті. *Transport development*, (1 (8)), P. 135–148. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.13>
3. Sözüera, M., Spanga, K. (2014). The Importance of Project Management in the Planning Process of Transport Infrastructure Projects in Germany. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 119, P. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.067>
4. Bushuyev S, Bushuyeva N, Onyshchenko S., Khodikova I. (2022) Smart Cities: Through Projects to Resist Entropy. *IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)*, Bilbao, Spain, 2022, 44–50 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/E-TEMS53558.2022.9944516>
5. Вишневська, М., Крамаренко, А., Козенков, Д. (2022). Оцінка та відбір проектів на основі використання інтегрованого показника інноваційності проекту. *Економіка та суспільство*, (44). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-44-1>
6. Кійко С., Дружинін Є., Прохоров О. (2019). Модель структурного синтезу портфеля енергозберігаючих проектів металургійного підприємства. *Radioelectronic and computer systems*. P. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.4.07>
7. Lapkina I., Prykhno Yu., Lapkin O. (2020) Content Optimization of the Development of Multi-Project of a Shipping Company. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3(104)), P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199477>
8. Bondar A., Onyshchenko S. (2020). Experimental studies of a model for optimizing the portfolio of a project-oriented organization based on the entropy concept. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, (4 (14)). P. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.021>
9. Bushuyev S., Onyshchenko S., Bushuyeva N., Bondar A. Modelling projects portfolio structure dynamics of the organization development with a resistance of information entropy. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, LVIV, Ukraine, 2021. P. 293–298. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648713>
10. Pavlova, N. L., Onyshchenko, S. P. (2020). The concept of modeling the optimal parameters of the project portfolio of a project-oriented organization. *Mathematical modeling in engineering and technology*, (1), 1355 p. DOI: <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2020.1.11>
11. Onyshchenko, S. P., Arabadzy, E. S. (2011) Formation of the optimal enterprise development program. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 3 (54). P. 60–66.
12. Onyshchenko, S., Leontieva, A. Modeling of the Optimal Composition of the Enterprise Technical Development Program. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(2). P. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.146463>
13. Vereshchaka, N. (2020). Optimization of infrastructure project product parameters. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 4 (14). P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.031>
14. Vereshchaka M. (2021) Optimization of infrastructure projects parameters in the program. *Technology Audit and Production Reserves*. (2(57)). P. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225523>
15. Lapkina I., Malaksiano M., Savchenko Y. (2020). Design and optimization of maritime transport infrastructure projects based on simulation modeling methods. *In CEUR Workshop Proceedings*. P. 36–45.

16. Pavlova N., Onyshchenko S. (2020). Organization of transport company's project-oriented management (on the example of the freight forwarding company). *Management of Development of Complex Systems*, 42. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.23-28>
17. Andrievska V., Bondar A., Onyshchenko S. (2019). Identification of creation and development projects of logistic systems. *Development of management and entrepreneurship methods on transport*. P. 26–37. DOI: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2019-4-26-37>.
18. Rusanova, S. (2020). Modeling the impact of the transport provision option on project risks. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (14). P. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2020.14.078>

Reference

1. Edirisinghe L., Silva S., Siriwardena S. (2021) The Future of Travel Business: A Conceptual Approach through Tourism Logistics Perspectives. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3992920>
2. Nemchuk O.O., Vereshhaka M.A., Onyshchenko S.P. (2021). Sutnistj ta specifika infrastrukturykh projektiv na vodnomu transporti. *Transport development*, (1 (8)). P. 135–148. <https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.13>
3. Sözüera, M., Spanga, K. (2014). The Importance of Project Management in the Planning Process of Transport Infrastructure Projects in Germany. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 119, P. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.067>
4. Bushuyev S, Bushuyeva N, Onyshchenko S., Khodikova I. (2022) Smart Cities: Through Projects to Resist Entropy. *2022 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)*, Bilbao, Spain, 2022, 44–50 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/E-TEMS53558.2022.9944516>
5. Vyshnevsjka, M., Kramarenko, A., Kozenkov, D. (2022). Ocinka ta vidbir projektiv na osnovi vykorystannja integhrovanogho pokaznyka innovacijnosti projektu. *Ekonomika ta suspiljstvo* (44). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-44-1>
6. Kijko S., Druhynin Je., Prokhorov O. (2019). Modelj strukturogno syntezu portfelja energhozbereghajuchykh proektiv metalurghijnogho pidprijemstva. *Radioelectronic and computer systems*. P. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2019.4.07>
7. Lapkina I., Prykhno Yu., Lapkin O. (2020) Content Optimization of the Development of Multi-Project of a Shipping Company. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3(104)), P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199477>
8. Bondar A., Onyshchenko S. (2020). Experimental studies of a model for optimizing the portfolio of a project-oriented organization based on the entropy concept. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, (4 (14)). P. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.021>
9. Bushuyev S., Onyshchenko S., Bushuyeva N., Bondar A. Modelling projects portfolio structure dynamics of the organization development with a resistance of information entropy. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, LVIV, Ukraine, 2021. P. 293–298. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648713>
10. Pavlova, N. L., Onyshchenko, S. P. (2020). The concept of modeling the optimal parameters of the project portfolio of a project-oriented organization. *Mathematical modeling in engineering and technology*, (1), 1355 p. DOI: <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2020.1.11>
11. Onyshchenko, S. P., Arabadzhy, E. S. (2011) Formation of the optimal enterprise development program. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 3 (54). P. 60–66.
12. Onyshchenko, S., Leontieva, A. Modeling of the Optimal Composition of the Enterprise Technical Development Program. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(2). P. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.146463>
13. Vereshchaka, N. (2020). Optimization of infrastructure project product parameters. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 4 (14). P. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.031>
14. Vereshchaka M. (2021) Optimization of infrastructure projects parameters in the program. *Technology Audit and Production Reserves*. (2(57)). P. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.225523>
15. Lapkina I., Malaksiano M., Savchenko Y. (2020). Design and optimization of maritime transport infrastructure projects based on simulation modeling methods. *In CEUR Workshop Proceedings*. P. 36–45.
16. Pavlova N., Onyshchenko S. (2020). Organization of transport company's project-oriented management (on the example of the freight forwarding company). *Management of Development of Complex Systems*, 42. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.23-28>
17. Andrievska V., Bondar A., Onyshchenko S. (2019). Identification of creation and development projects of logistic systems. *Development of management and entrepreneurship methods on transport*. P. 26–37. DOI: <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2019-4-26-37>
18. Rusanova, S. (2020). Modeling the impact of the transport provision option on project risks. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (14). P. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2020.14.078>

Ходікова Інна Володимирівна – Одеський національний морський університет, старший викладач кафедри "Управління логістичними системами і проектами"; Одеса, Україна; e-mail: xodikowa@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6341-6941>

Khodikova Inna – Odesa National Maritime University, Senior Lecturer, Department "Logistic system and Project Management", Odesa, Ukraine.

OPTIMISATION OF TARGET INDICATORS OF THE PROJECT PORTFOLIO FOR TRANSPORT AND LOGISTICS SUPPORT OF TOURIST CENTRES

The subject of the study is modelling the optimal target indicators of the portfolio of projects for transport and logistics support of tourist centres. **The aim of the study** is to improve the efficiency of portfolio management processes for the development of transport and logistics support for tourist centres. **Tasks:** 1) to develop a conceptual model for harmonising targets / parameters of project products for the portfolio of projects for the transport and logistics support of tourist centres; 2) to determine the mathematical description of the main indicators as functions of the parameters of transport and logistics support of tourist centres; 3) to develop a mathematical model for determining optimal and consistent targets for the portfolio of transport and logistics support of tourist centres. **Research methods are:** methodology and methods of system analysis, methods of operations research. The following results were obtained: the concept of "hierarchy of tourist centres" was introduced, which is a logistics system that is linked to the relevant transport hubs. To manage transport and logistics projects as part of the portfolio, a conceptual and appropriate mathematical model has been developed to determine the optimal and consistent target indicators of the portfolio of transport and logistics projects for tourism centres as part of the hierarchy. The coordination is formed at the level of tourist flows, taking into account their possible distribution among tourist centres, as well as a single source of funding. The model's control parameters are the necessary indicators of the increase in the capacity and quality of service of transport and logistics systems of tourist centres of the same hierarchy. The objective function of the model reflects the maximisation of the economic effect of implementing projects to improve capacity and quality. The constraints take into account funding opportunities, investment efficiency, goals for the development of tourist flows in each centre, and the conditions for coordinating tourist flows in the centres of the same hierarchy (or part of it). The results obtained take into account the peculiarities of forming economic indicators for the hierarchy of tourist centres and form the basis for assessing the value of transport and logistics projects for tourist centres. **Conclusions:** The results of the study are a conceptual and appropriate mathematical model that allows to form optimal and consistent parameters of the products of projects for the integrated development of transport and logistics support for tourist centres. The model takes into account the peculiarity of the parameters of transport and logistics support, but its structure and construction principle can be used to form models for optimising and coordinating the target indicators of portfolio projects whose products are interdependent.

Keywords: tourist centres; transport and logistics infrastructure; coordination; optimisation; targets; hierarchy.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ходікова І. В. Оптимізація цільових показників портфеля проєктів транспортно-логістичного забезпечення туристських центрів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.143>

Khodikova, I. (2023), "Optimisation of target indicators of the project portfolio for transport and logistics support of tourist centres", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 143–154. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.143>

O. IASTREMSKA, H. NEBYLYTSIA

SOCIAL NETWORKS AS A TOOL FOR ENTREPRENEURSHIP IN THE CONDITIONS OF THE ECONOMY OF IMPRESSIONS

In recent years, Internet and social networks have become a full-fledged platform for business and have significant functions of effective and accurate communication to the target audience of information about potential customers, the availability of necessary communication tools to work with customers, companies, sales of goods, services and more. This is especially important in the context of the development of the economy of impressions. The **subject** of the article is the analysis of the use of social networks in business activities in the conditions of the impression economy. Analysis of the scientific literature has shown that foreign and domestic scientists are constantly looking for ways to develop business in the online environment. However, scientific works on entrepreneurship in social networks are insufficiently substantiated and adapted to the conditions of functioning Ukrainian enterprises, so they need further development. The **purpose** of this article is to substantiate theoretically the peculiarities of entrepreneurial activity of Ukrainian business entities in social networks. The **main tasks** of the article are: analysis of statistical data on the use of social networks in business activities and justification of recommendations for the effectiveness of business activities in social networks. The following research **methods** were used: analysis and synthesis, statistical analysis, monographic analysis, deductive and inductive method, graphic method. The following **results** were obtained. It is determined, it was concluded that among the existing platforms for business on the Internet, Facebook and Instagram – these are the two best platforms used by marketers. It was noted which social channels are used by experienced marketers to promote the company's products on social networks compared to those who are just starting out. Thus, "young" social network marketers for effective entrepreneurship focus mainly on Facebook and Instagram. At the same time, the most experienced marketers are very diversified in this process. The main criteria for using video content in business as the most effective tool for doing business on social networks are summarized. The **main conclusions** are as follows. An analysis of the use of video marketing in online business has shown that YouTube is the number one video channel. At the same time, TikTok is a new video platform, but has already actively regained its place in the market. Therefore, the main criteria for including videos in the TikTok recommendation have been summarized. The main opportunities of SMM in different business segments were also considered. The peculiarities of SMM use for large, medium, small businesses, Internet business and b2b-sphere were noted. The main advantages of entrepreneurship in social networks were summarized and highlighted. The results of the study can be the basis for further development of the practical use of social networks for the entrepreneurial activities of Ukrainian enterprises.

Keywords: business; economy of impressions; social networks; Internet; Facebook; Instagram; TikTok; target audience; online platform; video marketing; SMM.

Introduction

Today, entrepreneurship is a strategic factor and an internal source of unsustainable economic development and material well-being of the country's population in market conditions. At the same time, the spread of information technology helps to increase opportunities for business on the Internet, which is especially important for the development of the economy of impressions. This leads to increased competition and necessitates the development of enterprises using Internet technologies. There are also opportunities for quick start-ups for entrepreneurs through the use of modern tools on the Internet.

The rapid pace of technological progress involves the intensification of forms of business via the Internet as an independent economic activity. In order to influence

the subjects of the external and internal environment, to form positive impressions of enterprises, their products, in today's market environment, more and more operations are carried out in cyberspace. These include not only objective processes such as trade, but also to some extent subjective and emotional, such as the promotion of goods or services, company image formation and branding, marketing communications and others that create positive impressions about business entities and their capabilities and achievements. However, it should be noted that more than half of the world's population now uses social media, now is the perfect time to rethink how you can use these powerful platforms for business. Today there are tens of thousands of different social networks and services: communication, professional, graphic, blogging, news, video and many others. Realizing the size of the target audience, non-network media hastily open their offices

on social networks, integrate their sites with Facebook, Instagram, Telegram and similar popular networks.

Impression management in social media marketing is one of the most effective methods of business development, product promotion, consumer impact. Not only the number of users of social networks is increasing every day, but also the time that these users spend on social sites. The task of the company's marketers is to get part of this daily user time to attract attention to the company, form a positive attitude towards it, create a user's desire to buy a product / service or make other targeted actions for the company. After all, the analysis of the characteristics of entrepreneurship in social networks will help marketers to make informed decisions about the implementation or rejection of such a policy and increase its effectiveness in general. Therefore, the topic of this study is very relevant for both scientists and Ukrainian entrepreneurs.

The purpose of this article is to theoretically substantiate the peculiarities of entrepreneurial activity of Ukrainian business entities in social networks to create positive impressions about the results of their activities and opportunities. To achieve this goal, the following tasks were set and solved:

- to analyze statistical data on the use of Internet (social networks) in business;
- to justify the effectiveness of entrepreneurial activity in social networks;
- to generalize the main criteria for the use of video content in business as the most effective tool for business in social networks;
- to consider the main opportunities of SMM in different business segments;
- to highlight the main benefits of doing business on social networks.

Literature review

The development of entrepreneurship in the online environment has led to increased attention of scientists in this area. Thus, both domestic and foreign scientists such as Z. Wilger, J. Kramolish, N. Kapolupo [1], E. Ikechukwu, A. Emmanuel, I. Edjikeme [2], pay attention to the functioning of enterprises on the Internet. Sadigov [3], A. Hamvon [4], D. Tavorn, P. Trichob, V. Klongtong, C. Ngamkroekjoti [5], I. Otenko [6], S. Ilyashenko [7], O. Belovodskaya [8], T. Ilchenko [9], D. Doroshkevich [10] and others. It should be noted that, for example, Z. Wilger, J. Kramolish and N. Kapolupo in their work "The impact of social media on the

internationalization of SMM" [1] identify the impact of social media as a tool of marketing strategy in the economy of impressions to conquer new markets. The authors present the results of an empirical study for 2019–2020 to assess the differences in approaches to social networks according to some factors. Also interesting is the study of E. Ikechukwu, A. Emmanuel and I. Edjikem [2], where the authors explore the relationship and impact of social networks on the competitive advantages of firms. Emphasize the positive impact and note that the capabilities of technological infrastructure significantly affect the competitive advantages of "young" firms. In the study, the authors emphasize the need to change the ways of using social networks by new firms, and argue that the use of social networks is a necessary need in today's world. Also noteworthy is the study of R. Sadigov [3], where the author considers current trends in digitalization from the standpoint of business innovation management; analyzes and substantiates the relationship between indicators of innovation and digital profile and the level of entrepreneurship. The author constructs a regression model of panel data with fixed effects in order to determine the impact of digitalization parameters on the parameters of business sector development.

In "How to turn millennial consumers into brand preachers with the help of micro-influencers in social networks" [4] A. Hamvon emphasizes that today social networks have caused an information explosion among young people, which is the largest target audience for sellers. The study notes that millennials are the main driving force for business development, and that they are the leaders for brand development through social networks.

Advertising plays an important role in creating brand awareness and leads to consumer behavior about the service or product. Thus, D. Tavorn, P. Trichob, W. Klongtong, C. Ngamkroekjoti [5] confirm that the value of video advertising in social networks shape the attitude and reaction of the target audience to the company, which in turn affects the entrepreneurial activity on the Internet. business.

It is necessary to determine the thoroughness of research by I. Otenko, O. Ptashchenko, and J. Kushch [6], which present the main features of e-business in the world market, as well as determine its state and development trends. The authors emphasize that the digital globalization of economic processes is becoming a fundamental trend and principle of the modern economy, which is determined not only by revolutionary technological changes but also the laws of economic

evolution in general, orients modern management to business rules, promotes productivity, as well as eliminates the negative phases of the economic cycle.

Analysis of the scientific literature has shown that foreign and domestic scientists are constantly looking for ways to develop business in the online environment. However, scientific works on entrepreneurship in the virtual space as a whole and in social networks including are insufficiently substantiated and adapted to the conditions of functioning of Ukrainian enterprises, so they need further development.

Materials and methods

The methodological basis of the work are general scientific and special methods of scientific research. In particular, methods of analysis and synthesis are used to determine trends and functional patterns of use of social networks in business. The statistical analysis is used to diagnose the use of social networks in the world, highlight the most popular social platforms in the network and identify trends in the use of relevant platforms in the online environment. The method of morphological analysis was used to identify and summarize the main criteria for video in the recommendations of TikTok and formulate the benefits of doing business on social networks. The deductive method used to systematize information about business in the online environment in general and the use of social networks in particular; inductive method – to summarize the results of using existing social

networking platforms for doing business on the Internet; graphical method – to visualize the results.

Results and discussion

In recent years, the Internet as a whole and social networks particularly have become a full-fledged platform for business and have significant functions of effective and accurate communication to the target audience of information about potential customers, the availability of necessary communication tools to work with customers, companies, sales of goods, services and more. The main advantages of Internet are ease of access to information and speed of its dissemination. The development of business in virtual space can be successful and to promote the growth of net profits of enterprises with the creation and support of brand offices, as well as reputation management in all areas with a social component.

The Internet in general and with social networks in particular have somewhat transformed the entrepreneurial activity of the enterprise. Today, social networks vary in popularity with different demographics, and they are still developing in both the world market and the Ukrainian market. According to experts from the international companies "We Are Social" and "Hootsuite", users of social networks have grown by more than 10% over the last year, reaching a total of 4.55 billion by early October 2021 (Fig. 1) [11]. This means that more than half of the world's population now uses social media.

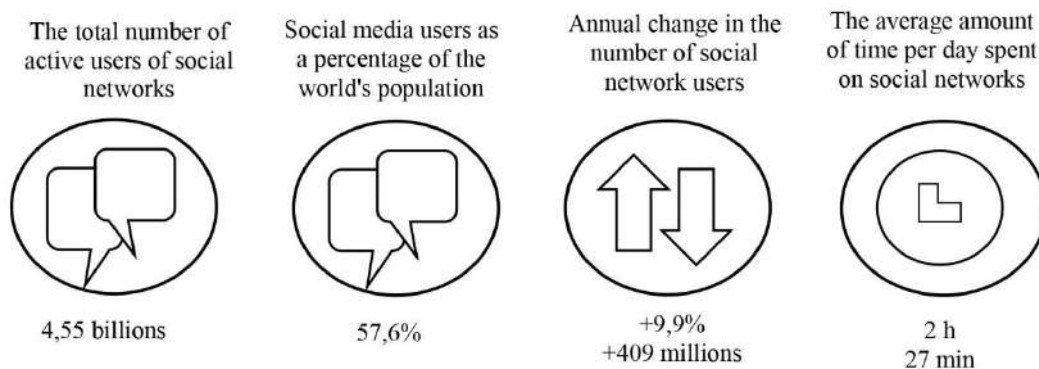


Fig. 1. Use of social networks around the world (defined by [11])

A study done by Global WebIndex shows that worldwide, social network users now spend an average of 2 hours and 27 minutes a day of multimedia work on an average of 8 social networks and messaging

applications [12]. Growth trends show that, on average, more than 1 million people have started using social media for the first time every day in the last 12 months, equating to almost 13 new users every second. It should

be noted that Facebook continues to dominate the ranking of the world's most popular social networking platforms (Fig. 2) [13].

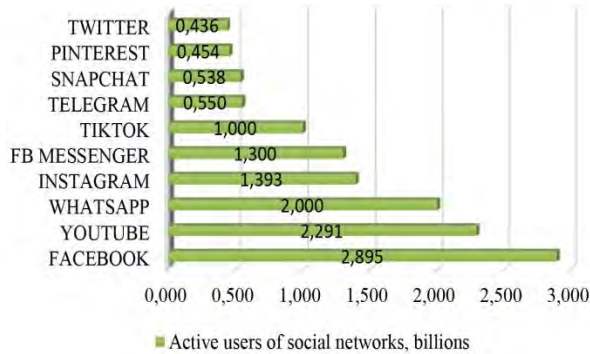


Fig. 2. The world's most popular social platforms (summarized by [13])

The company's "core" platform now claims more than 2.8 billion monthly active users, while 2 billion people use its leading WhatsApp messenger platform.

Instagram has also seen impressive growth in recent weeks, with the latest data from the company's advertising audience showing that more than 1.39 billion people now use the platform every month. Recent figures suggest that Instagram added 111 million new users to its advertising reach last quarter, equating to quarterly growth of more than 10%. The figures mean that Instagram's ad audience is currently growing at a rate of more than 1 million new users per day, bringing the global network coverage to 1.39 billion by early October 2021. That is, Instagram is still ahead of TikTok when it comes to monthly active users, but analysis of various data points indicates that the short video sensation ByteDance is still growing rapidly.

At the same time, TikTok announced that it had crossed 1 billion monthly active users at the end of September 2021 [15], making it the seventh social networking platform to join the exclusive club of billions of users.

As for the next well-known online platform where it is possible to do business – Twitter, they have lost profits to the audience. Advertising coverage is now sinking back below the figures that were shown back in January. However, it should be noted that the figures reported in Twitter's advertising tools are subject to significant fluctuations, even for relatively short periods of time. In addition, the 90 percent drop in the number of registered Twitter users in Ukraine played a significant role in reducing this quarter.

Thus, Facebook and Instagram are the two best platforms used by marketers in business. All other platforms lag behind these two best.

Figure 3 presents the results of a thorough review of which social channels are used by experienced marketers to promote the company's products on social networks compared to those who are just starting.

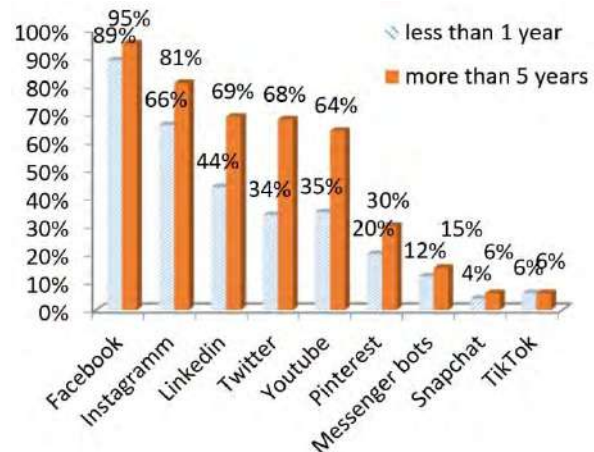


Fig. 3. Using of the platform: beginners and experienced marketers (calculated for [16])

Thus, "young" social network marketers for effective entrepreneurship focus mainly on Facebook (89%) and Instagram (66%) [12]. At the same time, the most experienced marketers are very diversified in this process. It should be noted that Facebook continues its decline, which began in 2019, in terms of traffic to the platform. At the same time, the growth of Instagram can be clearly seen, along with the decline of Twitter (Fig. 4) [17].

It is worth noting that today in business activities in the online environment, much attention is paid to video marketing. Video content is thriving now, and integrating it into marketing strategies is a vital element of online business to attract customer attention. The video has changed the consumption of content because it provides information in a much more interactive, visual and entertaining way.

In addition, video is a natural means of storytelling, making it an effective method of persuasion. Millennials' favorite form of content is video. According to a Hubspot study, 96% of consumers between the ages of 18 and 34 watch videos several times a week, and 75% of millennials watch at least one video a day. The same Hubspot study also shows that videos help attract a brand and sell it. And also influence consumers' purchasing decisions. In fact, 64% of consumers say that

commercials have influenced their purchasing decisions. The 8 billion videos are viewed on Facebook every day. Video ads on Instagram Stories can increase the impact of advertising and buying intentions. Instagram promotional videos generate 3 times more comments than photos.

6-second Youtube commercials increase advertising response by more than 30% [18]. Recognized social media expert Michael Stelzner asked marketers to indicate which platforms they regularly use for their video marketing [20] (Fig. 5).

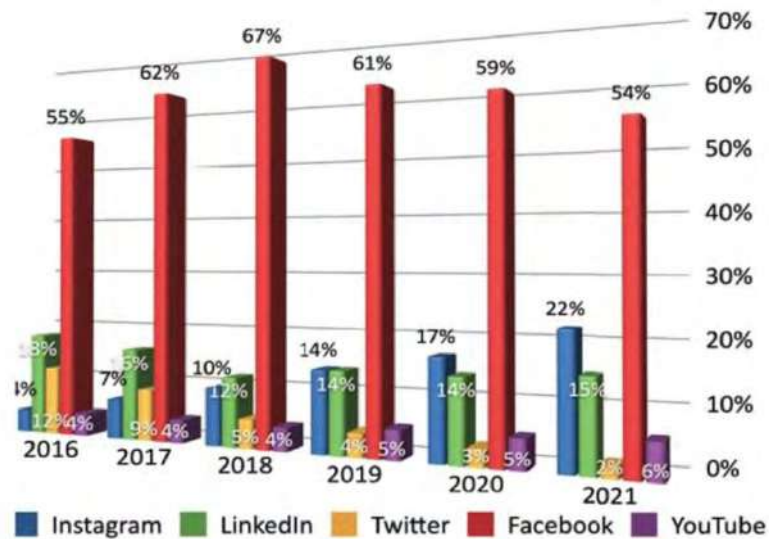
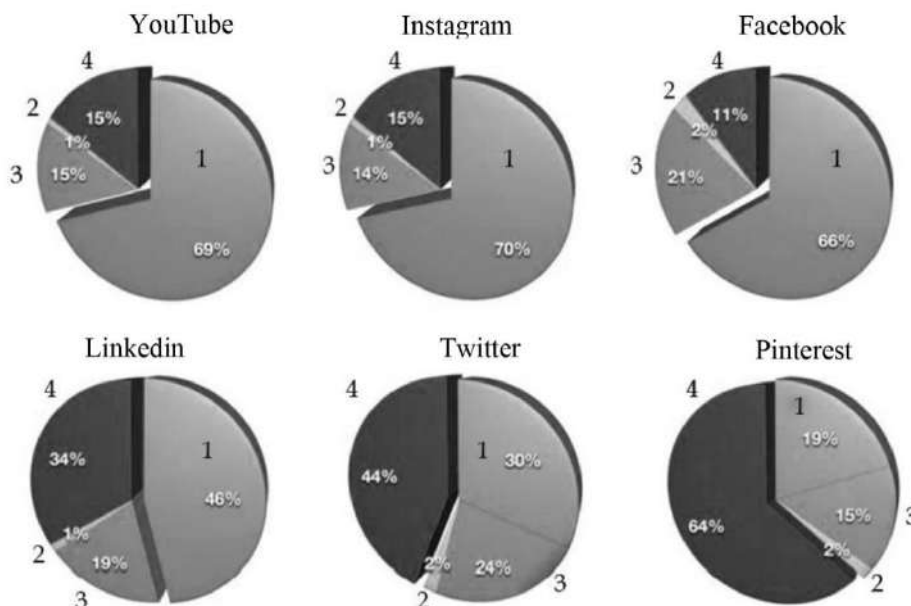


Fig. 4. Dynamics of changes in traffic of users of the main Internet platforms of business (summarized by [17])



1 – increasing. 2 – reduction. 3 – remains unchanged. 4 – is not planned to use

Fig. 5. Use of video content on the main platforms of business in the online environment (summarized by [20])

The following results were obtained: YouTube was the number one video channel used by 55% of marketers, followed by native Facebook videos (49%). The use of

Instagram Stories has risen sharply from 22% in 2019 to 46% in 2021. TikTok is a new video platform, but has already actively regained its place in the market [19].

According to online company ByteDance, which owns several popular services, with the help of advertising on TikTok marketers can reach 825 million users aged 18 and older worldwide. The main content of TikTok is short 15- or 60-second videos in which the authors use various effects or music. After creating the video gets into the recommendations to users. They are formed according to the criteria presented in table 1.

Table 1. Criteria for getting videos in the TikTok recommendation

Criterion	Essence
Geolocation	It is unknown which audience will see the video. This makes it harder for companies and bloggers to work with a different audience.
User experience	It is important that a specific user evaluates, comments and watches the video to the end. Mostly his videos will consist of such videos .
Popular videos	Videos that have already garnered a lot of views later end up in the tapes of almost all users.

The peculiarity of TikTok is that users are much more likely to watch the recommendations, rather than videos of people to whom they subscribe. This distinguishes it from Instagram and YouTube.

Today, Ukraine cannot set up a target audience for online businesses, which is why most marketers do not use TikTok to promote a product. Today, this platform is useful only to increase the coverage of social pages.

Any business can adapt an SMM campaign to its specifics. Consider how this marketing complex can be used for different business segments (Fig. 6).

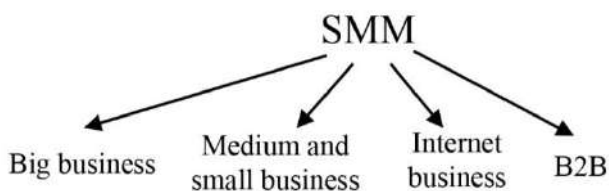


Fig. 6. Application of the marketing complex

Representatives of big business were among the first to realize the potential of social networks and began to actively use them for their promotion. Through social networks, big business usually solves strategic long-term marketing tasks: branding, raising awareness of the target audience, increasing loyalty and trust in brand products

and tracking thoughts and moods among the target audience; it is determined what the support system will be. Features of SMM-campaigns of big business include high coverage, work on several platforms and interactivity of communication. This uses communities, blogs, social media applications, and systematic work with the most loyal opinion leaders (creating so-called "brand advocates"). Also, large companies pay serious attention to working with reputation, in particular, monitoring and neutralizing the negative. The greatest difficulty is usually the analysis of efficiency. Since the activities of these companies are often associated with a wide distribution network, it can be difficult to track how certain actions affect direct sales. Therefore, each campaign needs to develop its own system of metrics, using the capabilities of web analytics. Representatives of the following spheres of big business are highly active in social networks: manufacturers; banks and other financial structures; film studios; network service operators; retail chains.

In recent years, the SMM threshold has dropped sharply, and the massive influx of small and medium-sized businesses into social networks continues to this day. In most cases, they are more relevant tools that allow you to quickly solve tactical tasks: increase sales, announce discounts, encourage users to buy again. To do this, they usually resort to creating their own sites, and to work with existing, similar topics. The following industries are more represented on social networks: trade; local producers; services (beauty salons, fitness clubs, etc.); tourism sector.

Representatives of the online industry are also active users of SMM. The main task for them is to obtain high-quality traffic with high conversion (i.e. conversion into sales, registration or other targeted actions). The most relevant tools for this are the creation of communities, blogs and microblogs, targeted advertising and placement of teasers in communities and blogs. Also, social networks are often used to create noise around the project, to attract attention to it. The following types of projects can be noticed more often than others in SMM: online stores; online services; online startups; discount aggregators.

Contrary to popular belief, b2b products and services can also be effectively promoted through social networks. The main strategy, in this case, is to find representatives of the professional layer, which is the target audience of the campaign. To do this, you can create your own communities that position themselves by

professional or social affiliation, conduct targeted work with target audiences, provide multiple touches through advertising systems, with orientation to professions or education, and work with existing professional centers. The SMM presents the following business categories in this sector: advertising services; IT solutions; financial and legal services; HR agencies. According to the 2021

Social Media Marketing Industry Report, a significant 86% of all marketers surveyed said that their efforts on social media have had a greater impact on their business. The increase in trade was the second major advantage, with 78% reporting positive results [20].

So, it can be summarized that all the benefits of entrepreneurship in social networks (Table 2).

Table 2. Advantages of entrepreneurial activity in social networks to create positive impressions in the subjects of the external environment

Advantage	Content
Increase sales	A large percentage of marketers find the best sales results with many years of experience in social media. For example, more than half of marketers who have been using social media for more than 12 months report that it has helped them improve sales.
Growing business partnerships	Most marketers seem to use social media to develop partnerships.
Increase in traffic	Those who use social networks for a year or longer report significantly better business management results (72% + stated benefits) compared to those with less experience.
Formation of potential customers	Marketers are gaining more knowledge in generating leads through more experienced social platforms
Ensuring market understanding	Based on many years of experience, this benefit does not change significantly.
Development of "loyal fans"	Building a dedicated fan base seems to be an advantage that improves as marketers gain years of experience.
Improving thought leadership	Only those with the most experience (5+ years) have seen real success in building leadership thinking.

Conclusion

Thus, the Internet and social networks and their tools provide incredible opportunities for effective business activities of modern Ukrainian business in order to create positive impressions about the results of activities and opportunities of business entities. There is no doubt that online entrepreneurship will continue to grow, as it is showing positive dynamics and tremendous potential for further development, especially in the context of the development of the economy of impressions. So, the paper considers the world statistics of the most popular social networks

for business in the online environment. After analyzing the activities of active media users and marketers who work with them, it was concluded that the dominant networks are Facebook and Instagram, and the new network TikTok is not recommended for promotion. It was generalized how the marketing complex can be used for different business segments and what are the advantages of marketing in social networks. The results of the study can be the basis for further development of the practical use of the Internet and social networks for the entrepreneurial activity of Ukrainian enterprises in an economy of impressions.

References

1. Virglerová, Z., Kramoliš, J., & Capolupo, N. (2022). The impact of social media use on the internationalisation of SMEs. *Economics and Sociology*, 15(1), P. 268–283. DOI: 10.14254/2071-789X.2022/15-1/17

2. Ikechukwu Eze, Emmanuel Agbaeze, Ejikeme Isichei and Chinonso Eke (2021). Social media usage and competitive advantage of nascent agro-allied firms. *Problems and Perspectives in Management*, 19(4), P. 395–407. DOI: 10.21511/ppm.19(4).2021.32
3. Sadigov, R. (2022). Impact of Digitalization on Entrepreneurship Development in the Context of Business Innovation Management. *Marketing and Management of Innovations*, 1, P. 167–175. DOI: <https://doi.org/10.21272/mmi.2022.1-12>
4. Kanyawee Pornsrimate and Anon Khamwon (2021). How to convert Millennial consumers to brand evangelists through social media micro-influencers. *Innovative Marketing*, 17(2), P. 18–32. DOI:10.21511/im.17(2).2021.03
5. Jakkrit Thavorn, Puripat Trichob, Worasak Klongthong & Chittipa Ngamkroekjoti (2022) Effect of mid-roll video advertising value and perceived intrusiveness on Facebook viewers' response: the mediating roles of attitude and word-of-mouth intention, *Cogent Business & Management*, 9:1, P. 206–209 <https://doi.org/10.1080/23311975.2022.2062091>
6. Otenko IP, Ptashchenko OV, Kushch YM Trends in e-business in the world market. *Scientific professional journal "Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Economic Sciences Series*. 2020. № 4 (149). P. 50–57.
7. Ilyashenko SM, Rud MP The newest types of marketing in the conditions of advanced development: evolution, essence, conditions of application. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series: International Economic Relations and the World Economy*. 2019. Vip 24. Ch. 2. P. 37–42.
8. Belovodskaya OA, Shebeda KV Formation and implementation of the media company's marketing strategy in the digital environment: stages and indicators of evaluation. *Bulletin of Kharkiv National University named after VN Karazina. Series: International Relations. Economy. Local lore. Tourism*. 2021. № 13. P. 50–59.
9. Ilchenko TV Marketing strategy of agricultural enterprises in the conditions of digitalization. *Economy and society*. 2021. Issue 26.
10. Doroshkevich DV, Litvinenko IS, Lapan AO Formation of digital marketing strategy for the enterprise in the field of export consulting in the digital economy. *Young scientist*. 2022. №2 (102). P. 69–75.
11. By the middle of the year, more than half of the world's population will be users of social networks. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2870117-do-seredini-roku-bils-ak-polovina-naseleenna-svitu-bude-koristuvacami-socmerez.html>
12. 77 Basic statistics of social media marketing for 2020. *WebSetNet*. News from 05.08.2020. <https://websetnet.net/uk/77-найважливіших-статистичних-даних-щодо-маркетингу-соціальних-медіа-на-2020-рік/>
13. Rating: The most popular social networks in the world and who they belong to. *Ukrainian spectrum*. News from 12.12.2021. URL: <https://uaspectr.com/2021/12/12/najpopulyarnishi-sotsialni-merezhi-u-sviti-2022/>
14. 10 tools for promoting business on Instagram. URL: <https://www.imena.ua/blog/10-tools-to-promote-your-business-in-instagram/>
15. Zhernovska L. TikTok's monthly audience exceeded 1 billion. *UNIAN*. News from September 27, 2021 URL: <https://www.unian.ua/science/shchomisyachna-auditoriya-tiktok-perevishchila-1-milyard-novini-11559058.html>
16. 40 facts about Internet marketing around the world that will be useful not only to marketers. URL: <https://toplead.com.ua/ru/blog/id/40-faktov-pro-internet-marketing-vo-vsem-mire-kotoryj-prigoditsja-ne-tolko-marketologam-263>
17. Botz T. New ways to subscribe, the fight against fakes in TikTok and the future in audio formats: Reuters Institute has published a study of forecasts for the world media market 2022. URL: <https://tyzhden.ua/Суспільство/254059>
18. Video Marketing Statistics 2022. URL: <https://www.wyzowl.com/video-marketing-statistics/>
19. Social Marketing Trends The data you've been missing! URL: <https://www.socialmediaexaminer.com>
20. M. Stelzner 2021 Social Media Marketing Industry Report. URL: <https://www.socialmediaexaminer.com/social-media-marketing-industry-report-2021/>

Received 16.02.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Ястремська Олеся Олександрівна – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, доцент кафедри туризму, Харків, Україна; e-mail: lastremska.o@gmail.com; ORCID ID: 0000-0003-1865-0282

Небиліця Олена Анатоліївна – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, доцент кафедри менеджменту, логістики та інновацій, Харків, Україна; e-mail: elena.nebulitsa@ukr.net; ORCID ID: 0000-0002-6627-1319

Iastremska Olesia – PhD (Economics Sciences), Associated Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Associated Professor of the Department Tourism, Kharkiv, Ukraine.

Nebylytsia Helena – PhD (Economics Sciences), Associated Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Associated Professor of the Department management, logistic, innovation, Kharkiv, Ukraine.

СОЦІАЛЬНІ МЕРЕЖІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДПРИЄМНИЦЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УМОВАХ ЕКОНОМІКИ ВРАЖЕНЬ

Інтернет і соціальні мережі за останні роки стали повноцінною платформою для підприємницької діяльності та мають значні функції ефективного й точного повідомлення цільовій аудиторії інформації про потенційних клієнтів, наявність необхідних комунікаційних інструментів для роботи з клієнтами, компаніями, для продажу товарів, послуг тощо. Це є особливо важливим в умовах розвитку економіки вражень. **Предметом** статті є аналіз використання соціальних мереж у підприємницькій діяльності в умовах економіки вражень. Аналіз наукової літератури показав, що закордонні та вітчизняні вчені постійно шукають шляхи розвитку підприємницької діяльності в онлайн-середовищі. Проте наукові праці з питань підприємницької діяльності в соціальних мережах недостатньо обґрунтовані й адаптовані до умов функціонування українських підприємств, тому потребують подальшого розвитку. **Мета** статті – теоретично обґрунтувати особливості підприємницької діяльності українських суб'єктів господарювання в соціальних мережах. **Основними завданнями** є аналіз статистичних даних щодо використання соціальних мереж у підприємницькій діяльності та обґрунтування рекомендацій ефективності підприємницької діяльності у соціальних мережах. Застосовано такі **методи дослідження**: аналіз і синтез, статистичний і монографічний аналіз, дедуктивний та індуктивний методи, графічний метод. У процесі дослідження здобуто конкретні **результати**. З'ясовано, що серед наявних на сьогодні майданчиків для підприємницької діяльності у мережі Інтернет *Facebook* та *Instagram* – це дві найкращі платформи, що застосовуються маркетологами. Визначено, якими соціальними каналами користуються досвідчені маркетологи для просування товарів підприємства в соціальних мережах порівняно з тими, хто тільки починає розвивати свій бізнес. Так, "молоді" маркетологи соціальних мереж для ефективної підприємницької діяльності зосереджуються переважно на *Facebook* та *Instagram*. Водночас найдосвідченіші маркетологи дуже диверсифіковано підходять до цього процесу. Узагальнено основні критерії використання відеоконтенту в бізнесі як найефективнішого на сьогодні інструмента підприємницької діяльності в соціальних мережах. Автори статті дійшли конкретних **висновків**. Аналіз застосування відеомаркетингу в підприємницькій діяльності в онлайн-середовищі показав, що *YouTube* є найпріоритетнішим відеоканалом. Соцмережа *TikTok* є новою відеоплатформою, але вона вже активно відвоювала своє місце на ринку. Тому було узагальнено основні критерії потрапляння відео в рекомендації *TikTok*. Також розглянуто основні можливості SMM у різних сегментах бізнесу. Визначено особливості використання SMM для великого, середнього, малого бізнесів, інтернет-бізнесу й *b2b*-сфери. Узагальнено й виокремлено основні переваги підприємницької діяльності в соціальних мережах. Здобуті результати можуть бути підґрунтям щодо подальшого розвитку практичного використання соціальних мереж для підприємницької діяльності.

Ключові слова: підприємницька діяльність; економіка вражень; соціальні мережі; інтернет; Facebook; Instagram; TikTok; цільова аудиторія; онлайн-платформа; відеомаркетинг; SMM.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Ястремська О. О., Небилиця О. А. Соціальні мережі як інструмент підприємницької діяльності в умовах економіки вражень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 155–163. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.155>

Iastremska, O., Nebylytsia, H. (2023), "Social networks as a tool for entrepreneurship in the conditions of the economy of impressions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 155–163. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.155>

I. BADANYUK, I. NEVLIUDOV, D. NIKITIN

TOPOLOGICAL IMAGE PROCESSING FOR COMPREHENSIVE DEFECT AND DEVIATION ANALYSIS USING ADAPTIVE BINARISATION

The subject of this article is the preparation for recognition and comparison of real topological images of printed circuit boards (PCBs) using adaptive image binarisation with an "automatic window" (the area for scanning the image "Block size"). **The aim of the work** is to improve the method of adaptive binarisation for images obtained by technical vision systems by developing an automatic algorithm for detecting the required value of the image binarisation window. **Objectives:** to analyse the subject area for the analysis of technical images of the topology of the SOE; to describe the finding of the global binarisation threshold (t) using the "Otsu" method; to perform global image binarisation; to calculate the standard deviation of binarisation; to process the results obtained to find the required value of the Block size; to test the developed algorithm in software. **Results:** an image processing algorithm with automatic adjustment of the "Block size" binarisation window was implemented and tested; software was developed using the proposed algorithm and the performance of global binarisation with an improved method of finding the "Block size" values for scanning an image in processing small elements of the SE topology was compared. This will allow solving the following issues: noise removal – removing noise from the image (noise can occur due to poor scan or photo quality, as well as due to the presence of small spots on the surface of the PCB); image segmentation – dividing the image into separate elements such as contours, zones and text (this process can be automated using image processing software); element detection – finding and separating individual elements such as resistors, capacitors and other components depicted on the topology. **Conclusions:** according to the results of the work, an algorithm for automatically adjusting the size of the scanning area "Block size" for binarisation of technological images of the SE topology has been developed. The following advantages of this algorithm can be distinguished: automatic finding of the optimal scanning area Block Size; resistance to image noise without the use of smoothing filters; finding details in areas of contrast difference.

Keywords: process image processing; adaptive binarization; Otsu method; GP topology; finding "Block size".

Introduction

Industry 4.0 is based on advanced research in the fields of artificial intelligence, robotics, cloud computing, additive technologies, etc., the synthesis of which has allowed to improve production processes. The most important area of concept development within Industry 4.0 is the development of new approaches and tools for cyber-physical production systems (CPPS) [1–3]. The peculiarity of the CPPS application is the synthesis of the physical and cybernetic worlds into a single information eco-space, which allows creating very flexible reconfigurable production lines [4]. One of the promising areas of application of CPPS is their implementation in the production of high-tech electronic products and improvement of technical vision systems.

PCB topology image processing is an important component of Industry 4.0, as images can be used for automated quality control and visual inspection of manufacturing processes related to PCB production. The main applications of PCB topology image processing in Industry 4.0 are as follows [5]:

1. Quality control. Image processing can be used to control the quality of printed circuit boards, for example,

to detect defects that may be invisible to the human eye. Image processing software can automatically recognize defects, such as damaged traces, short circuits, missing parts, and others, and notify operators of their presence.

2. Visual inspection. Image processing can be used for real-time visual inspection of printed circuit boards. It can help ensure product accuracy and quality during production.

3. Process monitoring. Image processing can be used to monitor PCB manufacturing processes. It can help track equipment movement, monitor temperature and other parameters of the production process.

4. Automatic topology recognition. Image processing can be used to automatically recognize the topology of printed circuit boards. This can help in the automated process of mounting electronic components on printed circuit boards;

5. Virtual reality: Image processing can be used to create a virtual model.

Various methods are used for image processing, such as [6]:

1. Image filtering – used to reduce noise in the image, improve contrast and other image properties.

Filtering methods include median filtering, Gaussian filtering, and others.

2. Image segmentation – used to highlight individual objects in an image. This can be useful for automated object recognition, image classification, and more.

3. Feature detection – used to extract specific features of an image, such as colour, shape, and texture. This can be useful for image classification and more.

4. Pattern recognition – used to automatically recognize objects in an image and classify images using machine learning algorithms.

These image processing methods can be used individually or in combination to achieve a specific image analysis goal.

Image binarization is the process of converting an image with graded hues into an image where each pixel can only be white or black. Different methods can be used to binarize an image. One of the simplest methods is global processing, when a threshold value is set, and all pixels with a hue above the threshold are considered white, and those with a hue below the threshold are considered black. This method is applicable to images with high contrast. Optimization methods use statistical approaches to determine the threshold, such as the "Otsu" method, which automatically determines the threshold to maximize the inter-class dispersion between pixels with different hues.

There are also methods that use machine learning algorithms to solve the image binarization problem, such as neural networks. These methods can be useful for binarizing complex images with a high degree of detail.

Unresolved components of the overall problem

The process of binarization is inherently simple and straightforward when it comes to noise-free and highly detailed images. However, this process can become complicated, especially if the source image contains small elements, noise, complex backgrounds, shadows, or heterogeneity in the image.

Global binarization cannot detect details in parts of the image where there are contrast differences. To solve this problem and detect more details in the image, adaptive binarization is used, but to use adaptive binarization, it is necessary to find the "Block size" parameter that affects the search area for details in the image [6–7]. Currently, there is no general method for finding the optimal Block size.

Statement of the problem and purpose of the study

The main objective of the study is to improve the method of adaptive binarization for images obtained by technical vision systems by developing an automatic algorithm for detecting the required value of the image binarization window. To achieve this goal, it was decided to develop an algorithm for automatically finding the size of the scanning area in adaptive binarization for processing technological images of the SOE topology. To solve this problem, the following is necessary:

- to analyze the subject area and consider the features of binarization of technical images of the SE topology;
- find the threshold of binarization by "Otsu";
- to find the standard deviation of binarization;
- process the obtained results to find the required value of the "Block size" of adaptive binarization;

The final result is the implementation of the obtained algorithm for finding the values of "Block size" of adaptive binarization in a software product for image processing.

Materials and methods

The process of image binarization is the conversion of a colour image into a two-colour black-and-white image. The main parameter for binarization is the threshold value (t) – the value with which the brightness of each pixel is compared. Based on the comparison results, the pixel is assigned a value of 0 or 1. The threshold value will be the criterion for checking the intensity of the image point [7].

There are various binarization methods that can be divided into two groups: global and local.

In the first case, the threshold value remains unchanged throughout the binarization process. This can be mathematically described by formula 1. In the case of adaptive binarization, the image is divided into regions, in each of which a local threshold is calculated [8].

$$f(i, j) = \begin{cases} 0, & (i, j) < t \\ 1, & (i, j) \geq t. \end{cases} \quad (1)$$

The global binarization function is shown in Fig. 1.

The main task of binarization is to reduce the amount of information and leave the main data with which further processing will be performed. Global and local binarization is a basic processing, and this method is poorly suited for images with high contrast and a lot

of noise [8–9]. This is due to the definition of processing thresholds for pixels in the image (Fig. 2).

Successful binarization simplifies further work with the image. On the other hand, failures in the binarization process can lead to distortions, such as line breaks, loss of significant details, and violation of object integrity, noise, and unpredictable distortion of characters due to background heterogeneity [10].

To determine the thresholds in binarization, the "Otsu" method is used. The main task of this method is to find the required threshold value for binarization. The process of separating foreground pixels from the background is called thresholding. This is a dispersion-based method for finding the threshold value at which the weighted dispersion between foreground and background pixels is the smallest. The key idea is to go through all the possible threshold values and measure the spread

of foreground and background pixels. Then find the threshold at which the scatter is the smallest.

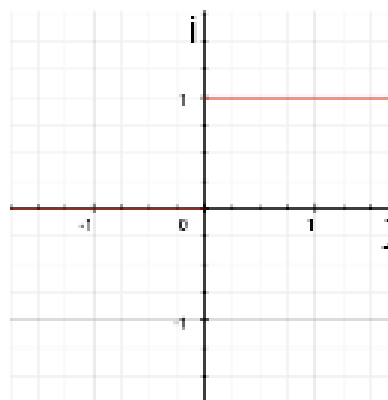
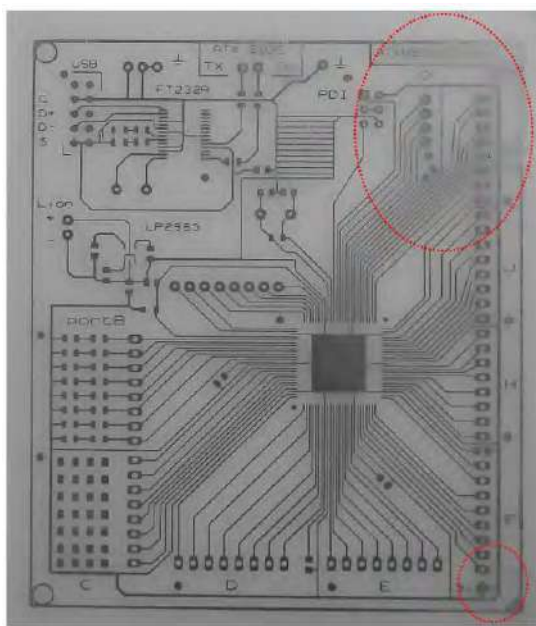
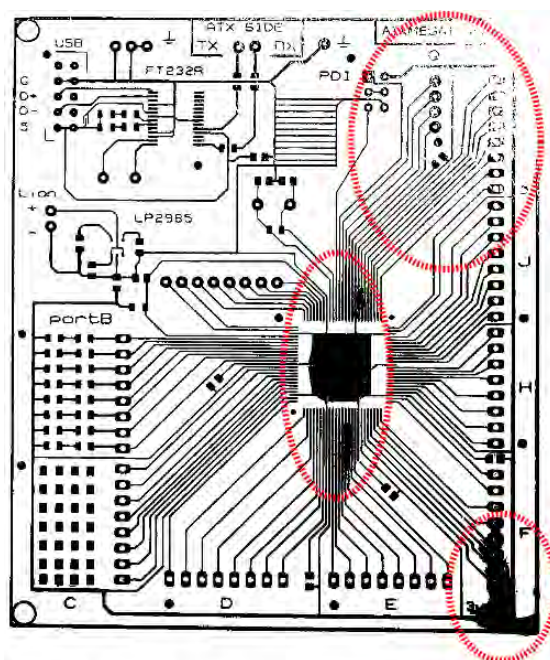


Fig. 1. Binarization function



a)



b)

Fig. 2. Implementation of global binarization: a) input image; b) binarized image

The interactive binarization algorithm searches for a threshold (t) that minimizes the intra-class dispersion, defined as the weighted sum of the dispersion of the two classes (background and foreground). Grayscale colours are usually in the range of 0–255 (0–1 in the case of a floating hue). So, if we choose a threshold of 100, then all pixels with values less than 100 will become the background, and all pixels with values greater than or equal to 100 will become the foreground of the image [11–13]. The formula for

finding the interclass dispersion at any threshold t is given in Equation 2.

$$\sigma_m^2(t) = \omega_{bg}(t)\sigma_{bg}^2(t) + \omega_{fg}(t)\sigma_{fg}^2(t), \quad (2)$$

where $\omega_{bg}(t)$ and $\omega_{fg}(t)$ are the probabilities of occurrence of a certain type of pixels for each class at the threshold value t ;

$$\sigma_m^2(t) - \text{share-weighted amount of dispersions.}$$

To understand what probability means in this case, let:

– P_{all} – the total number of pixels in the image;

– $P_{BG}(t)$ – the number of background pixels at threshold t ;

– $P_{FG}(t)$ – the number of foreground pixels at the moment of time t .

Thus, the probability of occurrence of a certain type of pixel can be set by the formula:

$$\omega_{bg}(t) = \frac{P_{BG}(t)}{P_{all}}, \quad (3)$$

$$\omega_{fg}(t) = \frac{P_{FG}(t)}{P_{all}}. \quad (4)$$

The dispersions can be calculated using the formula 5 given below:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - x_{sr})^2}{N-1}, \quad (5)$$

where x_i is the pixel value at position i in the group (bg or fg);

x_{sr} – average pixel value in the group (bg or fg);

N is the number of pixels.

Let us consider the example of finding the dispersion at one threshold value $t=100$, Figure 3. For the above image (Fig. 3a) at $T=100$, we get the background and foreground, (Fig. 3 b, c):

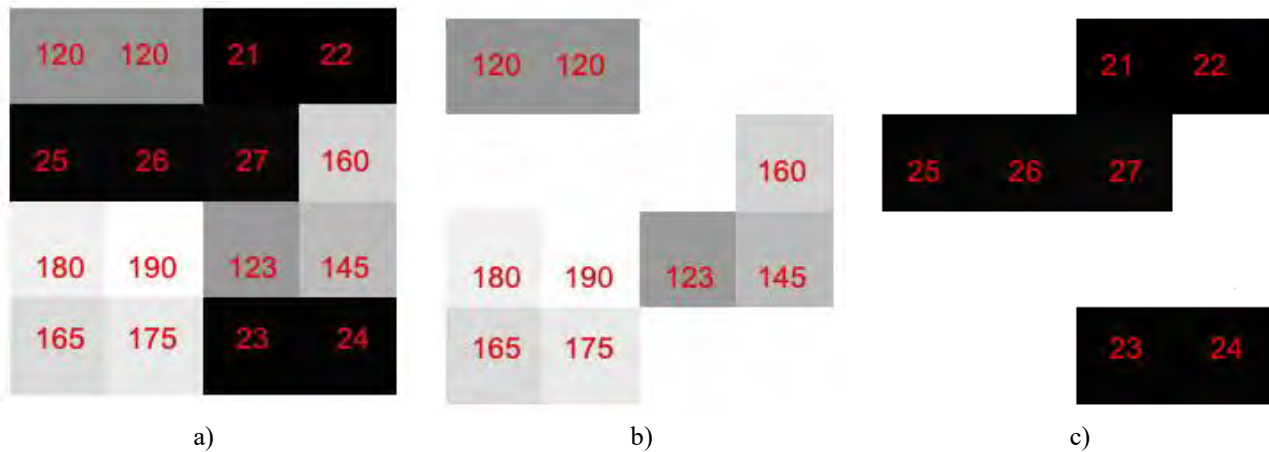


Fig. 3. An example of finding the dispersion of image pixels by "Otsu":

a) full image with pixel colour values (P_{all}); b) foreground pixels (P_{FG}); c) background pixels (P_{BG})

In this example, the total number of pixels (P_{all}) is 16. The number of foreground pixels (P_{FG}) is 7, and the number of background pixels (P_{BG}) is 9. If we substitute these values into formula 3 and formula 4, we get the probability values (ω_{bg}) equal to 0.44 and (ω_{fg}) equal to 0.56. Now, to find the dispersion, we first find the mean of (x_{bg}) and (x_{fg}). To do this, add up the entire foreground and background pixel values separately and divide by the number. We get (x_{bg}) equal to 24, and (x_{fg}) 153.1. The dispersions (σ_{bg}^2) and (σ_{fg}^2) are calculated using formula 5. We get the values of 4 and 657.43. Then, using the results obtained in formula 2, we find the dispersion of colour values (σ_m^2) [14]. In this case,


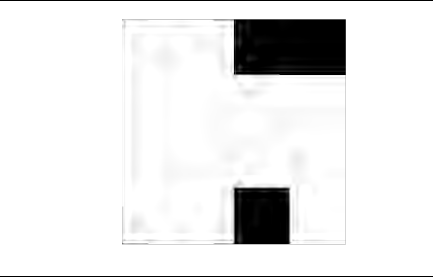
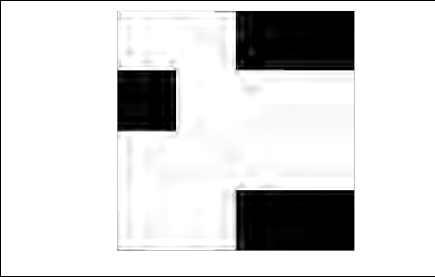

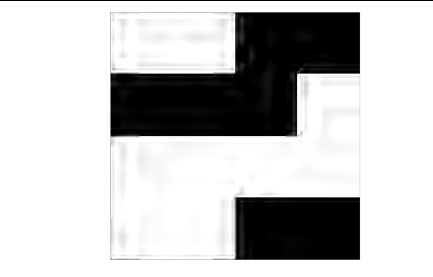
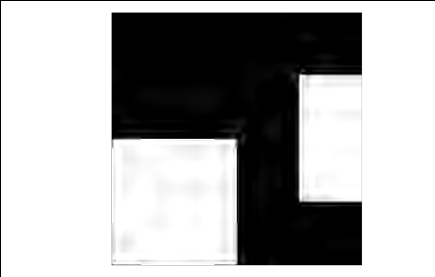
(σ_m^2) is equal to 369.9208. We can do the same for other values of t , Table 1.

The dispersion value remains the same from 28 to 120. If you see the dispersions above, they are smallest at $t=28$ or, more precisely, between 28 and 120. Thus, the threshold is 28.

Different binarization methods have their own weaknesses: for example, the "Otsu" method can lead to the loss of small details and "sticking" of adjacent characters if the run value is chosen incorrectly (Fig. 4).

The main goal of the Otsu method is to find the optimal global threshold (t) for global binarization, but this method does not solve the problems of using global binarization. This can be seen from the example (Fig. 4).

Table 1. Detecting the binarization threshold with "Otsu"

		
$t = 22, \sigma^2 = 4092,58$	$t = 23, \sigma^2 = 3667,6$	$t = 25, \sigma^2 = 2642,35$
		
$t = 26, \sigma^2 = 2009,93$	$t = 28, \sigma^2 = 371,55$	$t = 124, \sigma^2 = 1316,48$

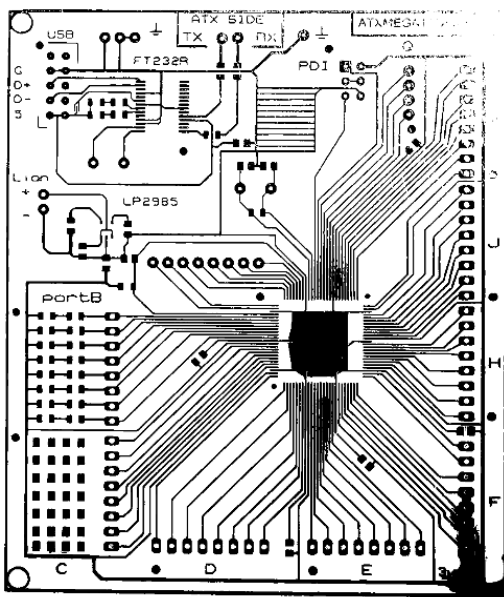


Fig. 4. An example of the "Otsu" method for image binarization

**Development of a method
for finding "Block size" in adaptive binarization**

Adaptive binarization is a method of image binarization in which the binarization threshold changes depending on the local average pixel value in the neighbourhood of each pixel. Adaptive binarization is done by calculating the local average pixel value in a certain neighbourhood "Block size". Around each pixel, and then the threshold value is selected depending on this average value. If the pixel value is greater than

the threshold, it is considered white, and otherwise, it is considered black [15].

This method is used to binarize images with variable lighting or noise that can change the global binarization threshold. These properties of adaptive binarization are suitable for the use of these methods in the analysis and comparison of technical images in the production of images obtained with the help of technical vision systems. This method is used in many fields such as character recognition, image analysis, medical diagnostics, etc.

The main parameters for adaptive binarization are:

- a method for finding the average pixel value in the scanned area (Gaussian average);
- the size of the boring area "Block size".

Essentially, "Block size" is a matrix in which the pixel values are located (Fig. 5).

i	5	120	223	45	154	68
	26	201	167	190	250	89
	78	143	208	80	158	184
	67	223	251	165	95	47
	84	245	84	68	135	69
	82	255	123	175	205	54
						j

Fig. 5. Example of a 3×3 "Block size" area

Depending on the size of this matrix, the ability to recognize small image elements in binarization changes. The larger the size of the "Block size" matrix,

the more difficult it is to detail small elements, and vice versa, the smaller the size of the matrix, the more small elements can be found (Fig. 6) [16].

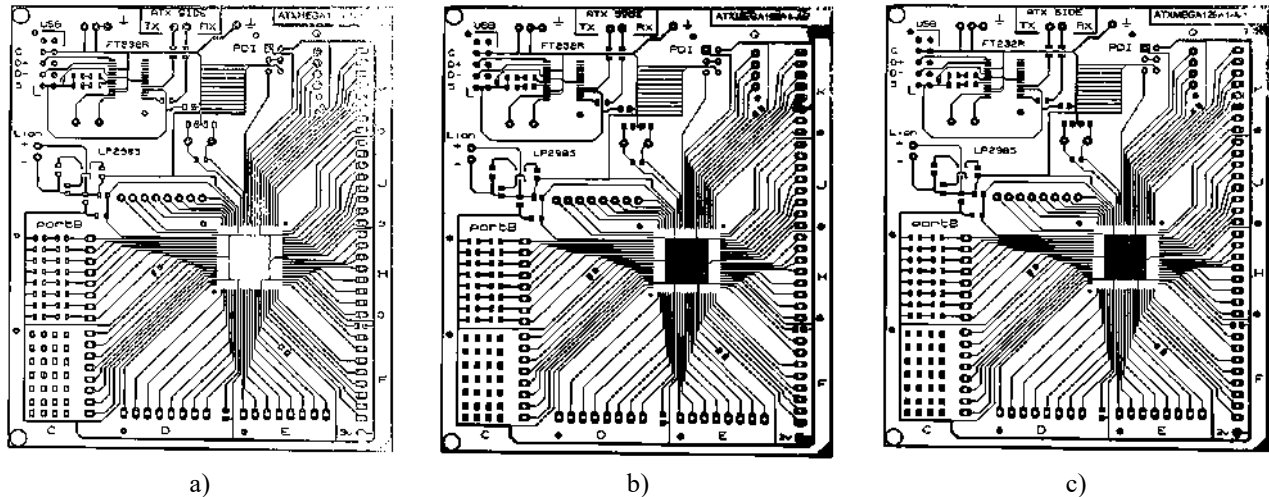


Fig. 6. An example of finding the "Block size" area using the proposed algorithm: a) the threshold value of "Block size" is 23; b) the threshold value of "Block size" is 423; c) automatic finding of the value of "Block size"

Depending on the complexity of the image, it is necessary to select its own "Block size" values, which takes time during processing. Therefore, the development of an automated method for finding the "Block size" value for different images with different types of elements is an urgent task.

The "Block size" should always be an odd number to scan images with an arbitrary size.

To automatically select the "Block size" values, the following algorithm was built:

- find the global binarization threshold (t) using the Otsu method;
- binarize the image and find the standard deviation (σ);
- if the obtained value is even, subtract one, if the value is not even, leave it as it is, and substitute this value in the search for "Block size" (Fig. 7).

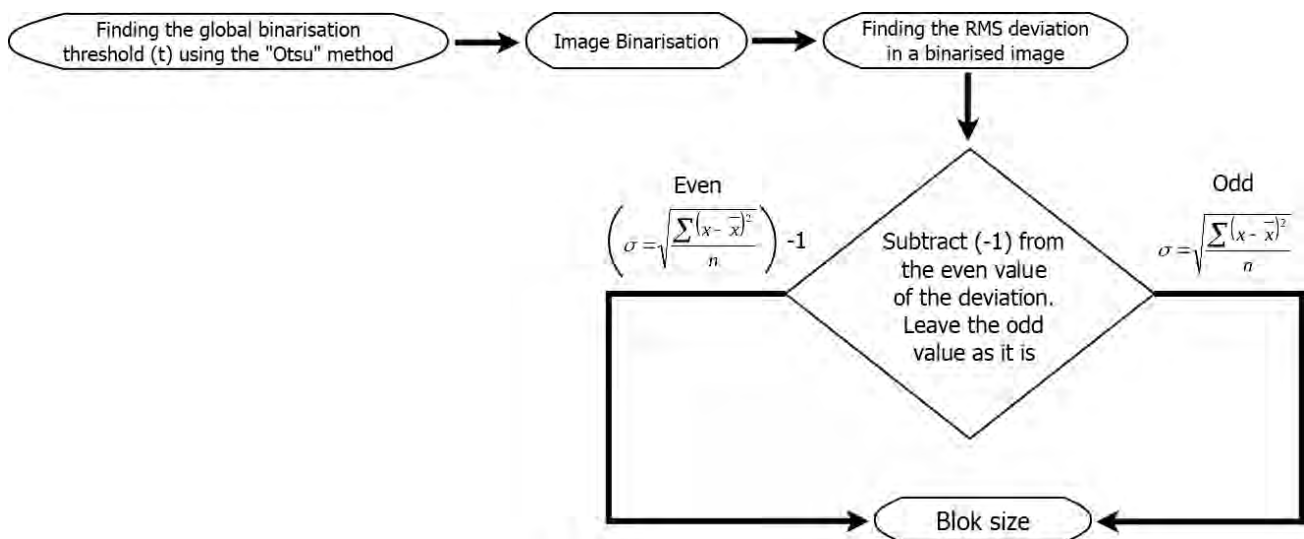


Fig. 7. Algorithm for finding the automatic value of "Block size"

In this approach, we find the mean square deviation already in the binarized image, which provides information about the deviation of the background (e.g. white) and details (e.g. black) values of the image. This information can be used as the size of the scanning area "Block size".

Conclusion

The block size in binarization can affect the quality of the result. If the blocks are too small, some details may be lost, and if the blocks are too large, the result may be uneven. The optimal block size depends on the size of the image, the nature of the image, and the binarization method used. Typically, larger blocks are used for high-resolution images, such as medical images or high-quality images, while smaller blocks are used for low-resolution images, such as a webcam or mobile phone images.

Based on the results of the work, the following tasks were accomplished:

- the subject area was analyzed and the features of image binarization were considered;

- the threshold of binarization by "Otsu" was considered;

- an algorithm for finding the size of the scanning area "Block size" was developed.

The developed algorithm for finding the size of the scanning area "Block size" in the binarization of technological images of the topology of the SOE gives the following advantages (Fig. 8):

- automatic finding of the optimal scanning area Block Size;

- resistance to image noise without the use of smoothing filters;

- detection of details in areas of contrast difference.

The sense of using the mean square deviation in the binarized image as the window size in adaptive binarization is as follows:

- this approach allows us to obtain a global binarized image with an automatic "Otsu" threshold;

- use of the mean square deviation in the binarized image as it gives the difference between the size of the background and the image elements.

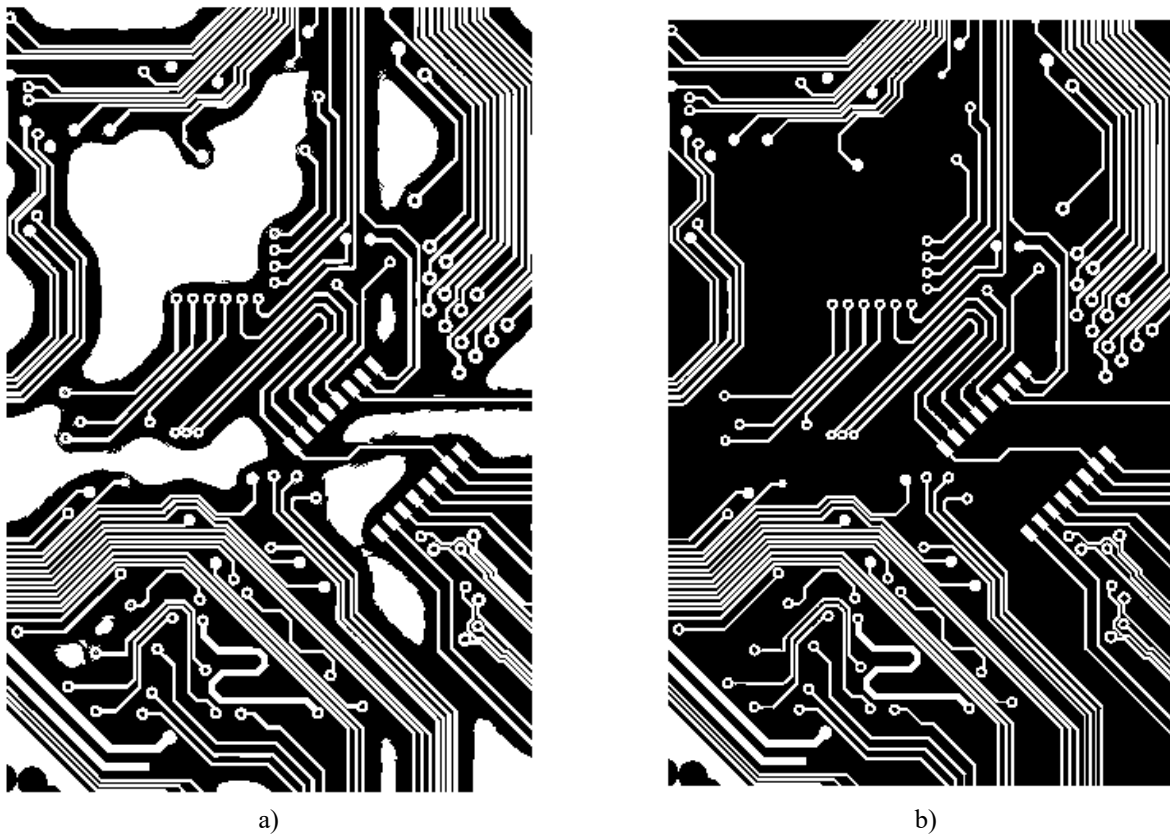


Fig. 8. Results of the algorithm:

a) global binarization; b) adaptive binarization with automatic adjustment of the scanning area size

Thus, we get the average optimal value for binarization (Fig. 9):

– reduction of noise influence;

– reduction of contrast drop;

– the ability to find more details.

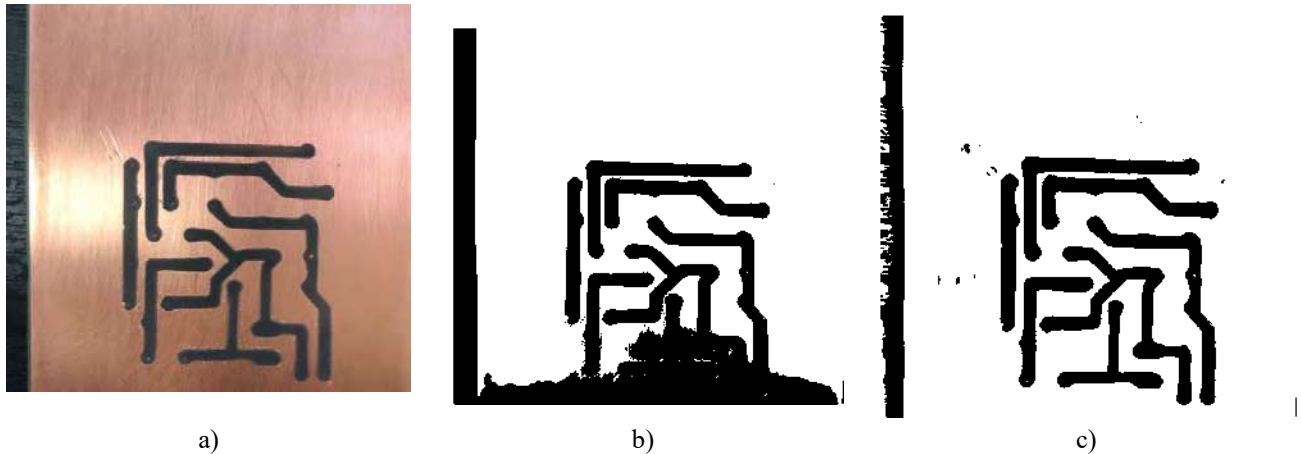


Fig. 9. Results of improved binarization: a) real image; b) binarized image; c) binarized image using the proposed algorithm for automatic sizing of the scanned area value

With the use of an automatic scanning window, such processing becomes faster and more accurate.

The disadvantages of this method include the following:

- slower than conventional global binarization;
- the deviation parameter, and thus the threshold finding, depends on global binarization.

The use of the proposed algorithm allows to improve the quality of image processing, reduce noise and improve the resolution when detecting small image elements (e.g., thin conductors in the topology of the DP). The developed software will also allow faster processing and comparison of technical images (Fig. 10).

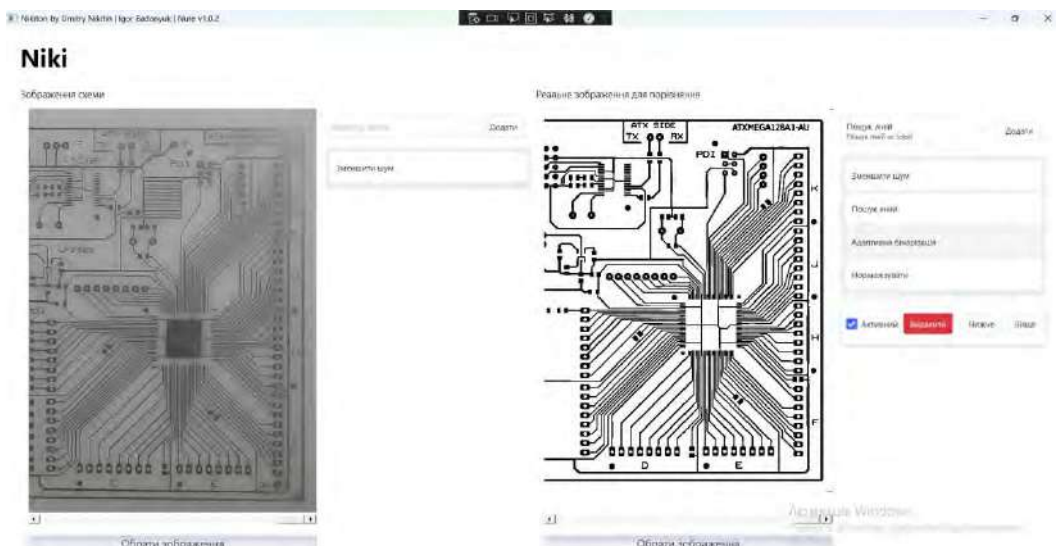


Fig. 10. The developed software

References

1. Arianna Martinelli, Andrea Mina, Massimo Moggi. (2021). The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution. *Industrial and Corporate Change*, Volume 30, Issue 1, P. 161–188. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/dtaa060>

2. Núbia Carvalho, Omar Chaim, Edson Cazarini, Mateus Gerolamo. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing, *Procedia Manufacturing*, Volume 21, P. 671–678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.170>
3. Mohammad Fakhar Manesh; Massimiliano Matteo Pellegrini; Giacomo Marzi; Marina Dabic. (2020). Knowledge Management in the Fourth Industrial Revolution: Mapping the Literature and Scoping Future Avenues, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Volume: 68, Issue: 1, P. 289–300. DOI: 10.1109/TEM.2019.2963489
4. Andronie, Mihai, George Lăzăroiu, Mariana Iatagan, Iulian Hurloiu, and Irina Dijmărescu. (2021). "Sustainable Cyber-Physical Production Systems in Big Data-Driven Smart Urban Economy: A Systematic Literature Review" *Sustainability* 13, no. 2: 751 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020751>
5. Nevludov, I., & et al. (2021). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems, *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), P. 520–542.
6. Theo Lins, Ricardo Augusto Rabelo Oliveira. (2020). Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*. Volume 139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106193>
7. Igor Gruzman. (2013). Threshold binarization of images based on the skewness and kurtosis of truncated distributions. *Optoelectronics Instrumentation and Data Processing* 49(3). P. 215–220. DOI: 10.3103/S8756699013030011
8. B. Gatos, K. Ntirogiannis, and I. Pratikakis. ICDAR 2009 document image binarization contest (DIBCO 2009). *ICDAR*, 2009. P. 1375–1382. DOI:10.1109/ICDAR.2009.246
9. N. Stamatopoulos, B. Gatos, G. Louloudis, U. Pal, and A. Alaei. ICDAR 2013 Handwriting Segmentation Contest. *12th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. 2013. P. 1402–1406. URL: https://www.academia.edu/19693205/ICDAR_2013_Handwriting_Segmentation_Contest
10. K. Ntirogiannis, B. Gatos, and I. Pratikakis. Performance Evaluation Methodology for Historical Document Image Binarization, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 22, no.2, 2013. P. 595–609. DOI: 10.1109/TIP.2012.2219550
11. T. Romen, Sudipta Roy, O. Imocha, Tejmani Sinam, Kh. Manglem, "A NewLocal Adaptive Thresholding Technique in Binarization" *IJCSI International Journal of ComputerScience Issues*, Vol. 8, Issue 6, No 2, November 2011. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1201/1201.5227.pdf>
12. Rukhsar Firdousi, Shaheen Parveen, "Local Thresholding Techniques in Image Binarization", *International Journal Of Engineering And Computer Science* ISSN: 2319-7242 Volume 3 Issue 3 March, 2014. P. 4062–4065. DOI: 10.5121/cseij.2016.6101
13. T. Romen Singh, Sudipta Roy, O. Imocha Singh, Tejmani Sinam, Kh. Manglem Singh "A New LocalAdaptive Thresholding Technique in Binarization" *IJCSI International Journal of Computer ScienceIssues*, Vol. 8, Issue 6, No 2, November 2011. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.5227>
14. Er. Nirpjeet kaur, Er. Rajpreet kaur "A review on various methods of image thresholding" (*IJCSE*). URL: <http://www.enggjournals.com/ijcse/doc/IJCSE11-03-10-095.pdf>
15. Graham Leedham, Chen Yan, Kalyan Takru, Joie Hadi Nata Tan and Li Mian "Thresholding Algorithms for Text/Background Segmentation in Difficult Document Images" *Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2010)*. DOI:10.1109/ICDAR.2003.1227784
16. Niblack (1986), An Introduction to Digital Image Processing, P. 115–116. URL: Prentice Hall. <https://homepages.thm.de/christ/Start/01Lehre/11Bildv/aktuell/BVpix&refs/AdOculos%20-%20Digital%20Image%20Processing%20.pdf>

Received 14.03.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Баданюк Ігор Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; e-mail: igor.badaniuk@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-9137-4847>

Невлудов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Нікітін Дмитро Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, асистент, Харків, Україна; e-mail: dmytro.nikitin@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5591-4438>

Badanyuk Igor – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate Student of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Nevliudov Igor – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Nikitin Dmytro – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, assistant, Kharkiv, Ukraine.

ОБРОБКА ТОПОЛОГІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛІЗУ ДЕФЕКТІВ І ВІДХИЛЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ АДАПТИВНОЇ БІНАРИЗАЦІЇ

Предметом дослідження статті є підготовка для розпізнавання та порівняння реальних топологічних зображень друкованих плат (ДП) за допомогою адаптивної бінаризації зображення з "автоматичним вікном" (ділянки для сканування зображення "Block size"). **Мета** роботи – удосконалення методу адаптивної бінаризації для зображень, отриманих системами технічного зору за допомогою розробки автоматичного алгоритму виявлення необхідного значення вікна бінаризації зображення. **Завдання:** дослідити предметну сферу для аналізу технічних зображень топології ДП; описати знаходження глобального порога бінаризації (t) за допомогою методу "Otsu"; провести глобальну бінаризацію зображення; розрахувати середнє квадратичне відхилення бінаризації; обробити здобуті результати для знаходження необхідного значення "Block size"; перевірити розроблений алгоритм у програмному забезпеченні. **Результати:** реалізовано та перевірено алгоритм обробки зображень з автоматичним налаштуванням вікна бінаризації "Block size"; розроблено програмне забезпечення з використанням запропонованого алгоритму та порівняно роботу глобальної бінаризації з удосконаленим методом знаходження значень ділянки для сканування зображення "Block size" в обробці дрібних елементів топології ДП. Це вирішить такі питання: видалення шуму із зображення (шум може виникати з причини поганої якості сканування або фотографії, а також через наявність дрібних плям на поверхні друкованої плати); сегментація зображення – поділ його на окремі елементи, такі як контури, зони й текст (цей процес може бути автоматизований за допомогою програмного забезпечення для обробки зображень); виявлення елементів – знаходження та відокремлення окремих елементів, зокрема резисторів, конденсаторів та інших компонентів, зображених на топології; відновлення елементів – використання програмного забезпечення для відновлення форми й розмірів окремих елементів (цей процес може бути автоматизований з використанням моделей глибокого навчання, які можуть розпізнавати різні типи елементів); аналіз топології – використання результатів обробки зображення для аналізу топології друкованої плати (це може передбачати перевірку з'єднань, вимірювання розмірів елементів і перевірку сумісності зі схемою пристрою). **Висновки:** за результатами роботи розроблено алгоритм автоматичного налаштування розмірів сканувальної ділянки "Block size" для бінаризації технологічних зображень топології ДП; визначено такі переваги розробленого алгоритму: автоматичне знаходження оптимальної сканувальної ділянки "Block size"; опір шумам зображення без використання згладжувальних фільтрів; знаходження деталей у зонах перепаду контрасту.

Ключові слова: обробка технологічних зображень; адаптивна бінаризація; метод "Otsu"; топологія ДП; знаходження "Block size".

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Баданюк І. О., Невлюдов І. Ш., Нікітін Д. О. Обробка технологічних зображень для комплексного аналізу дефектів і відхилень за допомогою адаптивної бінаризації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 164–173. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.164>

Badanyuk, I., Nevliudov, I., Nikitin, D. (2023), "Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarisation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 164–173. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.164>

Yu. GOLOVAN

AEROSPACE TECHNOLOGIES FOR ASSESSING SOIL CONTAMINATION

Actuality. Studies of soil pollution assessment are based on scientific principles that define a complex system of environmental safety management in the context of increased exposure to sources of secondary dust pollution of the atmosphere. To ensure environmental safety under conditions of high levels of dust pollution, it is necessary to apply and improve the relevant models. Among the many types of environmental pollution, dust pollution of the atmospheric air and the deposition of harmful substances on the soil are particularly dangerous. This pollution can take two forms: direct emissions from industrial enterprises (primary) or the formation of secondary pollution through physical and chemical processes in places where dust-like waste is stored. Fine waste after air purification with dimensions of less than 100 microns is particularly hazardous. In modern environmental monitoring and assessment of soil pollution, special attention is paid to remote methods that allow for more effective monitoring of the impact of human activity and solving environmental problems. The use of unmanned aerial vehicles is one such method that has positive results. **The purpose of the article** is to solve the scientific problem of improving aerospace methods based on unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring and assessing the quality of soil pollution. **The object of the study** is the use of aerospace tools for monitoring and assessing the condition of soil cover. To achieve this goal, the following tasks have been defined: to study the current state and ways to improve the efficiency of UAVs in the system of environmental monitoring of soils; to develop models of environmental assessment; to analyze existing approaches to the use of aerospace assets for monitoring and assessing the state of soil cover. **Conclusions:** a methodological approach based on a modified method of the comprehensive assessment of the level of technogenic hazard of industrial facilities is proposed to assess the state of environmental safety in conditions of intense dust pollution of the atmospheric air.

Keywords: information technology; technogenic hazard; soil cover; dust pollution; atmospheric air; technical solutions; environmental safety; morbidity.

Introduction

The scientific basis of soil pollution research is the need to determine the place of environmental hazards in the hierarchy of soil research. To ensure environmental safety in conditions of high levels of dust pollution, it is necessary to apply and improve the relevant models. At the current stage of soil research, five main areas of research are identified:

- production (for the production of products and raw materials for industry)
- preservation of the gene pool, reproduction of living beings;
- information (for scientific, cultural, educational and other information);
- engineering (for the creation and placement of engineering facilities, structures, roads, etc.);
- general environmental (global biochemical cycles, regulation of surface runoff, climate management and chemical element flows).

When conducting research to assess soil quality, it is necessary to distinguish between primary and secondary soil contamination and differentiate between sources of environmental hazards. Among the many types of environmental pollution, dust pollution of the air and

the deposition of harmful dust on the soil cover pose a significant danger. This pollution can be caused both by direct emissions from industrial enterprises (primary) and secondary formation as a result of physical and chemical processes in places where dusty industrial waste is stored. Fine waste after air purification (<100 microns) is considered particularly hazardous [1].

The creation of new and improvement of existing methods for constructing cartographic models for assessing soil quality is possible only on the basis of the integrated use of aerospace and contact measurements.

Analysis of recent studies and publications

Experimental studies on soil contamination are based on the use of expert assessment methods and information technology. Some laws of Ukraine, namely: "On Land Protection", "On Monitoring", "On State Control over Land Use and Protection", refer to the protection of lands that require special attention from the state, but are identified by the results of remote sensing. To determine the destructive processes of soil cover, it is necessary to have a database to update periodic information and build the dynamics of any processes. In order to make management decisions

on land use and protection, a full package of various information should be available to managers of different levels, including local governments and control bodies. The scientometric analysis of the study area revealed many environmental problems that need to be addressed. An analysis of previous studies suggests that the impact of secondary dust pollution on the ecology of the region is of considerable interest to such scientists: O. Adamenko [1], Y. Adamenko, L. Arkhipova, O. Mandryk, O. Mashkov, M. Malovanyi, H. Rudko, O. Trofymchuk [2], V. Trisniuk, et al. [3, 4].

The aim of the article is to solve the scientific problem of improving aerospace methods based on an unmanned aerial vehicle for monitoring and determining the quality of soil pollution.

The object of the study is information technologies for comprehensive soil monitoring based on aerospace and contact methods.

To achieve this goal, the following tasks have been defined: to study the current state and ways to improve the efficiency of UAVs in the system of environmental soil monitoring; to develop models of environmental assessment; to analyze existing approaches to the use of aerospace tools for monitoring and assessing the state of soil cover.

Analysis of the problem and methods of soil contamination detection

Soil contamination can occur both as a result of primary emissions from industrial enterprises and as a result of physical and chemical processes in places where dusty industrial waste is stored, especially fine dust removal waste. This secondary type of pollution is quite widespread, as there are currently no effective technologies for utilizing this waste. Failure to consider secondary soil contamination when monitoring environmental hazards can lead to underestimation of the environmental risk. In such cases, it is important to assess the impact of soil pollution sources in the formation of an industrial hazard. Typically, the technogenic hazard indicator is determined by the formula

$$T = K_T K_{KM} K_p \frac{\sum_{i=1}^N K_{ui} a_i M_i}{N}, \quad (1)$$

where T – is an indicator of technogenic hazard due to soil pollution;

K_T – coefficient of regional economic activity;

K_{KM} – coefficient of the number of citizens exposed to pollution;

K_p – coefficient that takes into account the terrain;

K_{ui} – coefficient depending on the characteristics of emission sources;

a_i – air emission rate;

M_i – annual weight of ingredients contained in emissions to soils, tons per year;

N – the number of ingredients..

Assessment of ecosystem dynamics under conditions of anthropogenic dust pollution of atmosphere air

A geodatabase has been created to assess changes in the ecosystems of the Carpathian region as a result of man-made dust pollution. It contains satellite images obtained from Landsat 7 satellites (shown in Figures 1 and 2), topographic maps, and digital elevation models with different levels of detail [5].



Fig. 1. Landsat 7 satellite image with a resolution of 30 m (10.05.2021)



Fig. 2. Landsat 7 satellite image with a resolution of 30 m (20.07.2021)

Since most anthropogenic phenomena and processes are multifactorial, it is impossible to take into account

the degree of influence of each factor on the formation of the phenomenon. Therefore, a probabilistic approach based on the construction of interpretation and extrapolation models using monitoring results, such as observation series, and methods of mathematical statistics and probability theory, is effective for predicting environmental hazards. This approach makes it possible to take into account the multifactorial nature and uncertainty of the impact of individual factors on the result [6] (Fig. 3).

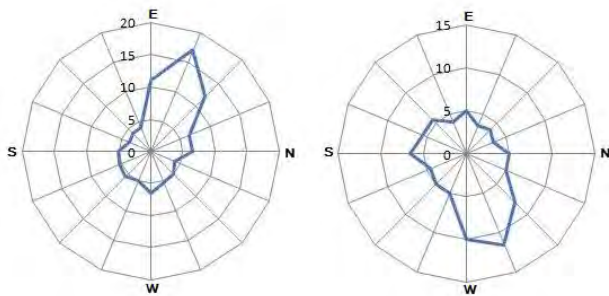


Fig. 3. Wind rose diagram of Burshtynska TPP

The wind rose and the probabilistic approach to predicting the environmental hazard of Burshtyn TPP are associated with the multifactorial nature of techno-natural phenomena and processes.

It is impossible to take into account the influence of each factor on the formation of the phenomenon, so it is advisable to use a probabilistic approach. This approach consists in building interpretation and extrapolation models based on monitoring data and methods of mathematical statistics and probability theory.

The wind rose is a tool for determining the directions of pollution spread, which can be used to improve the forecasting of environmental hazards from the Burshtyn TPP [7, 8].

In predicting maximum environmental performance, such as safety and pollution levels, a mathematical random variable model is often used as a simple and popular probabilistic approach. This model is the most effective. Sulphur dioxide in the atmosphere can react with water to become an acid, which is then likely to fall to the ground as rain. Today, sulphur dioxide emissions are the most acute problem, as they exceed European standards. Carbon monoxide, in turn, changes the greenhouse effect.

To promptly detect, localise, identify and monitor the anthropogenic and environmental impact of pollution on aquatic ecosystems and, as a result, on human activity, there is an effective method for building multi-criteria mapping models of the area in combination with remote

sensing data analysis. This method, proposed by G. Krasovsky [2], makes it possible to determine the degree of combinatorial influence of the factors that cause a hazardous phenomenon. Contact methods for determining the areas affected by erosion processes involve a set of field and desk-based work. Field work involves surveying the territory, measuring habitat areas using GPS equipment, and taking samples of soil chemical composition. Desk-based work involves processing field data and forecasting the further development of these processes. The advantage of contact methods is the high accuracy of measurements of soil chemical composition and vegetation [9].

Thus, the creation of new and improvement of existing methods for building cartographic models of environmental assessment of agricultural land is possible only on the basis of the integrated use of aerospace and contact measurements, taking into account the variety of grain crop hybrids grown, the quality of agrochemical measures, meteorological conditions and the characteristics of the analysed area [10].

An analysis of methods for monitoring changes in the environmental state of the region showed that remote sensing data processing is the most efficient in terms of efficiency and retrospectivity of data, as well as in terms of labour and material costs. The results of multispectral imagery can be analysed semi-automatically by calculating the so-called vegetation indices. When they are calculated, new images of the area are created, where certain objects are highlighted by colour gradation. Out of the variety of vegetation indices, we selected the two most relevant to the subject of the research – the NDVI and NDWI indices.

The NDVI indicates the difference in vegetation levels for each field and is calculated using the formula

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (2)$$

where NIR is the reflection value in the near-infrared spectrum;

RED – the value of reflection in the red part of the spectrum.

The NDWI index indicates the level of surface moisture and is calculated by the formula

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}, \quad (3)$$

where NIR is the reflectance value in the near-infrared spectrum;

SWIR – reflectance value in the short-wave infrared spectrum.

It is outlined that remote sensing methods have a number of features (time of survey, meteorological conditions, type of equipment, image resolution, etc.) in the context of determining the factors influencing the reflectivity of soils and vegetation and have been studied in detail. However, their main disadvantage is that in order to be confident in the results of remote sensing data processing, it is necessary to have at least some a priori information about the study area. After collecting, processing and analysing field and laboratory data from each site, soil contamination is calculated.

Building digital terrain models and creating cartographic models of surface slopes, combined with meteorological data, allows us to determine the impact of agricultural land on the aquatic ecosystem and soil pollution. Retrospective monitoring of the study areas based on remote sensing data reveals the effects of agricultural soil use on the ecological state of the region. In this way, a structural scheme for monitoring and assessing the impact of agricultural processes on the environmental safety of the territories was formed [11, 12]. Based on the results of remote sensing, the terrain is analysed and retrospective monitoring of land use for agricultural production is carried out.

The use of unmanned aerial vehicles has many advantages, including fast and accurate information about the state of the environment in a given area, the ability to reach hard-to-reach areas, and the ability to modify UAV onboard systems depending on the monitoring task. Modern UAVs have many capabilities, such as photo and video surveillance in the visible spectrum, as well as thermal and radar imaging. In addition, an approach has been developed to formulate a time or economic criterion to determine whether UAVs can be used at minimal cost to perform environmental tasks. An additional advantage of using UAVs for environmental control is the ability to respond quickly to the detection of pollution and take timely measures to eliminate it. The use of UAVs also reduces the risk for people who carry out observations in hazardous conditions, such as in pollution zones where exposure to toxic substances is possible. The use of UAVs in environmental control is an important element of the strategy for preserving the natural environment and improving environmental safety. In solving the problems of monitoring geo-environmental systems using unmanned aerial vehicles, the landscape approach is key. It considers the image of the earth's surface obtained with the help of technology as a complex geo-environmental system where all elements are closely connected and interact with each other.

The landscape is seen as a result of natural and human activity, while it retains traces of different stages of development, which makes it possible to assess the importance of the landscape for the study of geo-environmental systems in both spatial and temporal aspects.

Contact methods provide information on the current agrochemical state of air, soil and water, as well as check the adequacy of remote sensing data processing results. Internet services provide information on the legal regime of land use for agricultural activities, as well as the legal framework for regulating the environmental condition of the area. This information makes it possible to build thematic mapping models and develop protection measures against harmful substances to ensure a sustainable environmental state of the region and maintain the level of agricultural production of grain crops. In addition, the information obtained reveals areas where there is an increased risk of erosion processes, and therefore the need for constant monitoring. The end result of data processing, analysis and interpretation is geomodels of the studied areas with a corresponding database that can be filled with new information or serve as a basis for making management decisions on the development of the region's environmental status [13].

Remote sensing makes it possible to detect erosion processes in soils, as they have a significant impact on optical properties. This is because erosion reduces the amount of humus and clay in soils, which leads to an increase in the brightness of their surface. This phenomenon is amplified when lighter rocks come to the surface after the upper soil layers are washed away. Erodibility is an important soil characteristic that can be detected on satellite imagery, and it can help monitor soil conditions and avoid negative impacts of economic activities. Soil erosion can be caused by either water erosion or wind deflation. One of the main factors of water erosion is surface water runoff. The flow regime depends on various factors, such as rainfall, topography, soil properties, vegetation cover, land use and many other factors.

Linear erosion forms, such as gullies and ravines, can be tracked on satellite images. These forms appear on images with a spatial resolution of 1 to 2 m as clearly defined contours with a jagged shape. On images with a spatial resolution of more than 10 m, gullies are usually not visible, but networks of gullies with elongated wavy tree-like shapes are clearly visible. The bottoms and slopes of gullies are usually occupied by natural vegetation, which is denser and more moisture-loving in the lower parts of the slopes and along the bottoms.

Specialists of the Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine have developed a clustering algorithm that allows for clearer detection of gully structures on satellite images in combination with digital elevation model (DEM) data. Remote sensing is a powerful tool for obtaining information about different areas, especially for objects that are inaccessible or difficult to reach. For example, the study of gully structures, forms and soil types in Boryspil, Kyiv region, and Pancheve village, Novoukrainskyi district. Pancheve in Novoukrainskyi district of Kirovograd region can be used for detailed cartography, land use, industrial planning and other purposes.

To analyse and process the results obtained, the modelling tools of the ERDAS Imagine package were used, which performs various image processing operations, including classification and clustering. The developed clustering algorithm makes it possible to determine the similarity of objects in the image and to distinguish them from others. Thus, the results of the study may be relevant for various purposes, such as land management, environmental protection, transport infrastructure planning, construction and industrial development planning, etc.

This indicates that land resources have been exploited for decades without taking into account natural factors and the principles of sustainable development. As a result, serious problems have arisen: natural ecosystems have been destroyed, their biodiversity has decreased, the environment has been polluted and the climate has changed. Such processes are typical for many regions of the world where soil degradation is occurring, especially on land used for growing crops. The deterioration of the humus condition of soils leads to a decrease in their fertility and bioproductivity. This ultimately reduces the quality of crops and increases dependence on chemical fertilisers and pesticides. In addition, soil degradation can lead to a decline in biodiversity, in particular through the loss of natural habitats for various plant and animal species. This can have a negative impact on ecosystem services, which ensure the environmental sustainability and resilience of geosystems. Therefore, it is important to ensure sustainable and environmentally sound development of agricultural areas, taking into account the impact on natural resources and ecosystems.

It is important to pay attention to the use of land resources, taking into account their natural characteristics and potential. It is necessary to develop land use with

a view to sustainable development and preservation of ecological balance. To this end, it is important to use scientifically sound methods and principles of soil, water and forest conservation, and to reduce the environmental impact of industry and other activities. It is also important to create special protection zones for natural complexes and ensure their effective functioning. The deductive approach to landscape research is to study individual characteristics of landscape systems to understand their organisation as holistic entities. The use of remote sensing and multidimensional spatial analysis allows us to identify patterns of landscape structure and genetic relationships between individual landscape elements.

Some landscapes may have similar or even identical spectral characteristics that make it impossible to distinguish them on images. This can be caused, for example, by sparse and small plant communities, soil cover, moisture, and other factors. To solve these problems, complex analysis methods are usually used, including additional information from other sources and manual work by interpreters. Targeted use of industrial and agricultural waste can help improve the ecological state of the pedosphere. For example, using organic waste as fertiliser can reduce dependence on chemical fertilisers and improve soil quality. Using industrial waste to build roads and other structures will reduce the negative impact on the environment and reduce the need for the extraction of new materials. It is also necessary to take into account the impact of human activity on natural ecosystems and implement measures to preserve them, such as green plantations, restoration of river ecosystems, creation of nature reserves, etc.

The classified image clearly shows linear objects such as dirt roads, roads and railways, forest clearings and clearings with power lines. They are particularly visible where they cross forests due to their light tone. The most visible are dirt roads built on the highest ground, with their lithological base being sands. But within settlements, they often disappear, as they have identical or similar brightness to other elements that form the settlement. Due to their special internal organisation, settlements can be clearly identified against a less structured background. The rectangular shape of buildings and gardens and the network of roads leading to or crossing them play a significant role in this.

It should be noted that due to the complex colour scheme, the detail of the settlements in the classified image is much higher than in the panchromatic satellite image. Colour combination is also an identifying feature of the natural conditions and location of the territory.

While the colours of peat bogs, forests, and meadows dominate on the interfluvium, and the colours that reflect different degrees of humusification of arable land are much less common, the ratio of cover and, therefore, their brightness is somewhat different on the birch terraces of the Dniester River. In the second case, additional deciphering features of settlements are the large size of the surrounding agricultural land, while in the interfluvium it is smaller. Thus, satellite imagery is a useful tool for determining landscape features of a territory, but it cannot be relied upon entirely for landscape mapping.

The boundaries of plant communities on the images may not coincide with the boundaries of landforms, which complicates the process of delineating tracts. In addition, the images may contain patches of developed areas covering several landscape systems. This makes it difficult to identify them in black and white images. Deciduous and coniferous forests can be shown in the same tone in panchromatic images, which also makes it difficult to distinguish them if they are located side by side.

The advantage of classified images is the ability to use digital processing techniques to automate the process of extracting image elements and classifying them. For example, machine learning algorithms can be used to identify soil types, which is faster and more accurate than a human expert. In addition, digital methods allow for the rapid processing of large amounts of data, which results in faster and more efficient mapping.

The colour scheme and detail of image elements on classified maps can make it difficult to understand and perceive the landscape. For example, if the colour of a satellite image is uniform, different elements on a classified map may stand out, which is likely to change the perception and understanding of the boundaries of the territory. For example, identifying areas with shallow groundwater using remote sensing is a rather difficult task. However, some features may indicate the presence of such zones, as mentioned above, such as increased topsoil moisture and moisture-loving vegetation.

Soil moisture can be determined using different spectral ranges. For example, in the optical range, measurements are made by determining the coefficients of spectral brightness and reflectivity of dry and wet soils, as well as the polarisation of reflected light. In addition, increased soil moisture can be detected in the infrared and microwave ranges by measuring the radiance temperature of the soil throughout the day. However, it should be noted that these methods do not directly indicate the occurrence of groundwater, but only

provide indirect indications of the presence of high soil moisture. Therefore, a combination of several methods and detailed geological and hydrogeological information about the study area may be required to more accurately identify areas with shallow groundwater.

In addition, the variation of brightness values can lead to a sharp difference in the display of trace elements, which can make it difficult to perceive individual details on maps. Therefore, when constructing landscape boundaries, it is necessary to take into account not only classified maps, but also additional information about the landscape, in particular, orientation to the terrain, taking into account its physical and natural features. However, it should be noted that image classification has its limitations and drawbacks. For example, when using colour classification, errors can occur due to the similarity of colours of different objects.

Also, when processing large amounts of data, errors may occur due to incomplete or incorrect information, as well as the lack of a priori information about objects in images. Therefore, it is important to follow the correct methods of data processing and analysis, as well as to take into account possible errors and limitations when interpreting the results. These methods have their drawbacks. First and foremost, it is the insufficient study of moisture and the complexity of its interpretation.

Radar surveying methods determine the areas of waterlogging and the depth of groundwater occurrence using the complex permittivity of soils. However, given the lack of a priori information, it is difficult to adapt them to forecast the development of flooding processes. The method of cosmobiointication developed by G. Krasovsky makes it possible to control waterlogged areas by determining the state of vegetation cover by vegetation indices according to the degree of waterlogging. However, the application of this method is limited to uncultivated wetlands and ponds. Remote methods help to accurately determine the contours of flooded areas based on indicative signs and conduct operational monitoring. However, these methods have insufficient accuracy in determining the depth of groundwater.

Anthropogenic soil erosion is a complex phenomenon caused by both natural and economic factors. A set of measures to protect soils from erosion and rational land management can help maintain landscape balance in the face of complex terrain and diverse soil cover. The study of erosion processes and the formation of eroded soils is important for the development and implementation of effective erosion control systems and the rational use

of eroded land. This allows us to get a complete picture of the condition and characteristics of eroded areas, identify their potential opportunities and limitations, and develop scientifically sound recommendations for the restoration and protection of these lands. Such research is an important element of the soil conservation strategy, as it allows for optimal use of resources and increased soil productivity. They also help to identify effective measures to combat soil erosion and prevent its further spread. The hydrothermal coefficient (HTC) is used to estimate the moisture availability of plants during the growing season and is calculated using the following formula:

$$HTC = \frac{(T_{av} + 10)}{(C_{av} + 10)}, \quad (4)$$

where T_{av} is the average air temperature during the growing season (usually from March to October), and C_{cp} is the average precipitation during the same period.

The HTC value is expressed as a percentage. The higher the HTC value, the greater the potential for plant productivity and soil erosion protection. For example, in regions with an HTC of more than 1.5, greenbelts are installed to protect against soil erosion. This is an effective method. Air humidity and winds have a significant impact on the intensity of erosion and on the evaporation of soil moisture, which can lead to a decrease in soil moisture turnover and an increase in the risk of erosion. In addition, strong winds can redistribute snow over the territory and lead to uneven freezing of the soil, which can increase the intensity of erosion. Taking these factors into account is important when designing erosion protection measures. Relief is an important factor that determines the nature of erosion processes. The example of the Holohori-Kremenets Ridge shows how a steep and high escarpment can increase the erosion activity of the river network and cause dismemberment of the relief. On the other hand, the mature denudation pattern that characterizes most of the area may reduce the intensity of erosion processes, as it has already passed the stages of active denudation and river valley formation. However, the topography is not the only factor that determines erosion processes in the region. The terrain can also be affected by climatic conditions, land use, and other factors. It is worth noting that, in addition to satellite imagery, geographic information technologies include other tools, such as geographic information systems (GIS). GIS can be used to process and analyze various geoinformation data, including satellite images, and

create digital maps of various parameters of objects. Such maps can help to establish the relationship between various factors affecting erosion processes and identify the most vulnerable areas of the earth's surface. In addition, GIS can be used to predict the development of erosion processes based on mathematical models, as well as to develop and evaluate the effectiveness of erosion prevention measures.

The methodology for identifying patterns of landscape structure based on multidimensional spatial analysis using the theory of nonlinear oscillations allows us to study the influence of various factors on landscape formation and determine their interrelationships. The results obtained can be used for genetic interpretation of landscape habitats and understanding of the processes taking place in them.

Thus, it is important to take into account a systems approach in environmental research, as environmental problems are complex interactive systems that contain not only biological but also social and economic components. For example, morbidity and mortality rates can be caused not only by environmental factors, but also by social factors, such as living standards, access to medical care, etc. However, environmental factors can be one of the main causes affecting human health and the ecosystem as a whole. Therefore, to address environmental and health issues, it is important to conduct comprehensive research that takes into account various factors and the interrelationships between them.

To determine the impact of the hazard on the health of the local population, we identified areas of agricultural development with high dust concentrations located near industrial enterprises, the main sources of secondary air pollution [14]. The size of these zones was determined by calculating emission dispersion using the EOL software package.

The use of geoinformation technologies, in particular GIS and remote sensing, provides more accurate and complete information on the state of the environment and the development of environmental problems. This allows for more informed decision-making in the environmental sphere, reducing the risks of negative impact on the environment and public health.

Environmental forecasting based on geoinformation data helps to identify potential negative consequences of the development of settlements depending on various factors, such as air, water and soil pollution, ecosystem destruction, etc. Such analysis allows us to develop effective measures to reduce the negative impact on the environment, improve the health of technologically

polluted areas and create more comfortable living conditions for the population. An important component of the successful solution of environmental problems is ensuring access to quality and reliable information for making informed decisions.

Based on the results of the study, it was determined that in the areas of direct impact of sources of secondary dust pollution, the impact of environmental hazards on the incidence of diseases among the population is increasing. The system of environmental safety management in a region with a high level of secondary dust air pollution involves a comprehensive system of technical and technological factors operating under conditions of intensive exposure to pollution sources. This system is based on the principles developed after a comprehensive analysis and synthesis of the results of previous theoretical and practical studies on environmental safety management at the regional level [15].

The effectiveness of departmental surveillance systems in relation to the defined tasks can be assessed within the framework of the following proposed assessments:

- spatial and temporal resolution of the network (minimum size and variability of the observed objects);
- parametric composition of observations (adequacy, necessity and sufficiency of the number of measured indicators to characterise the state of the monitored objects);
- efficiency of the observation network, i.e. the time of sending standard and extreme information to the consumer (this relative indicator is compared with the time of preparing a management decision, since for each type of object this time period may differ depending on the characteristic period of its variability);
- the degree of informatisation of the monitoring network (automation of collection, storage, processing and sending of monitoring data to the consumer);
- compliance with the goal set by the monitoring entity (target orientation to a specific type of management decision).

This means that the implementation of the management solution will reduce the amount of waste transported to storage sites by 2500–3000 tonnes per year. This reduction in waste will lead to a decrease in the level of man-made dust pollution in the study area [16]. The use of various on-board equipment on UAVs makes it possible to improve the monitoring system for

assessing the risks of man-made pollution [17]. It is also possible to monitor, model and predict the state of the environment in a given region.

These are very interesting research results that demonstrate the potential of using the latest technologies to solve environmental problems. In particular, the environmental safety management system created for the hazards associated with secondary dust air pollution can help to effectively control and reduce the level of environmental pollution.

The developed technical solutions for eliminating hazard sources by involving fine dust waste in the manufacturing process of targeted products indicate the possibility of using this waste as secondary raw materials. Thus, the implementation of these technical solutions can reduce the negative impact of the industry on the environment. This will help ensure environmentally friendly production and preserve natural resources

Conclusions

The study found that dust pollution can pose an environmental hazard. The necessity of distinguishing between primary and secondary sources of danger in accordance with the main technological process of production is proved. A methodological approach to assessing environmental safety in conditions of intense dust pollution is proposed. The creation of new and improvement of existing methods for building cartographic models of environmental soil assessment is considered. This approach is based on the use of the method of comprehensive assessment of the level of technogenic hazard of industrial facilities and time series analysis. It has been established that manifestations of environmental hazards affect the morbidity of the population directly exposed to sources of secondary dust pollution of the atmospheric air.

In further research, it is advisable to analyse the state and trends in the development of methods, technologies and mathematical apparatus for the creation and application of systems for detecting and polluting soils using UAVs and other aerospace vehicles; to improve methods for detecting soil pollution using UAVs and satellite imagery.

References

1. Adamenko O. M. Ecological security of territories. *Monograph* / O. M. Adamenko, Ya. O. Adamenko, L. M. Arkhipova and others. – Ivano-Frankivsk: Suprun, 2014. – 456 p.
2. Grekov L.D., Krasovsky G.Ya., Trofymchuk O.M. Space monitoring of land pollution by man-made dust. Kyiv. *Scientific thought*. 2007. – 219 p. URL: https://www.studmed.ru/view/grekov-ld-krasovskiy-gya-kosmchniy-montoring-zabrudnennaya-zemel-tehnogennim-pilom_67bc19d7782.html?page=6
3. V.M. Trysnyuk, V.O. Shumeiko, Yu.M. Golovan the mechanism for determining the quantitative characteristics of the concentration level of pollutants emitted by road transport. *Kyiv National University of Construction and Architecture. Environmental safety and nature management*. No. 2 (37), Kyiv. 2021. P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.2.79-93>
4. Dovgiy S. O., Bidyuk P. I., Trofymchuk O. M., Savenkov O. I. Forecasting methods in decision support systems. – K.: *Azimuth-Ukraine*. – 2011. – 608 p. URL: <http://legal.nam.edu.ua/monographs/13/files/publication.pdf>
5. Trysnyuk V.M. Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems. *Information processing systems*. – 2016. – No. 12. – P. 185–188. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.127>.
6. Algorithm for processing information about radioactive contamination of the area using DZZ and GIS data. / V.M. Trysnyuk, A.A. Nikitin V.O. Shumeiko // *Control, navigation and communication systems. Poltava National Technical University named after Yury Kondratyuk*. Poltava Issue 6 (46) 2017. P. 102–110.
7. L. Horoshkova, Ie. Khlobystov, V. Trysnyuk, T. Trysnyuk. Dynamic balance of natural resource use aimed at national economy's sustainable development (the case of coal mining adaptive modelling). *European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021*, Volume 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521107>.
8. Dovgiy O. S., Trofymchuk O. M., Korzhnev M. M., Yakovlev E. O., Trysnyuk V. M. other. Monitoring of the mineral and raw material base of Ukraine and the ecological state of the territories of its mining regions in the context of ensuring their sustainable development. / Dovgiy O. S., Trofymchuk O. M., Korzhnev M. M., Yakovlev E. O., Trysnyuk V. M. other. – Kyiv. *Nika Center* – 2019. 148 p.
9. V. Trysnyuk, V. Prystupa, T. Trysnyuk, V. Vasylenko, A. Kurylo. Comprehensive environmental monitoring based on aerospace and ground research data. *Наживо. XIXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects". Geoinformatics 2020. 11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine*. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo066>
10. Analysis of work on cleaning the territory of Ukraine from explosive objects in 2021. URL: <https://dsns.gov.ua/uk/protiminna-diyalnist/gumanitarne-rozminuvannya> (date of application: 11/18/2022).
11. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, I. Radchuk, L. Horoshkova, Ie. Khlobystov, Y. Nagorny. Modeling of dangerous processes of natural and man-made disasters. *European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021*, Volume 2021. P. 1 – 6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521063>.
12. Ie. Khlobystov, L. Horoshkova, V. Trysnyuk, D. Tarasenko, O. Tarasenko, L. Filipishyna. Economic and mathematical modelling of sustainable extraction of natural resources. *European Association of Geoscientists & Engineers Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021*, Volume 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521111>.
13. Trofimchuk O. M., Adamenko O. M., Trysnyuk V. M. Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund *Monograph / Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ivano-Frankivsk National technical University of Oil and Gas*. – Ivano-Frankivsk: Suprun V. P., 2021. – 343 p.// ISBN 978-617-7468-53-9.
14. Vasyl Trysnyuk, Taras Trysnyuk, Anatolii Nikitin, Anatolii Kurylo, Olga Demydenko. Geomodels of space monitoring of water bodies. *ICSF 2021. E3S Web of Conferences 280, 09016 (2021)*. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009016>.
15. Trysnyuk V. M., Okharev V. O., Trysnyuk T. V., Smetanin K. V., Golovan Yu. M. Creation of a mobile environmental monitoring system. *Environmental safety and balanced resource use: scientific and technical journal. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (IFNTUNG); Ivano-Frankivsk: Symphony forte*. – 2018, No. 2 (18) – P. 116–123. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/7063>.
16. V. Trysnyuk, O. Demydenko, T. Trysnyuk, L. Horoshkova, Ie. Khlobystov, Y. Holovan. [21062]. GIS technologies for monitoring forest plantations. *Conference Proceedings, Geoinformatics, 11–14 May 2021, Kyiv, Ukraine*, Volume 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521062>.

17. V. Trysnyuk, V. Prystupa, T. Trysnyuk, V. Vasylenko, A. Kurylo. Comprehensive environmental monitoring based on aerospace and ground research data. *Наживо. XIX th International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects". Geoinformatics 2020. 11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine.* DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo066>

Received 16.03.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Голован Юрій Миронович – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, аспірант, Київ, Україна; e-mail: dirrecta@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-9310>

Golovan Yuriy – Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Postgraduate Student, Kyiv, Ukraine.

АЕРОКОСМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ

Актуальність. Дослідження оцінки забруднення ґрунтів оновані на наукових принципах, що визначають складну систему управління екологічною безпекою в умовах посиленої дії джерел вторинного пилового забруднення атмосферного повітря. Для забезпечення екологічної безпеки в умовах високого рівня пилового забруднення необхідно застосовувати та вдосконалювати відповідні моделі. Серед багатьох видів засмічення довкілля особливо небезпечним є пилове забруднення атмосферного повітря та осідання шкідливих речовин на ґрунті. Це забруднення може мати дві форми: пряме викидання забруднень від промислових підприємств (первинне) або формування вторинних забруднень через фізико-хімічні процеси в місцях зберігання пилоподібних відходів. Тонкодисперсні відходи після очищення повітря з розмірами менше ніж 100 мкм є особливо небезпечними. У сучасному екологічному спостереженні та оцінюванні забруднення ґрунтів особливу увагу звертають на дистанційні методи, що дають змогу ефективніше відслідковувати вплив людської діяльності та вирішувати екологічні проблеми. Використання безпілотних літальних апаратів є одним із таких методів, що має позитивні результати. **Мета статті** – розв’язання наукової проблеми вдосконалення аерокосмічних методів на основі безпілотного літального апарата (БПЛА) з метою моніторингу та оцінювання якості забруднення ґрунтів. **Об’єктом дослідження** є застосування аерокосмічних засобів для моніторингу та оцінювання стану ґрунтового покриву. Для реалізації цієї мети визначено такі **завдання**: дослідити сучасний стан і шляхи підвищення ефективності роботи БПЛА в системі екологічного моніторингу ґрунтів; розробити моделі екологічної оцінки; проаналізувати наявні підходи щодо застосування аерокосмічних засобів для моніторингу та оцінювання стану ґрунтового покриву. **Висновки**: для оцінювання стану екологічної безпеки в умовах інтенсивного пилового забруднення атмосферного повітря запропоновано методичний підхід, оснований на модифікованому методі комплексного оцінювання рівня техногенної небезпеки промислових об’єктів.

Ключові слова: інформаційні технології; техногенна безпека; ґрунтовий покрив; пилове забруднення; атмосферне повітря; технічні рішення; екологічна безпека; захворюваність населення.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Голован Ю. М. Аерокосмічні технології визначення оцінки забруднення ґрунтів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості.* 2023. № 1 (23). С. 174–183. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.174>

Golovan, Yu. (2023), "Aerospace technologies for assessing soil contamination", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 174–183. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.174>

I. NEVLIUDOV, A. SLIUSAR, S. KHRUSTALOVA, K. KHRUSTALEV

AUTOMATED RESOURCE MANAGEMENT SYSTEM FOR THE UTILITY SECTOR BASED ON WIRELESS SENSOR NETWORKS

The subject of this study is methods, tools and automated resource management systems for the housing and communal sector. The object of research is the process of controlling resource consumption at housing and communal facilities. **The aim of the study** is to develop an automated resource management system for the utility sector based on wireless sensor networks. To achieve this goal, the following tasks were **solved**: a review and analysis of existing methods, tools and automated resource management systems; selection of system components based on technical requirements and taking into account the selected LoRaWAN wireless connection technology; development of a structural diagram and algorithm for the operation of an automated resource management system based on wireless sensor networks; modelling of the process of managing the resources of the utility sector using a wireless sensor network based on t The following **methods** are used in the work: critical analysis of LoRa technology and other wireless IoT technologies, FOREL and K -means clustering methods. The following results were **obtained**: a general description of the automated resource management system was carried out, its composition and main tasks were determined, and technical requirements for it were established, wireless data transmission technology was selected, on the basis of which the automated resource management system was built, an in-depth comparative analysis of the most effective modern wireless technologies – LoRaWAN and NB-IoT – was carried out, system components were selected, a structural diagram and algorithm for the automated resource management system were developed, and the process of the automated resource management system was modelled. **Conclusions**: the application of the proposed automated resource management system provides high-quality control of energy consumption at the facilities of the housing and communal sector, makes it possible to control their volume, monitor and analyse energy consumption data, and manage the entire energy supply network as a single system, which is especially necessary in martial law. This approach allows rationalising the consumption of resources by household consumers, which means that the financial costs of energy supply will decrease and the level of energy savings in the country will increase.

Keywords: energy supply; wireless sensor network; automation; gateway; monitoring; sensor node; base station.

Introduction

The current state of the housing and communal sector of Ukraine requires innovative approaches in the technological aspects of energy management.

The studied concept of an automated resource management system based on wireless sensor networks (WSNs) is used to modernise the system of accounting for household subscribers and maintenance of in-building supply networks for resources (electricity, hot and cold water, gas, heating), to manage their supply and to provide information services to consumers of the supplying company.

Given the challenging economic situation in Ukraine amidst martial law and active hostilities, it became necessary to initiate a regime of rational and economical use of resources.

A modern method of solving the problem of regulating energy consumption is to create an automated resource management system (ARMS) based on the WSN with the ability to remotely monitor resource consumption and store the information received in an independent audit and control service centre.

Thus, the integration of functionally different wireless devices (meters, sensors, sensors) into a single system for accounting and management of resource consumption is in line with the global trend of smart grids based on the principles of energy saving and energy efficiency, and the construction of such grids at housing and communal services (HCS) facilities [1].

Resource conservation is the most effective way to modernise HCS. The total cost of generating one kilowatt of aggregate capacity through energy saving measures is less than 10% of the required investment in the construction of the corresponding generating capacity. The energy saving potential of HCS is 65%. More than 50% of this potential can be realised through the introduction of system metering based on modern innovative IT technologies.

Today, suppliers and utilities have an unprecedented opportunity to transform their supply networks into smart grids that allow them to manage the entire supply network as a single system. At the same time, consumers can not only receive a reliable report on the resources consumed online, but also directly participate in regulating energy consumption in their homes and

apartments. This is facilitated by a new generation of smart metering devices and devices that support a bidirectional communication and control interface [2].

Thus, the task of developing an ARMS for the utility sector based on WSNs is relevant.

Analysis of recent research and publications

Most modern flow control systems are a complex of functionally integrated hardware and software and include sensor nodes with built-in data collection and transmission devices based on wireless technologies (Wi-Fi, GSM, LoRa, NB-IoT, etc.). The information is sent to the control and data transmission units (gateways or base stations), where it is read, processed and transmitted to the network server for further provision to external software applications, in particular, automated workstations for dispatch control.

The concept discussed in this article is very relevant and has been widely discussed in many scientific papers. For example, paper [3] provides a literature review of recent research on energy management systems and classifies works based on several factors, namely, energy management goals, approaches adopted for energy management, and solution algorithms. In addition, the paper discusses some of the most advanced methods and methodologies adopted or developed to address the energy management problem and provides a table for comparing such methods. The paper concludes by explaining the current challenges and limitations of energy management systems and outlines future research directions.

Paper [4] identifies external factors that influence the perception of the Building Energy Management System (BEMS) from the management perspective. An extended model based on the Technology Acceptance Model (TAM) was created to assess the implementation of BEMS in manufacturing industries. The model is analysed using the structural equation modelling (SEM) approach, where the external variables are taken as compatibility, features, technology complexity and perceived risk, and the internal variables are five dimensions: perceived ease of use, perceived usefulness, attitude, user satisfaction and behavioural intentions.

The study [5] describes the use and importance of energy management systems (EMS) used by utilities and end-users as a means of controlling electricity use and achieving energy savings. This approach also involves a comparative analysis of existing systems

and devices, as well as the growing use of EMS in the latest smart grids.

Paper [6] investigated ways to increase the data rate in WSNs using LoRa and obtained analytical dependencies for building a signal structure taking into account the overlap factor and inter-symbol interference.

Article [7] describes smart grid projects implemented in Europe and presents their technological solutions with a priority on the use of smart metering in low-voltage networks. The article considers the telecommunication technologies chosen by several European utilities to implement smart meters at the national level. Further research will be conducted on the basis of European smart grid projects, highlighting their technological capabilities. The range of projects analysed includes both those that include smart metering and those in which smart metering applications play a significant role in the overall success of the project.

There are automated energy management systems and tools from Smartico. The company actively develops and manufactures hardware devices for IoT. These devices help solve many technological problems in both the industrial and utility sectors. The devices operate using the latest algorithms for energy-efficient LPWAN radio networks – LoRaWAN and NB-IoT.

Main areas of activity:

- development and production of smart meters for gas, water, electricity, heat with wireless data transmission and the ability to remotely block energy supply;
- telemetric energy management systems (ASCOE, ASTUE) to monitor the consumption of gas, heat, water, electricity with further analytics during the processing of the data, generation of reports and data transfer to the company's accounting systems;
- control systems for the receipt, storage and delivery of fuel for the company's process vehicles (equipment of fuel and lubricants depots);
- development of telemetry radio terminals for remote control of technological facilities (mobile and stationary objects, GPS monitoring);
- control of technological parameters of mining special equipment (car video surveillance and adaptive driver assistance systems);
- control over the operation of fuel dispensers (equipment with automated mobile fuel dispensing modules);
- development and production of devices for the Internet of Things. Production of sensors with autonomous power supply and wireless data transmission;

- implementation of integrated solutions for the organisation of intelligent industrial and street lighting ("smart light");
- contract manufacturing of electronic equipment using its own production lines;
- development of equipment according to customer specifications;
- construction of wireless broadband transmission systems (organisation of wireless systems in the bands from 2 GHz to 5 GHz at speeds up to 200 Mbit/s);
- assistance in the development of technical specifications for the construction of control systems and control systems for technological equipment of various categories of complexity;
- process automation systems (solutions for automation of control, management and analytics processes at the enterprise);
- SCADA systems for automated and supervisory control of technological processes (automated process control systems using logic controllers and software);
- systems with the use of human-machine interfaces (HMI, Human-machine interface) for monitoring, controlling and programming technological processes;
- software development for automation of a wide range of technological processes for the enterprise [8].

There are also automated monitoring systems from YASNO. The management system allows us to increase control over the use of energy resources and reduce energy consumption through organisational measures, staff training, and the introduction of energy-efficient approaches in all key business processes.

Energy management involves building a mechanism for continuous improvement in reducing resource consumption based on the "plan – do – check – adjust" principle.

Advantages of monitoring systems from YASNO:

- cross-platform – the systems are capable of running on different devices and can be integrated into existing infrastructure;
- wireless transmission – information on energy consumption from the object of measurement is transmitted via GSM communication;
- versatility – control of electricity, water, gas, heat consumption, analysis of temperature, humidity, pressure, CO₂ and other resources;
- visualisation – flexible and customised dashboards for analysing and tracking consumption trends;
- measurement accuracy – the ability to use proven devices for commercial metering with a guaranteed low level of error;

- notifications – warning messages in case of emergencies, e-mail and messenger notifications;
- archiving and export – archiving of metering data for three years and the ability to export information to files.

It is also possible to integrate monitoring systems to meet customer needs. It is used when there are clear requirements for:

- flexibility of interface configuration;
- the ability to connect existing equipment;
- high metrological accuracy.

All the company's offers include:

- system design – monitoring the energy consumption of devices from small businesses to large industrial enterprises;
- equipment package – depending on the project, the system may include smart meters, sensors, modems, controllers, etc;
- installation and integration – installation of equipment, integration into existing infrastructure, software configuration;
- analytics and reports – assessing the potential for savings in the event of changes in consumption or equipment [9].

The results showed that various topics are directly or indirectly related to the application of smart metering, such as smart home/building, energy management, network monitoring, and integration of renewable energy sources (RES).

Material and study results

The main task of ARMS is to fully or partially automate the processes of monitoring information and managing the results of the volume of consumed resources (electricity, gas, heating, hot and cold water) at HCS facilities using special metering devices, as well as creating a database of data obtained for previous periods, monitoring the state of the energy system of HCS facilities.

ARMS plays an important role in informing the policy of resource conservation and cost rationalisation in the process of interaction between executive authorities, supplier companies and consumers.

The system has the following tasks:

- high-quality remote monitoring of resource consumption, as well as reading and transmitting data from heat, hot and cold water, electricity and gas metering devices;

– operational dispatch management and control of the HCS facility’s power system.

An automated resource management system consists of:

- resource consumption metering devices (sensors, flow meters, etc.)
- pulse radio modem (gateway);
- hub (base station);
- ARMS server.

The proposed resource management system consists of sensors, recorders, means of collecting, transmitting, displaying and processing information.

To implement the function of collecting data from metering and control devices, ARMS provides for bi-directional signal transmission in the areas "metering device – radio modem – hub – server".

Information is transferred from the metering devices to the server automatically at a specified frequency or upon request from the server.

ARMS transmits the stored data from metering devices to external automated systems, service companies and consumers.

The software of the server, concentrators and radio modems must be adaptive to function with different metering devices via a digital interface.

To ensure information security, the data transmission channels between the radio modem, hub and server must be encrypted and noise-resistant coding must be applied to transmit the data.

The radio modems and hub contain a universal control and wireless communication unit for wireless data transmission.

Communication is one of the most important parts of any resource management system. Today, there are a significant number of wireless communication standards, but not all of them meet the necessary requirements for their use in ARMS. The main such standards are power consumption, coverage radius and bandwidth. A comparison of technologies in terms of range and operating frequency range is shown in Figs. 1 i 2.

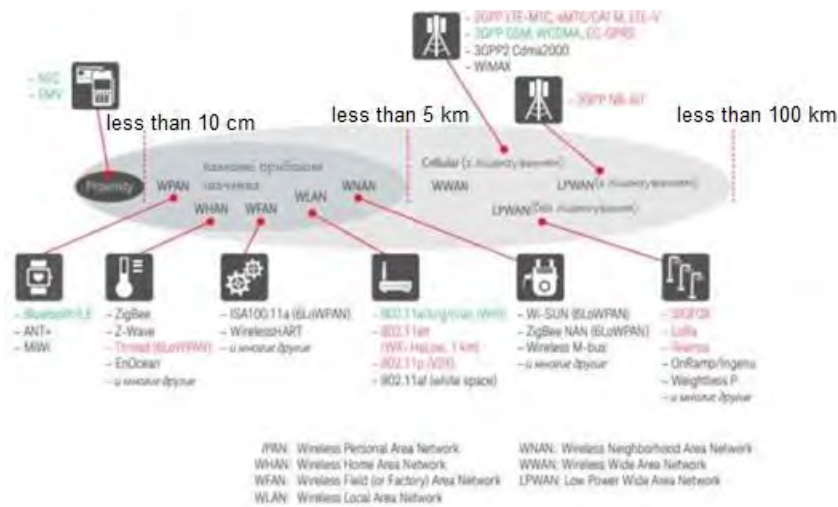


Fig. 1. Wireless communication technologies by range

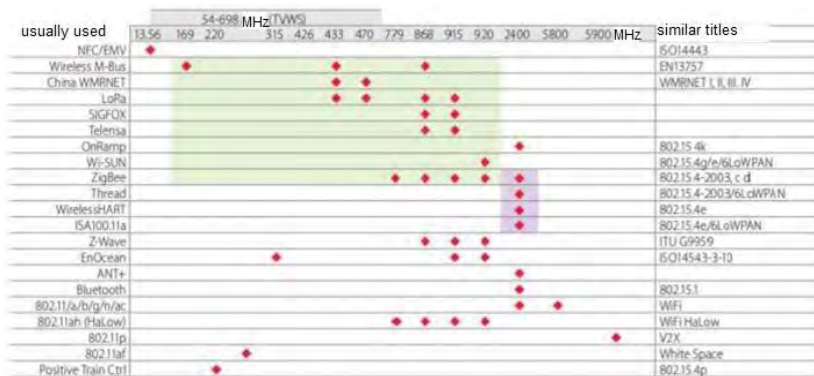


Fig. 2. Operating frequency ranges of wireless technologies

Most standards, such as ZigBee, WiFi, etc., have a short range. And others, such as 3G and LTE, are very power-hungry and their range is not guaranteed. Although these technologies and communication modes are suitable for

certain projects, they have limitations, such as difficulties in using them in areas without cellular coverage (GPRS, EDGE, 3G, LTE/4G) and the need for licensing. The parameters of the technologies are shown in Table 1.

Table 1. Parameters of wireless technologies

Parameter	LoRaWan	LTE-M	Sigfox	NB-IoT	BLE	Wi-Fi	Z-Wave	ZigBee
Communication standard	own	3GPP	own	3GPP	Bluetooth SIG	802.11	own	IEEE 802.15.4
Frequency	433 MHz, 868 MHz, 915 MHz.	from 700 MHz up to 2,2 GHz. from 452,5 MHz up to 467,5 MHz	868 MHz, 915 MHz, 921 MHz.	from 700 MHz up to 2,2 GHz, from 452,5 MHz up to 467,5 MHz	13,56 MHz.	2,4/5,0 GHz	from 868 MHz up to 926 MHz.	2,4 GHz
	RX 290 bit/s TX 50 Kbit/s	1 Mbit/s	0,1 Kbit/s	~200 Kbit/s	from 125 Kbit/s up to 2 Mbit/s	up to 150 Mbit/s	100 Kbit/s	250 Kbit/s
Transmission speed	star	star	star	star	P2P	star	Mesh	Mesh
Network topology	very high	very high	very high	very high	20	100	232	250+
Number of devices	from 5 km up to 15 km	5 km	from 10 km up to 50 km	5 km	from 40 m up to 1000 m	from 40 m up to 100 m	from 40 m up to 100 m	from 40 m up to 100 m
Radius of action	medium	high	medium	high	low	medium	medium	medium
Power consumption	mobile/local	mobile/local	mobile/local	mobile/local	local	local	local	local

Having analysed the characteristics of modern wireless communication technologies, as well as the technical requirements for modern resource management systems, it can be concluded that the ARMS under development requires an effective communication environment that meets the technical requirements, in particular, low power and wide range, as well as low cost, security and ease of deployment.

LPWAN technologies are most effective for connecting devices that need to transmit small amounts of information over long distances while ensuring long

battery life. The low power consumption of these devices allows them to perform tasks at a low cost and with very little battery replacement. This distinguishes LPWAN from other wireless network standards such as Bluetooth, RFID, and ZigBee [10].

Fig. 3 shows a diagram of the bandwidth and range of various wireless standards. For example, Wi-Fi, with its high bandwidth of several Mbit/s and limited range of 100 m to 200 m, is most often used to form wireless local area networks within an office or apartment, but will be ineffective for use in large control system networks.

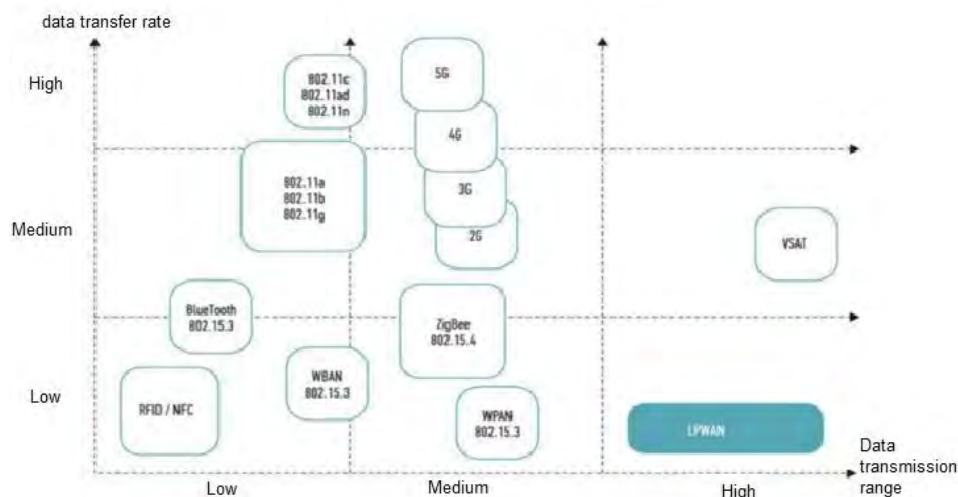


Fig. 3. Wireless technologies in terms of range and data transmission speed

When choosing the optimal LPWAN technology for ARMS, the following factors should be taken into account: quality of service, battery life, latency, scalability, payload duration, coverage area, range, deployment, and cost.

Let's take a closer look at the characteristics of two similar modern LPWAN standards, namely LoRaWAN and NB-IoT, which are best suited for the resource management system being developed [11].

LoRaWAN is an open-architecture LPWAN system developed and standardised by the LoRa Alliance, a non-profit association of companies with more than 500 members. LoRa is a modulation technology applied at the physical layer that enables long-distance transmission of information using CSS (Chirp Spread Spectrum) modulation, which spreads narrowband signals over an extended channel, and provides high resilience and low signal-to-noise ratios.

NB-IoT operates in a licensed band and, similar to LTE, uses frequency division multiple access (FDMA) in the uplink, orthogonal FDMA (OFDMA) in the downlink, and QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) modulation.

Both LoRaWAN and NB-IoT devices reduce their own power consumption when they go into sleep mode. However, as a synchronous protocol, NB-IoT consumes more power during operation than LoRaWAN, which is an asynchronous protocol, and for measurements with the same bandwidth, NB-IoT uses a higher peak current required for OFDM/FDMA modulation.

One of the factors that affects the cost and efficiency of LoRaWAN and NB-IoT is the better penetration of LoRaWAN in buildings. The maximum communication loss (MCL) for LoRaWAN uplink and downlink is 165 dB. At the same time, the loss for NB-IoT ranges from 145 dB to 169 dB for the uplink and 151 dB for the downlink, depending on the device class [12].

The lower energy potential of the communication line in NB-IoT leads to a significant reduction in battery life.

In addition, flexibility is a significant advantage of LoRaWAN technology. Unlike NB-IoT, LoRaWAN offers the deployment of a local network, i.e. a local network using a LoRa gateway, as well as the operation of a public network through base stations.

LoRaWAN technology has a fairly wide range (up to 20 km), meaning that it requires only three base stations to cover an entire city.

NB-IoT has a shorter coverage radius (i.e., the range is less than 10 km). The focus is on a class of devices that are installed in places far from the typical reach of cellular networks. Another problem is that NB-IoT deployment is limited to LTE base stations. This means that this technology cannot be used in rural or suburban areas where there is no LTE coverage.

Both technologies can compete in terms of service, as shown in Table 2 and Fig. 4.

It is also important to take into account the following types of costs: spectrum (licence), network/deployment and device costs (Table 3).

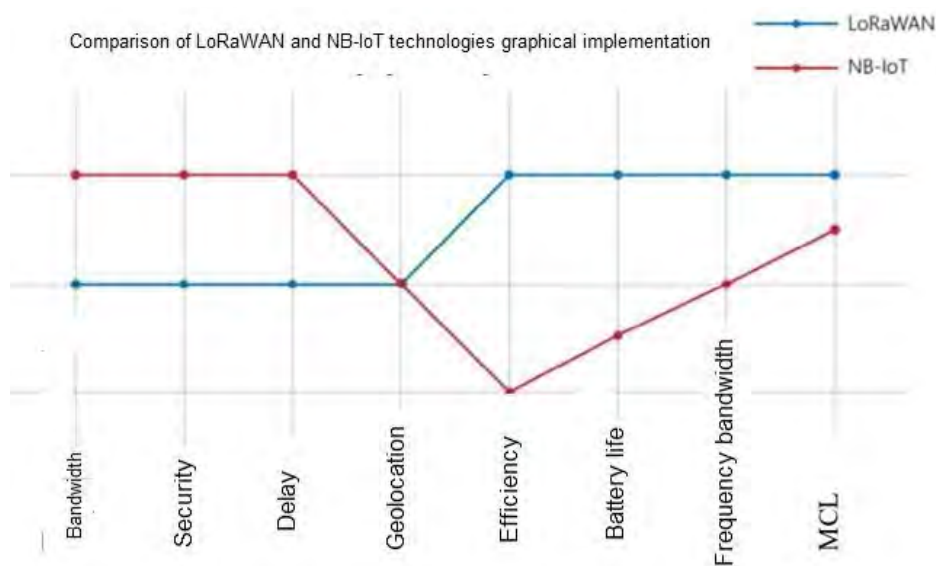


Fig. 4. Graphical visualisation of the comparison of LoRaWAN and NB-IoT technologies

Table 2. LoRaWAN and NB-IoT technical specifications

Technical characteristics	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation method	CSS	OFDMA/DSSS
Range	ISM	licensed
Speed	from 0.3 kbit/s up to 50 kbit/s	UL: 1 kbit/s to 144 kbit/s DL: 1 kbit/s to 200 kbit/s
Autonomy	more than 10 years	up to 10 years
Range of action, km	5 (urban), 20 (rural)	1 (urban), 10 (rural)
Frequency band, kHz	125	180
MCL, dB	165	164
Peak current, mA	32	120
Current in sleep mode, μ A	1	5
Safety	AES 128 bit	3GPP from 128 bit up to 256 bit
Cost efficiency	high	middle
Support	LoRa Alliance, IBM, Cisco, Actility, Semtech...	3GPP, Ericson, Nokia, Huawei, Intel...
Private network permission	yes	no
Ecosystem	Communication services are available in 40 countries and 250 cities. LoRaWAN is already an IoT network standard in many countries. The LoRa Alliance covers more than 500 companies.	According to the GSMA, in April 2017, 40 NB-IoT networks were tested worldwide, and only four networks were fully operational.

Table 3. Types of LoRaWAN and NB-IoT costs

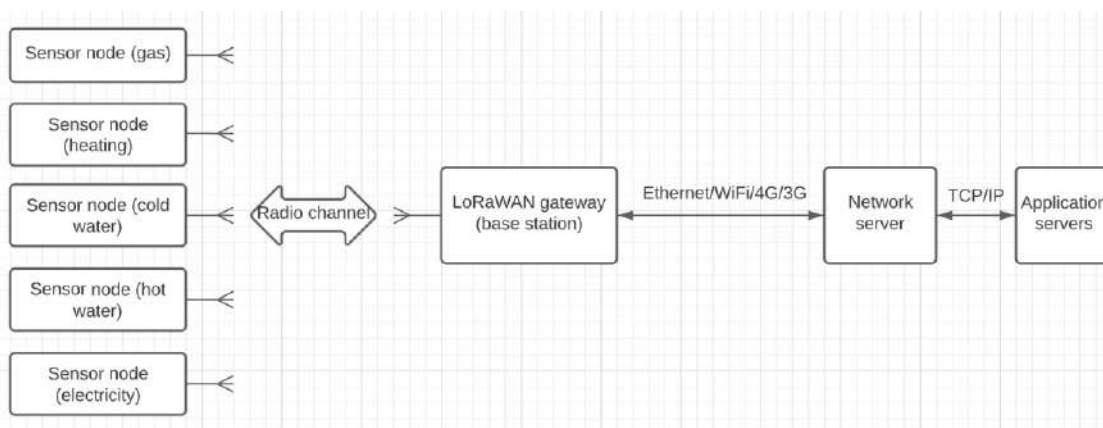
	LoRaWAN	NB-IoT
Spectrum cost, €	free	> 500 / MHz
Cost of deployment cost, €	>> 100 / gateway	> 15 000 / base station
Cost of the end device, €	> 1000 / base station	> 20

After analysing the information in Tables 2 and 3 comparing the two technologies, it becomes obvious that, unlike NB-IoT, LoRaWAN is optimal in most respects for its implementation in the ARMS under development.

Study results and their discussion

After selecting the communication standard, the ARMS structural diagram was created, and the main operating functions of each element of the system were identified and analysed (Fig. 5).

The end devices (sensor nodes) are connected to the LoRaWAN gateway in a star topology, and signals are transmitted between them using LoRa modulation. Within the LoRaWAN technology, this topology allows for the connection of new sensor nodes, and their number is not determined by the power consumption of the latter. Thanks to the peer-to-peer point-to-point connection, the star topology is more efficient and cheaper to implement than the mesh topology. The level of network security is much higher because endpoints operate independently. In the event of an attack on a node, the rest of the network will remain intact [13].

**Fig. 5.** Block diagram of an automated resource management system

In addition, it should be noted that this topology allows you to offload the server, and the probability of collisions is very low due to the peculiarities of the base station (BS). This is because in this case, frequency channels are switched in an unlicensed frequency range.

Thus, the star topology network is optimal for minimal power consumption and provides the longest battery life on the sensor node side.

Sensor nodes perform control and measurement functions [14]. They include the necessary sensors and controls. Sensor nodes can be located at a considerable distance from the gateway and are powered by a battery. Each of them establishes communication with the gateway via the LoRaWAN radio channel, which allows for a large number of connections.

A gateway (BS or hub) is a device that receives signals from sensor nodes via a radio channel and sends them to a transit network. The transit network can be Ethernet, WiFi, 3G, 4G, or mobile radio networks. The gateway and sensor nodes form a star network topology. The gateway has many multi-channel receivers to process signals in several channels simultaneously or even several signals in one channel. Accordingly, several such devices provide network coverage and transparent information transfer between sensor nodes and the server [15].

The network server performs the following control functions in the network: speed adaptation, storage and processing of information.

The application server can also remotely monitor the operation of sensor nodes and collect the necessary information from them.

The element base for the automated resource management system was selected, where the LoRaWAN Conduit IP67 from Multi-Tech was chosen as the main base station or gateway. The gateway kit includes a 12 V power supply, a 3G/LTE antenna, microUSB and Ethernet cables, a manual, and a LoRaWAN module (MTACLORA-868).

Pin antennas for the 868 MHz band are used in security alarm devices and operate in the range from 868 MHz to 868.2 MHz. The W1063 antenna is recommended by MultiTech for use with MTDOT-868 LoRa modules and LoRaWAN gateways. The 868 MHz antenna with a circular radiation pattern and 5 dB gain is used as a "base" antenna in data collection systems with a short communication range.

The Metromatic™ WSII water meter was chosen – an ultrasonic flow meter for measuring the consumption of cold and hot water in residential or commercial

premises. The meter is supplied with an integrated communication system with low power consumption over long distances, LoRaWAN or NB-IoT, as well as a wireless backup OMS. Data is collected in real time, processed automatically and made available to the IoT service provider.

We chose a Smartico Gas Meter ultrasonic gas meter for domestic use. Such meters are available in the G-1.6, G-2.5, G-4, G-6 size range and are used to measure the volume of natural and liquefied gas. The meter allows for visual and remote data acquisition.

A three-phase electricity meter was selected – MTX direct connection with a built-in LoRaWAN radio module. The device is designed to measure the consumed and generated active and reactive electricity in AC networks with a rated voltage of 3x220/380 V and automatically transmit the readings to the supplier.

A compact heat meter HYDROCAL-M4 was selected for energy measurement. The device is used for heating and/or cooling in premises served by centralised systems. The processing of data on the temperature difference between the supply and return pipes (DT), together with data on the volume of heat transfer fluid used by each user, allows for an accurate calculation of the amount of energy consumed.

The Jooby universal interface radio module with a pulse counter was selected. The purpose of the radio module is to read pulses from all types of resource meters. The information is transmitted to the server via the LoRaWAN wireless network, where it is converted into indicators. Intelligent sensors detect external interference with the radio module and immediately alert you. The radio module is fixed near the metering devices in several ways: with a DIN rail, cable tie, or screws to the wall. After that, the device is activated in the installer's mobile application. The whole process takes a few minutes and does not require the meter to be removed.

An ARMS algorithm has also been developed, consisting of six main sequential stages (Fig. 6).

At stage I, the end devices measure the flow rate.

At stage II, the information is transmitted to the gateway via a radio channel.

At the third stage, the gateway processes the information.

Stage IV – data transfer from the gateway to the network server.

The following stages involve the server processing the information and then transferring it to the application servers.

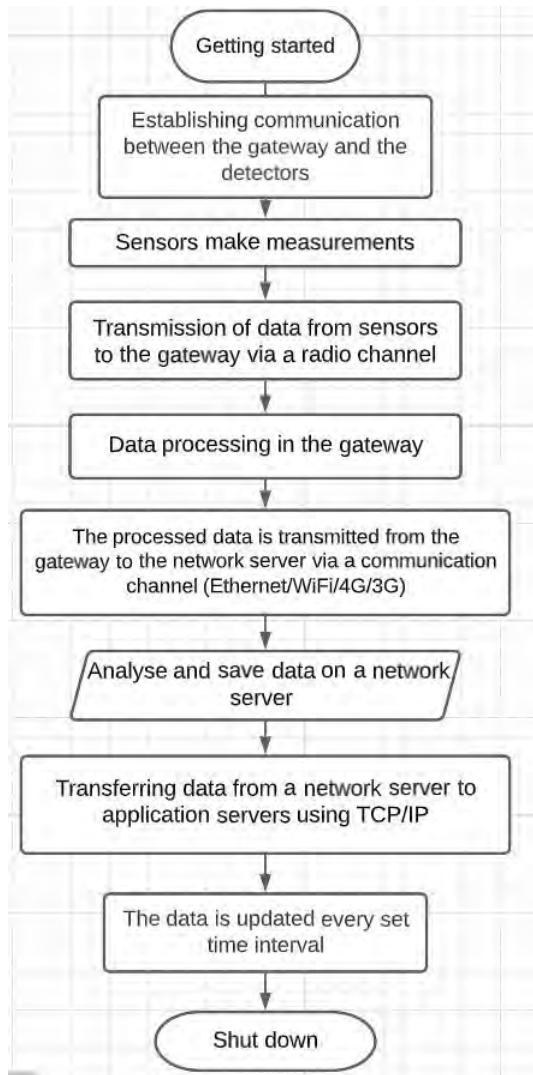


Fig. 6. The ARMS operation algorithm

After completing these stages, the information is updated after a specified period of time.

The clustering of nodes around the base stations was carried out using the FOREL and K-means methods.

The use of both of these basic clustering algorithms allows us to obtain accurate and independent results that can be further analysed and compared.

For this purpose, we consider a network of 20 thousand nodes in a city area with sides of 7 km. All nodes are randomly distributed according to a uniform distribution law. The maximum range of a gateway is 824 m. The FOREL clustering method was used to determine the gateway locations.

This method solves the problem of minimising the total distance between the centres of mass of the clusters and the elements of these clusters (1–2).

$$\{x_i, y_i\} = \arg \min_{x_i, y_i} \sum_{j=1}^k \sum_{r=1}^{n_j} d(C_j, e_{j,r}), \quad i = 1 \dots k, \quad (1)$$

where $(C_j, e_{j,r})$ is the distance between the centre of mass of the j -th cluster C_j and the r -th element of the j -th cluster $e_{j,r}$.

Coordinates of the centre of mass of the j -th cluster

$$C_j = \{x_j, y_j\}, \quad x_j = \frac{1}{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} x_{j,r}, \quad y_j = \frac{1}{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} y_{j,r}, \quad (2)$$

where n_j – number of elements in j -th cluster;

$x_{j,r}, y_{j,r}$ – coordinates of the r -th element in j -th cluster.

This algorithm determines the coordinates of the centres of mass of the clusters, which can be used as positions for the placement of gateways.

The FOREL clustering modelling resulted in a network containing 25 clusters (base stations). The result of this modelling is illustrated in Fig. 7, *a*.

The network clustering was also modelled using the K-means method [16]. For 25 base stations, this method divided the network into clusters as shown in Fig. 7, *b*.

In Fig. 8 (*a* – for the K-means clustering method, *b* – for the FOREL clustering method – a formal element) shows the relative distribution of IoT devices in the considered LoRaWAN network for both algorithms. The vertical axis in Fig. 8 indicates the number of IoT devices, and the horizontal axis indicates the relative distance between the IoT device and the cluster centre.

A negative value of the relative distance in the figures indicates that the device is located to the right of the cluster centre. As we can see in Fig. 8, IoT devices are mostly distributed around the cluster centre for both clustering methods.

Therefore, the average number of nodes in each SF zone can be determined. Fig. 9 shows the average number of nodes in each SF zone for different clustering methods: *a* – for the K-means clustering method, *b* – for the FOREL clustering method.

In addition, the capacity of the LoRa base station was calculated (results in Table 4).

Let us calculate the capacity of a LoRa base station for the two clustering methods considered, where the nodes are distributed differently by the area of radio coverage zones (Fig. 10).

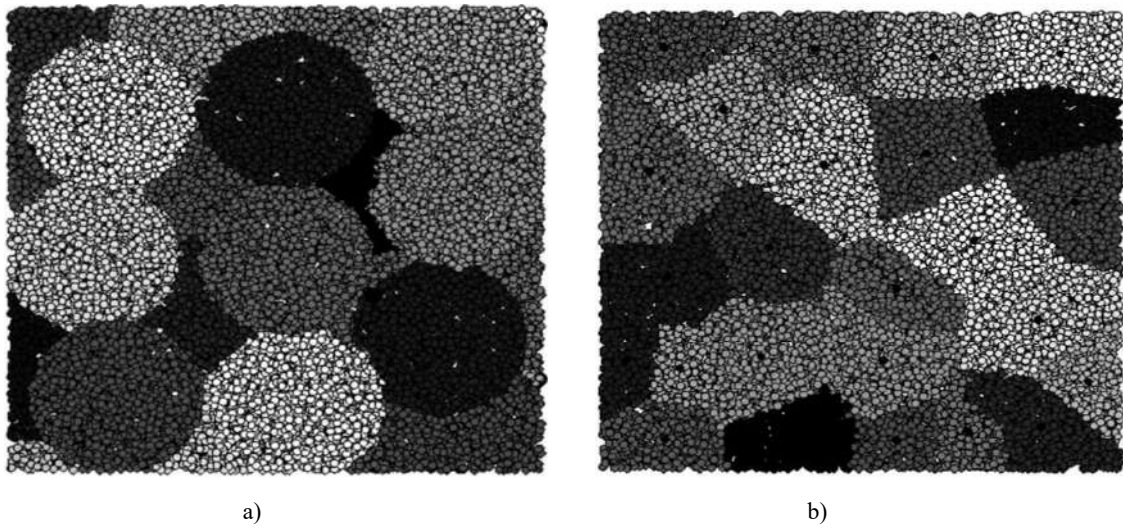


Fig. 7. Modelling results: a) FOREL clustering method; b) *K*-means clustering method

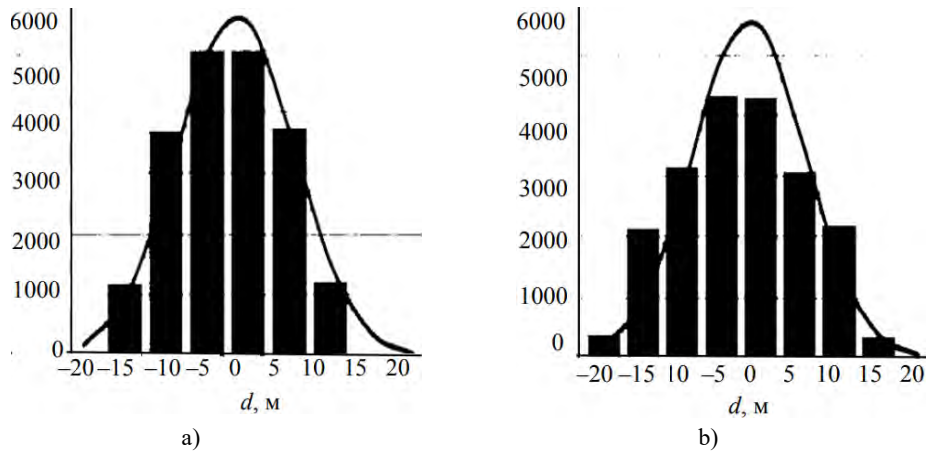


Fig. 8. Relative distribution of IoT devices in the considered network:
a) for the *K*-means clustering method; b) for the FOREL clustering method

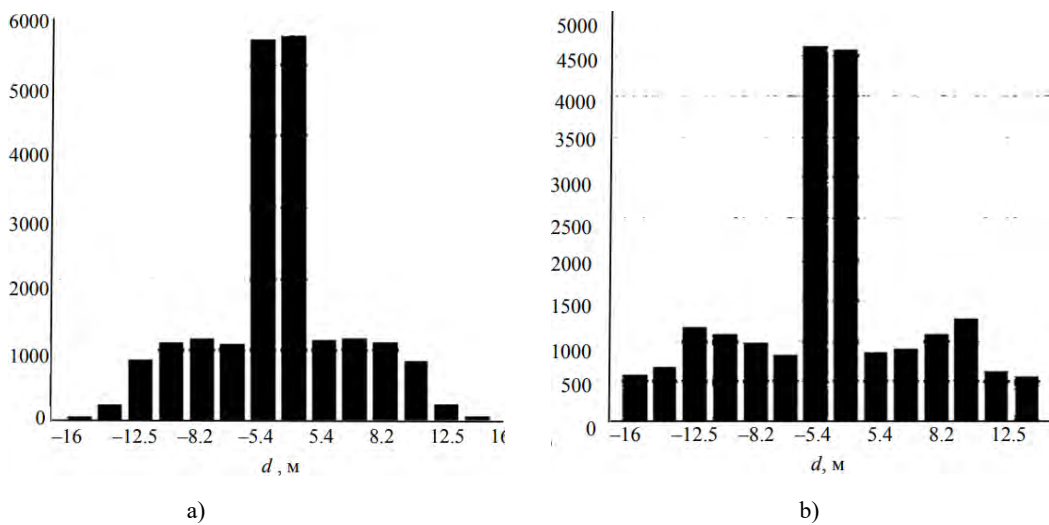


Fig. 9. Average number of nodes in each SF zone for different clustering methods:
a) for the *K*-means method; b) for the FOREL method

Table 4. Results of calculating the capacity of the BS

Clustering method	N_{ENpac} per day	Flow intensity λ at $P_{los} = 2\%$	Number of packets per day	Number of devices per BS
FOREL	24	0,01	79223	3300
<i>K</i> -means	24	0,01	92292	3845

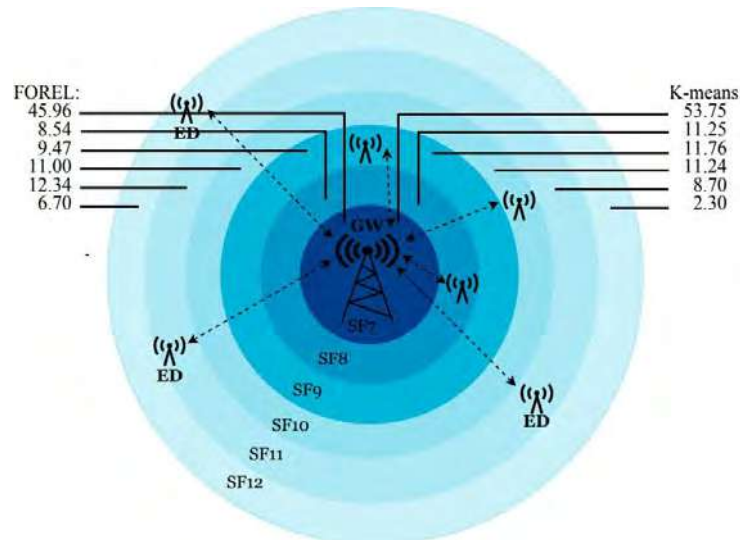
**Fig. 10.** The probability of using nodes in different *SF* zones if they are distributed by two methods of clustering

Fig. 10 shows the probability of using nodes in different *SF* zones if they are distributed according to the FOREL method, which is 45.96%, 8.54%, 9.47%, 11%, 12.34%, 6.7. For the *K*-means method, the probability of node utilisation is 53.75%, 11.25%, 11.76%, 11.24%, 8.7%, 2.3%.

Conclusion

Thus, the main modern technologies and standards of wireless information transmission are considered. A comparative analysis of them is carried out and the main advantages and disadvantages in the process of their use in modern commercial wireless systems for monitoring and management of resources present in the Ukrainian market are identified. The wireless data transmission technology has been selected, on the basis of which an automated resource management system has been built.

An in-depth comparative analysis of the most effective modern wireless technologies LoRaWAN and NB-IoT for building such a system was carried out. To create an automated resource management system, the LoRaWAN technology was chosen, which proved to be optimal for most technical requirements.

The simulation results made it possible to calculate the capacity of the LoRa base station for the two

clustering methods considered and, accordingly, the number of end nodes per base station.

Implementation of the proposed automated resource management system at HCS facilities has the following advantages: reduction of resource consumption; transmission of information in different modes with a given frequency or at the request of the server; free access to viewing the volume of costs for dispatchers of service organizations and for consumers; notification of emergency situations and a quick response to them; increasing the energy efficiency of HCS facilities; creation of an effective dispatching system; reduction of operating costs of the HCS facility; forecasting of the future. The use of the system ensures rational consumption of resources by household consumers, which means that the financial costs of supplying resources will decrease and the level of energy savings in the country will increase.

In the future, the automated resource management system can be improved by modernising and expanding its functionality and increasing its overall efficiency. This can be achieved by adding additional types of sensor nodes to the system (ventilation, lighting, fire alarm, leakage sensors, etc.), expanding and optimising the software, adding backup power supplies, and replacing the standard antennas with more powerful ones.

References

1. Sliusar, A., (2021). Methods and means of controlling water consumption at industrial enterprises. *У: 25th International Youth Forum "Radio Electronics and Youth in the 21st Century", 22 kvitnja 2021, Kharkiv*. Kharkiv: NURE. P. 101–102. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/18189>
2. Sliusar A. Resource Management System for of the Utility Sector at The Base Wireless Sensor Networks. *Manufacturing & Mechatronic Systems 2022: Proceedings of VIst International Conference*. 2022. P. 78–80.
3. Alam M. S., Arefifar S. A. Energy Management in Power Distribution Systems: Review, Classification, Limitations and Challenges. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 92979–93001. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2927303>
4. Chin J., Lin S., C.A Behavioral Model of Managerial Perspectives Regarding Technology Acceptance in Building Energy Management Systems. *Sustainability*. 2016. Vol. 8, no. 7. 641 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8070641>
5. Amaral J., Reis C., Brandao R. F. M. Energy Management Systems. *2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC)*, Dublin, 2–5 September 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/upec.2013.6715015>
6. Panchenko, I., (2018). Ways to increase the data transmission rate in wireless sensor networks using LORA. *Collection of scientific papers of the Military Institute of Telecommunications and Informatisation*. (3).
7. Andreadou N., Guardiola M., Fulli G. Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications. *Energies*. 2016. Vol. 9, no. 5. 375 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en9050375>
8. Smartico company – Klymovych Oleksandr [online], (no date). *Klymovych Oleksandr*. [Viewed 21 March 2023]. URL: <https://klimovichalex.com/portfolio/smartico-company/>
9. Energy management [online], (no date). *YASNO*. [Viewed 15 March 2023]. URL: <https://yasno.com.ua/business/energymanagement>
10. Ohliad tekhnologii LoRaWAN [online], (no date). *Atiko*. [Viewed 21 March 2023]. URL: <https://www.atiko.com.ua/articles-ua/obzor-tekhnologii-lorawan-ua/#:~:text=Що%20таке%20LoRaWAN&text=Протокол%20LoRaWAN%20-%20це%20програмний%20рівень,бездротовою%20мережею%20на%20великій%20відстані>
11. Recommendation ITU-T Y.2060, (2012). *Overview of Internet of Things*. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>
12. Lavric, A., (2019). LoRa (Long-Range) High-Density Sensors for Internet of Things. *Journal of Sensors*. 2019. P. 1–9. [Viewed 21 March 2023]. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3502987>
13. Yang X., Pan Y. Emerging Wireless LANs, Wireless PANs, and Wireless MANs: IEEE 802. 11, IEEE 802. 15, 802. 16 Wireless Standard Family. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2009. 648 p.
14. Dameri R.P., Rosenthal-Sabroux C. Smart City: How to Create Public and Economic Value with High Technology in Urban Space. Springer, 2016. 238 p.
15. Kim, J.-O., (1978). *Factor analysis: Statistical methods and practical issues*. Beverly Hills, Calif: Sage Publications, 88 p.

Received 14.03.2023

Відомості про авторів / 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; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

Слюсар Андрій Павлович – Харківський національний університет радіоелектроніки, студент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; e-mail: andrii.sliusar@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-1960-7851>

Хрустальова Софія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: sofiia.khrustalova@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3363-4547>

Хрустальов Кирило Львович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна; e-mail: kirill.khrustalev@nure.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0687-5153>

Nevliudov Igor – Doctor of Engineering Science, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Sliusar Andrii – Kharkiv National University of Radio Electronics, student of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Khrustalova Sofiia – PhD (Engineering Sciences), Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Khrustalev Kirill – PhD (Engineering Sciences), Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ДЛЯ КОМУНАЛЬНОГО СЕКТОРА НА БАЗІ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Предметом дослідження є методи, засоби й автоматизовані системи управління ресурсами для житлово-комунального сектора. **Об'єктом** є процес контролю витрат ресурсів на об'єктах житлово-комунального господарства. **Мета статті** – розроблення автоматизованої системи управління ресурсами для комунального сектора на базі бездротових сенсорних мереж. Для досягнення поставленої мети вирішені такі **завдання**: розглянуто й проаналізовано наявні методи, засоби автоматизованих систем управління ресурсами; обрано компоненти системи на основі технічних вимог до неї та з урахуванням обраної технології бездротового з'єднання LoRaWAN; розроблено структурну схему й алгоритм роботи автоматизованої системи управління ресурсами на базі бездротових сенсорних мереж; проведено моделювання процесу управління ресурсами комунального сектора з використанням бездротової сенсорної мережі на базі технології LoRa. У роботі застосовано такі **методи**: критичний аналіз технології LoRa та інших бездротових технологій IoT, методи кластеризації FOREL і K-means. Здобуто такі **результати**: здійснено загальний опис автоматизованої системи управління ресурсами, визначено її склад та основні завдання, а також встановлено технічні вимоги до неї, обрано технологію бездротової передачі даних, на основі якої побудовано автоматизовану систему управління ресурсами, проведено глибокий порівняльний аналіз найефективніших сучасних бездротових технологій – LoRaWAN та NB-IoT, обрано компоненти системи, розроблено структурну схему й алгоритм роботи автоматизованої системи управління ресурсами, змодельовано процес управління ресурсами комунального сектора з використанням бездротової сенсорної мережі на базі технології LoRa. **Висновки**: застосування запропонованої автоматизованої системи управління ресурсами забезпечує якісний контроль енерговитрат на об'єктах житлово-комунального сектора, дає змогу контролювати їх обсяг, проводити моніторинг та аналіз інформації про енерговитрати, керувати всією мережею енергопостачання як єдиною системою, що особливо необхідно в умовах воєнного стану. Такий підхід допомагає раціоналізувати споживання ресурсів побутовими споживачами, а це означає, що фінансові витрати на енергопостачання зменшаться, а рівень економії енергоресурсів у державі загалом зросте.

Ключові слова: енергопостачання; бездротова сенсорна мережа; автоматизація; шлюз; моніторинг; сенсорний вузол; базова станція.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Слюсар А. П., Хрустальова С. В., Хрустальов К. Л. Автоматизована система управління ресурсами для комунального сектора на базі бездротових сенсорних мереж. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій промисловості*. 2023. № 1 (23). С. 184–196. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.184>

Nevliudov, I., Sliusar, A., Khrustalova, S., Khrustalev, K. (2023), "Automated resource management system for the utility sector based on wireless sensor networks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (23), P. 184–196. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.184>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аветісова К. А.	57
Артюх С. В.	123
Ахієзер О. Б.	5
Багаєв І. О.	115
Баданюк І. О.	164
Бакурова А. В.	14
Батюк Т. М.	25
Бурдейна В. М.	115
Волк М. О.	72
Гамзаєв О. Р.	45
Гнусов Ю. В.	96
Голован Ю.М.	174
Голотайстрова Г. О.	5
Дівоча І. О.	14
Досин Д. Г.	25
Дунаєвська О. І.	5
Євстрат Д. І.	96
Журило О. Д.	57
Карпушенко М. Ю.	132
Карпушенко О. О.	132
Кійко С. Г.	14
Клімушин П. С.	96
Лебедєв В. О.	108
Ляшенко О. С.	57
Мамчич О. О.	72
Матвієнко О. І.	83
Мехович С. А.	5
Можасєв М. О.	96
Можасєв О. О.	96
Небилиця О. А.	155
Невлюдов І. Ш.	164, 184
Нікітін Д. О.	164
Решетняк Ю. Б.	5
Роговий А. І.	5
Рубан І. В.	108
Слюсар А. П.	184
Сороколат Н. А.	115
Спичак П. О.	83
Струков В. М.	96
Ткачук М. В.	45
Угрюмов М. Л.	123
Фатєєва Л. Ю.	115
Ходікова І. В.	143
Хрустальов К. Л.	184
Хрустальова С. В.	184
Черняк О. М.	115
Шевченко Д. О.	123
Юськів О. І.	14
Ястремська О. О.	155

ALPHABETICAL INDEX

Avetisova Karyna	57
Artiukh Sergii	123
Akhiezer Olena	5
Bahaiev Ihor	115
Badanyuk Igor	164
Bakurova Anna	14
Batiuk Taras	25
Burdeina Viktoriia	115
Volk Maksym	72
Gamzayev Rustam	45
Gnusov Yurii	96
Golovan Yuriy	174
Holotaistrova Halyna	5
Divocha Iryna	14
Dosyn Dmytro	25
Dunaievska Olha	5
Yevstrat Dmytro	96
Zhurylo Oleh	57
Karpushenko Maria	132
Karpushenko Oleh	132
Kiyko Sergiy	14
Klimushin Petro	96
Lebediev Valentyn	108
Liashenko Oleksii	57
Mamchych Oleksandr	72
Matviienko Olha	83
Mekhovich Serhii	5
Mozhaiev Mykhailo	96
Mozhaiev Oleksandr	96
Nebylytsia Helena	155
Nevliudov Igor	164, 184
Nikitin Dmytro	164
Reshetniak Yurii	5
Rohovy Anton	5
Ruban Igor	108
Sliusar Andrii	184
Sorocolat Nataliia	115
Spichak Polina	83
Strukov Volodymyr	96
Tkachuk Mykola	45
Ugryumov Mykhaylo	123
Fatieieva Lina	115
Khodikova Inna	143
Khrustalev Kirill	184
Khrustalova Sofiia	184
Cherniak Olena	115
Shevchenko Dmytro	123
Yuskiv Olesia	14
Iastremaska Olesia	155

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

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

Щоквартальний науковий журнал

№ 1 (23), 2023

Відповідальний секретар журналу *І. Г. Перова*

Відповідальний за випуск *А. А. Коваленко*

Редактор *Л. В. Кузьміна*

Комп'ютерна верстка *Л. Ю. Светайло*

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

буд. 14, проспект Науки, м. Харків, Україна, 61166

Тел.: +38 (057) 704-10-51

Веб-сайт: <http://itssi-journal.com>

E-mail: journal.itssi@gmail.com

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 12,83. Тираж 150 прим.

Віддруковано 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.

61157, Харків, вул. Акад. Богомольця, 9, кв. 50, тел. +38 (063) 993-62-73

e-mail: ep.zakaz@gmail.com